

В.П. Степаненко

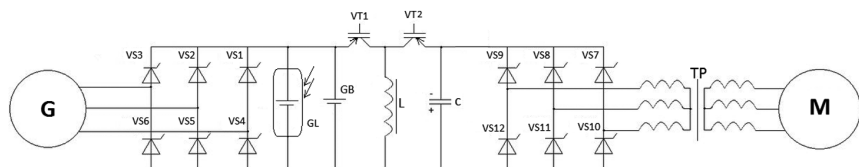
ПРИМЕНЕНИЕ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КЭСУ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКМИ И НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

Использование современных комбинированных энергосиловых установок КЭСУ с возобновляемыми (альтернативными) источниками и накопителями энергии позволяет добиться повышения экологической безопасности, энергоэффективности и снижения расхода дизельного топлива в горной промышленности. Для достижения этих целей необходима модернизация систем электроснабжения горных предприятий, в первую очередь, удаленных от высоковольтных электрических сетей, питающихся от автономных электростанций с поочередно работающими дизель-генераторными установками. В состав современных КЭСУ предлагается включать получившие широкое распространение ветряные генераторы и солнечные батареи, в качестве накопителей – аккумуляторные батареи и конденсаторы с двойным электрическим слоем КДЭС. В статье приведены математические формулы, позволяющие рассчитать параметры электрохимических накопителей энергии. Ключевые слова: электроснабжение, возобновляемые источники энергии, экологическая безопасность, энергосиловые установки, энергоэффективность, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, дизельное топливо.

Комбинированные (гибридные) энергосиловые установки КЭСУ являются одним из средств ускорения внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий и повышения экологической безопасности в горной промышленности [1–10]. Классификация КЭСУ для горных транспортных машин была предложена в 70-х годах прошлого столетия и включала 14 типов [9, 10]. Дальнейшее совершенствование предполагает использование в КЭСУ источников возобновляемой (альтернативной) энергии и энергии рекуперативного торможения. Источником возобновляемой (альтернативной) энергии являются происходящие на нашей планете природные процессы и ресурсы – ветер, вода, солнечный свет, энергия геотермальная, волн, приливов и отливов. Доля сжигаемой традиционной биомассы

в мире постепенно сокращается, а доля возобновляемой энергии растет. Мировое потребление энергии из возобновляемых источников в 2006 г. достигало 5%, в 2010 г. — 16,7%, в 2013 — 21%. На рисунке представлена принципиальная электрическая схема КЭСУ автономного электроснабжения, которая включает в себя: возобновляемые источники энергии, устройства, превращающие энергию ветряного (дизельного) генератора и солнечных батарей в электрическую и накопители энергии — аккумуляторную батарею ЭХН и суперконденсатор КДЭС.

Основными параметрами накопителей электрической энергии являются энергоемкость, мощность и КПД в зарядном и разрядном режимах, стоимостные и весогабаритные показатели. Средний срок службы герметичных свинцовых аккумуляторов 5–10 лет, они имеют ограниченные диапазоны рабочих температур и разрядных токов. В сравнении с классическими наливными аккумуляторами герметичные имеют худшие нагрузочные характеристики, обладают повышенной чувствительностью к превышению зарядного напряжения. Наливные аккумуляторы намного дешевле герметичных и в настоящее время продолжают широко использоваться в качестве электрохимических накопителей энергии ЭХН. Были проведены исследования областей рационального применения КЭСУ с использованием наливных недорогих щелочных никель-железных ТНЖ, никель-кадмиевых ТНК и кислотных 7PzSL аккумуляторов [9, 10]. Для измерения объемов водорода, выделяющегося из наливных аккумуляторов, при скорости менее 5 л/ч применялся метод «меток», при скорости выше 5 л/ч использовались счетчики барабанного типа и трубки Дрегера. Фоновая концентрации водорода в подземной вентилируемой зарядной камере достигает 0,3%.



Принципиальная электрическая схема КЭСУ автономного электроснабжения: G – ветряной (дизельный) генератор; M – асинхронный электродвигатель; VS1–VS6 – трехфазный мостовой выпрямитель; VS7–VS12 – трехфазный мостовой инвертор; TP – трансформатор; GB – аккумуляторная батарея; GL – солнечная батарея; VT1, VT2 – биполярные транзисторы с изолированным затвором; VS – тиристоры; L – электромагнитный дроссель с сердечником; C – суперконденсатор

Концентрация водорода под крышкой батарейного ящика аккумуляторного электровоза при полностью заряженной аккумуляторной ТНК батареи при заряде током Сн/15 за первые 10 минут увеличивается от 0,3% до 0,4%, за вторые 10 мин. от 0,4% до 0,55%, за третьи 10 мин, от 0,55% до 0,8% и не достигает опасных значений 2%. В процессе исследований было установлено, что скорость выделения водорода из аккумуляторов при разряде гораздо ниже, чем при естественном фоновом его выделении. Через 6 минут после окончания заряда при токах $I_{зар} = I_{разр} = 0$ скорость выделения водорода из кадмий-никелевых аккумуляторов при сообщении им 1,5Сн и 1,0Сн, соответственно, в 4,7 и 3,7 раз выше, чем при разрядном токе равном Сн/3. Сравнение скорости и объема выделения водорода из ТНЖ и ТНК выявили существенно меньшее выделение водорода из ТНК аккумуляторов. При емкости, сообщенной аккумуляторам до 0,1Сн, и при токе заряда Сн/10 выделение водорода из аккумуляторов ТНК отсутствует. При сообщенной емкости аккумулятора более 0,75Сн выделение водорода из ТНК аккумуляторов при зарядном токе Сн/30 в 2 раза меньше, при токе Сн/15 в 7,6 раз меньше и при токе С/10 – в 6,5 раз меньше, чем из выделение водорода из ТНЖ аккумуляторов. Скорости выделения водорода из ТНЖ и из ТНК аккумуляторов выравниваются при сообщенной аккумуляторам емкости 1,1Сн при токе заряда Сн/10. При сообщенной емкости 1,25Сн скорости выделения водорода выравниваются при зарядном токе Сн/30. При сообщенной ТНК аккумуляторам емкости до 75% от номинальной скорость выделения водорода при зарядном токе Сн/10 не превышает 1 литр в час из одного элемента.

При сообщенной емкости Сн/10 скорость выделения водорода из ТНЖ аккумулятора при зарядном токе Сн/40 равна 2 л/ч, при зарядном токе С/20 – 6 л/ч и при зарядном токе Сн/10 – 9 л/ч. Замеры скорости естественного выделения водорода из аккумуляторов производились после сообщения им емкости от 0,1Сн до 1,5Сн. После отключения зарядного тока скорость выделения водорода из ТНК аккумуляторов равна 1 л/ч при сообщенной емкости Сн/10 и 16 л/ч при сообщенной емкости 1,5Сн. После отключения зарядного тока скорость выделения водорода из ТНЖ аккумуляторов при сообщенной емкости Сн/10 была равна 2,5 л/ч и при сообщенной емкости 1,5Сн была втрое выше и достигала 7,5 л/ч. Через две минуты после отключения зарядного тока при сообщенной емкости Сн/4 скорость выделения водорода из ТНК аккумуляторов уменьшилась вдвое

с 1 л/ч до 0,5 л/ч, а при сообщенной емкости 1,5Сн с 16 л/ч до 5 л/ч. Спустя 10 мин. после отключения зарядного тока скорости выделения водорода соответственно были равны из ТНК аккумуляторов 0,2 л/ч, из ТНЖ — 2,8 л/ч. Исследования показали, что снижение скорости естественного выделения водорода из ТНЖ аккумуляторов гораздо меньше, чем из ТНК. Через две минуты после отключения зарядного устройства скорость выделения водорода из ТНЖ аккумуляторов, имеющих сообщенную емкость 1,5С, уменьшилась с 7,5 л/ч до 5 л/ч, а через 10 минут с 7,5 л/ч до 3 л/ч. При запасенной емкости С/4 скорость выделения водорода из ТНЖ аккумуляторов через две минуты уменьшилась от 2,5 л/ч до 1,5 л/ч, а через 10 минут от 2,5 л/ч до 1,1 л/ч. При переходе из зарядного режима в разрядный при токе Сн/3 скорость выделения газа из аккумуляторов за первые 2 минуты уменьшается у ТНЖ аккумуляторов при сообщенной емкости 1,5Сн от 7,5 л/ч до 2 л/ч и при емкости Сн/5 от 2,5 л/ч до 0,2 л/ч. Выделение водорода из ТНК аккумуляторов при том же разрядном токе Сн/3 уменьшается за 2 минуты от 16 л/ч до 2 л/ч при емкости 1,5Сн.

Паспортные значения отдаваемой при разряде аккумуляторами электроэнергии, справедливы при температурах окружающего воздуха от +15 °С до +35 °С. При температуре ниже –25 °С кпд разряда аккумуляторных батарей не превышает 5–10%, а при температуре выше +55 °С они не принимают заряд. При пиковом увеличении разрядного тока кпд и отдаваемая энергия резко падает. При разрядном токе, в пять раз превышающем номинальное значение, кпд разряда снижается до 12,3%, а отдаваемая энергия до 28,13%.

При одинаковом напряжении количество элементов в щелочной батарее в 1,75 раз больше, чем в свинцово-кислотной. За счет большего количества перемычек между элементами внутреннее омическое сопротивление щелочной батареи примерно в два раза больше, чем кислотной. Если в расчетах вместо абсолютных использовать относительные значения напряжения U^* , отдаваемой емкости E^*_6 , отдаваемой энергии A^*_6 , то значения расчетных коэффициентов a , b , c , d в формулах (1) – (8) для щелочных и свинцово-кислотных аккумуляторных батарей будут совпадать.

Для кислотных аккумуляторов рабочее напряжение находится в пределах 1,8–2,5 В, щелочных 0,7–1,25 В. на один элемент. Минимально допустимые значения разрядного напряжения для щелочных аккумуляторов при 1-часовом токе разряда равны

0,7 В на элемент, при 3-часовом токе 0,8 В на элемент, при 5-часовом токе разряда 1,0 В на элемент, при 8-часовом токе разряда 1,1 В. Для расчета основных параметров тяговых математические формулы для расчета параметров электрохимических накопителей (ЭХН – аккумуляторных батарей) были выведены формулы (1)–(8), содержащие коэффициенты a, b, c, d . Используя формулы (1)–(8), для ЭХН (щелочных и кислотных батарей) можно рассчитать зависимости КПД $\eta = f(Ip)$ и зависимости в относительных единицах напряжения батареи $U^* = f(Ip)$, отдаваемой емкости $E_6^* = f(Ip)$, отдаваемой энергии $A_6^* = f(Ip)$ в функции разрядного тока а также в функции времени зависимости напряжения батареи $U^* = f(t)$, отдаваемой емкости $E_6^* = f(t)$, отдаваемой энергии $A_6^* = f(t)$. Значком (*) обозначены отношения текущих значений тока, напряжения, емкости, энергии аккумуляторных батарей к номинальным значениям.

Коэффициенты $a_{1-4}, b_{1-4}, c_{1-4}, d_{1-4}$ используются для подстановки в расчетные формулы (1)–(4) и коэффициенты $a_{5-8}, b_{5-8}, c_{5-8}, d_{5-8}$ для подстановки в формулы (5)–(8)

$$U = a_1 - b_1 Ip + c_1 Ip^2 - d_1 Ip^3 \quad (1)$$

$$E_6^* = a_2 - b_2 Ip + c_2 Ip^2 - d_2 Ip^3 \quad (2)$$

$$A_6^* = a_3 - b_3 Ip + c_3 Ip^2 - d_3 Ip^3 \quad (3)$$

$$U^* = a_4 - b_4 Ip + c_4 Ip^2 - d_4 Ip^3 \quad (4)$$

$$U^* = a_5 - b_5 t + c_5 t^2 - d_5 t^3 \quad (5)$$

$$E_6^* = a_6 - b_6 t + c_6 t^2 - d_6 t^3 \quad (6)$$

$$A_6^* = a_7 - b_7 t + c_7 t^2 - d_7 t^3 \quad (7)$$

$$\eta = a_8 - b_8 t + c_8 t^2 - d_8 t^3 \quad (8)$$

Для оборудования, предназначенного для эксплуатации в условиях низких и высоких температур, а также при частой пиковой нагрузки, превышающей среднюю в 5–7 раз, предлагается использовать комбинированный накопитель, состоящий из ЭХН – аккумуляторной батареи и КДЭС (суперконденсатора). Системы электроснабжения объектов, удаленных от высоковольтных электрических сетей, в основном, питаются от автономных электростанций с двумя поочередно работающими дизель-генераторными установками. В горной промышленности эксплуатируются автосамосвалы и другие машины, потребляющие большие объемы дизельного топлива и горюче-смазочных материалов и загрязняющие окружающую среду.

Снизить расход дизельного топлива не менее, чем в 3–5 раз, существенно повысить экологическую безопасность можно путем применения современных КЭСУ, в состав которых должны входить возобновляемые источники и комбинированные накопители энергии. Такие КЭСУ должны обеспечивать прием рекуперативной энергии и автономное электроснабжение. Использование современных КЭСУ с возобновляемыми (альтернативными) источниками и накопителями энергии позволит добиться повышения экологической безопасности, энергоэффективности и снижения расхода дизельного топлива в горной промышленности. Для достижения этих целей необходима модернизация существующих систем электроснабжения горных предприятий, в первую очередь, удаленных от высоковольтных электрических сетей, питающихся от автономных электростанций с поочередно работающими дизель-генераторными установками. В состав современных КЭСУ предлагается включать получившие широкое распространение ветряные генераторы и солнечные батареи, в качестве накопителей – аккумуляторные батареи и конденсаторы с двойным электрическим слоем КДЭС. Современные КЭСУ должны оборудоваться силовыми

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	1200x450x310мм
8	Объем	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

реверсивными электронными преобразователям на транзисторах IGBT или традиционных тиристорах и обеспечивать прием рекуперативной энергии и автономное электроснабжение потребителей. Использование современных комбинированных энергосиловых установок КЭСУ с возобновляемыми (альтернативными) источниками и накопителями энергии позволяет добиться повышения экологической безопасности, энергоэффективности и снижения расхода дизельного топлива в горной промышленности.

В таблице представлены параметры перспективного суперконденсаторного модуля МЛСК-130-57, разработанного ООО «ТЭЭМП», г. Москва, инвестором которого является группа «Ренова». Степень защиты корпуса модуля IP65.

Суперконденсаторные модули МЛСК-130-57 могут найти широкое применение в КЭСУ для горной промышленности.

Выводы

1. Использование в горной промышленности современных комбинированных энергосиловых установок КЭСУ с возобновляемыми источниками и накопителями энергии позволит добиться повышения экологической безопасности и энергоэффективности, уменьшить расход электроэнергии на 15–20%, дизельного топлива не менее, чем в 3–5 раз.

На стационарных КЭСУ экономически целесообразно применять наливные никель-кадмиевые и кислотные аккумуляторы и суперконденсаторные модули МЛСК-130-57.

2. Современные КЭСУ должны оборудоваться силовыми реверсивными электронными преобразователям на транзисторах IGBT или традиционных тиристорах и обеспечивать прием рекуперативной энергии и автономное электроснабжение потребителей.

3. Получены математические формулы для расчета основных параметров ЭХН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Степаненко В. П.* Электровозная откатка на урановых рудниках Советско-германского акционерного общества «Висмут». 1980–1987 годы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 141–147.

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

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

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

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

7. 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.

8. Белозеров В. И., Степаненко В. П. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителями энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 5(117). – С. 76.

9. Степаненко В. П. Особенности организации локомотивной откатки с использованием комбинированных электровозов / Научные сообщения ИГД им. Скочинского. Горная механика, рудничный транспорт, техническое обслуживание и ремонт ГШО. – М., 1988. – С. 130–138.

10. Степаненко В. П. Дизель-аккумуляторные подвесные монорельсовые локомотивы / Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского. Вып. 150. – М., 1977. – С. 80–83. **ГИАЗ**

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. 138–146.

UDC 622:
620.91

V.P. Stepanenko

APPLICATION OF INTEGRATED ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES AND STORES OF ENERGY IN THE MINING INDUSTRY

The use of modern combined power plants CASE with renewable (alternative) sources and energy storage allows to increase ecological safety, energy efficiency and reduction of diesel fuel consumption in the mining industry. To achieve these goals, the modernization

of power supply systems of mining companies in the first place, far from the high-voltage electrical networks that feed at the present time from the Autonomous power plants with alternately operating diesel generator sets. In the present CASE are encouraged to incorporate renewables and energy storage. As renewable energy is preferable to use widespread wind generators and solar panels as storage devices – batteries and supercapacitors are capacitors with a double electric layer CDAS. Modern CASE needs to ensure the acceptance of regenerative energy and independent electricity supply and be fitted with a reversible power electronic converters for IGBT transistors or conventional thyristors. Also discussed ways to improve the efficiency of mining locomotive transport by applying CASE and increase the accuracy of calculations of coefficients of adhesion given the abrasiveness of rocks. The proposed technical solution will significantly improve the energy efficiency and environmental safety, to reduce electricity consumption by locomotive transport by 15–20%, diesel fuel consumption at least 3–5 times.

Key words: electricity, renewable energy, environmental safety, energy-power installation, the coefficient of adhesion, energy efficiency, supercapacitor, battery, diesel fuel.

AUTHOR

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

REFERENCES

1. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
2. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 141–147.
3. Stepanenko V.P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 135–140.
4. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 168–173.
5. Stepanenko V.P., Belozherov V.I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 174–181.
6. Stepanenko V.P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 323–328.
7. Stepanenko V.P., Belozherov V.I., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 317–322.
8. Belozherov V.I., Stepanenko V.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 5(117), pp. 76.
9. Stepanenko V.P. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. Skochinskogo. Gornaya mekhanika, rudnichnyy transport, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont GShO* (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining. Rock mechanics, mine transport, mining equipment maintenance and repair), Moscow, 1988, pp. 130–138.
10. Stepanenko V.P. *Nauchnye soobshcheniya IGD im. A.A. Skochinskogo*. Vyp. 150 (Transactions of the Skochinsky Institute of Mining, issue 150), Moscow, 1977, pp. 80–83.

