УДК 620.92

В.П. Степаненко

ВЫБОР НАКОПИТЕЛЕЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В настоящее время одним из основных направлений развития энергосистем является увеличение доли ВИЭ в общем балансе. ВИЭ носят нестабильный характер, так как находятся в зависимости от времени года и погодных условий. Обеспечить стабильность элетроснабжения можно с помощью электрохимических накопителей энергии, аккумуляторных батарей и топливных элементов. Рассмотрены возможности применения литий-ионных, литий-железо-фосфатных, никель-железных, никель-кадмиевых, свинцово-кислотных и водородных топливных элементов

Ключевые слова: энергия, возобновляемые источники, изолированные энергосистемы, накопители, аккумуляторы, литий-ионные, железо-фосфатные, никель-железные, свинцово-кислотные, водород, топливные элементы.

В настоящее время в энергетике все чаще отказываются от мощных электростанций в пользу небольших местных электростанций. Одним из направлений развития энергетики является увеличение доли генерации энергии возобновляемыми источниками (ВИЭ) [1–17]. Однако без применения электрохимических накопителей ЭХН, топливных элементов или дизель-генераторов невозможно обеспечить стабильное круглогодичное электроснабжение небольших автономных энергетических систем. В табл. 1 приведены типы электростанций и различные источники энергии.

Для уменьшения расхода дизельного топлива экономически целесообразно применять электрохимические накопители ЭХН энергии. К наиболее распространенным ЭХН относятся литиевые, никель-кадмиевые, никель-железные, свинцово-кислотные аккумуляторные батареи и водородные топливные элементы. В табл. 2 представлены параметры литий-ионных аккумуляторов.

Литий-железо-фосфатный аккумулятор $LiFePO_4$ (LFP) является одним из наиболее энергоемких. Его удельная энергоем-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 217–227.
© 2017. В.П. Степаненко.

Таблица 1

Типы электростанций и источники энергии

№ пп	Тип электростанции	Источник энергии
Источники невозобновлямой энергии		
1	тепловые электростанции	не возобновляемое топливо: газ, уголь, сланец, торф, мазут, дрова и др.
2	атомные электростанции	ядерное топливо
3	дизель-генераторные электростанции	дизельное топливо
Источники возобновлямой энергии		
1	солнечные электростанции	солнечная энергия
2	ветряные электростанции	кинетическая энергия ветра
3	гидроэлектростанции	энергия воды в реках и водохранилищах
4	приливные электростанции	энергия воды в морях и океанах вследствие движения Земли и Луны
5	волновые электростанции	энергия волн морей и океанов
6	геотермальные электростанции	внутренняя энергия Земли

кость равна 90—140 Втч/кг. Литий-ионные кобальтовые элементы $LiCoO_2$ экологически более опасны и значительно дороже литий-железо-фосфатных аккумуляторов. В табл. 3 представлены параметры литий-железо-фосфатных аккумуляторов $LiFePO_4$.

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы имеют больший срок службы, чем литий-кобальтовые и более стабильное напряжение при разряде близкое к 3,2 В. Отсутствие в его пластинах кобальта повышает экологическую безопасность аккумуляторов $LiFePO_4$. В табл. 3 представлены параметры литий-железо-фосфатных аккумуляторов $LiFePO_4$. Элементы $LiFePO_4$ медленнее теряют емкость, чем литий-кобальт-оксидные элементы $LiCoO_2$ и литий-марганцевая шпинель $LiMn_2O_4$. Аккумулятор $LiFePO_4$ имеет более высокий пиковый ток, чем $LiCoO_2$. Элементы $LiFePO_4$, имеющие высокие удельные показатели запасаемой энергии и мощности, могут использоваться как буферные накопители энергии в стационарных системах автономного электроснабжения с использованием ВИЭ.

Наиболее дешевыми и наименее энергоемкими являются никель-железные аккумуляторы, параметры приведены в табл. 4. Удельная энергоемкость никель-железных аккумуляторов равна 20–50 Втч /кг. В процессе заряда из никель-железных аккумуляторов наблюдается обильное газовыделение.

В табл. 5 приведены параметры никель-кадмиевых аккумуляторов. При заряде никель-кадмиевых аккумуляторов газовыделение менее обильное, чем из никель-железных. Удельная энергоемкость никель-кадмиевых аккумуляторов равна 45–65 ч/кг.

Топливные элементы не могут хранить электрическую энергию, как гальванические или аккумуляторные батареи, но они могут найти широкое применение в электрических сетях, использующих возобновляемые источники энергии. В таких сетях топливные элементы, электролизеры с компрессорами и оборудованием для хранения водорода могут обеспечить непрерывное и стабильное электроснабжение в любое время суток и года и при любых метеоусловиях. В табл. 6 приведены параметры свинцово-кислотных аккумуляторов. Удельная энергоемкость свинцово-кислотных аккумуляторов равна 30–60 Втч/кг.

Таблица 2

Параметры литий-ионных аккумуляторов.

№ пп	Параметры	Величина
1	Напряжение полностью заряженного элемента без нагрузки	3,65 В
2	Рабочее напряжение	3,2 В
3	Напряжение полностью разряженного элемента	2,5 В
4	Объемная плотность энергии	220–350 Втч/дм^3
5	Удельная плотность энергии,	110 Втч/кг
6	Число циклов до потери 20% от номинальной емкости	600
7	Рабочие температуры	от -20 °С до +60 °С
8	Месячный саморазряд при температуре15–25°С	3%
9	Срок хранения	15 лет
10	Экологическая безопасность	опасны в аварийных режимах и при неправильной утилизации

Таблица 3

Параметры литий-железо-фосфатных аккумуляторов

№ пп	Параметры	Величина
1	Напряжение полностью заряженного элемента без нагрузки	3,65 В
2	Рабочее напряжение	3,2 В
3	Напряжение полностью разряженного элемента	2,0 В
4	Удельная плотность энергии	90–140 Втч/кг
5	Объемная плотность энергии	220–350 Вт·ч/дм^3
6	Объемная плотность конструкции	2,0 кг/дм^3
7	Число циклов до потери 20% от номинальной емкости	1000
8	Удельная мощность при разряде током 60С	> 6,6 Вт/г
9	Рабочие температуры	от -30 °С до +55 °С
10	Месячный саморазряд при температуре 15–25°С	3–5%
11	Срок хранения	15 лет
12	Экологическая безопасность	опасны в аварийных режимах и при неправильной утилизации

Анализ табл. 2–6 показывает, что наилучшими энергетическими показателями обладают литий-железо-фосфатные аккумуляторы. Их удельная энергоемкость не превышает 110–140 Втч/кг, объемная плотность энергии – 350 Втч/л. Приведенные в табл. 2–6 технические характеристики ЭХН справедливы при положительных температурах в пределах от 15 С° до 35 С°. При снижении температуры ниже 15 С° отдаваемая при разряде электрическая энергия резко уменьшается. Этого недостатка лишены топливные элементы. В табл. 7 приведены типы, мощности и области применения топливных элементов [7–17].

Водородные топливные элементы и воздушно-алюминиевые электрохимические генераторы осуществляют превращение химической энергии топлива (водорода или алюминия) в электричество, минуя малоэффективные, идущие с большими потерями, процессы горения, и непосредственно вырабатывает электроэнергию. Отечественные топливные элементы были

созданы в период выполнения советской лунной программы. РКК «Энергия» испытала на космическом корабле «Буран» энергетическую установку мощностью 10 кВт на щелочных топливных элементах.

В табл. 8 приведены основные типы топливных элементов. Напряжение на топливных элементах от 0,6 до 1,1 В, мощность 0,4–0,6 Вт. Элементы объединяют в батареи. Напряжение будет зависеть от числа элементов в батарее, а сила тока – от их суммарной поверхности. Мощность батареи может достигать 30–50 кВТ при размерах устройства, позволяющих разместить его в багажнике легкового автомобиля.

В табл. 8. риведены сведения о шести типах топливных элементов: кислотный PAFC, щелочной AFC, карбонатный MCFC, твердотельный оксидный SOFC, мембранный PEM, метаноловый DMFC. В качестве электролита в топливном элементе типа PAFC используется едкая ортофосфорная кислота. Рабочая температура электролита топливных элементов этого типа менее 200 °С. Подключение других устройств к топливному эле-

Таблица 4

Параметры никель-железных аккумуляторов

№ пп	Параметры	Величина
1	Напряжение полностью заряженного элемента без нагрузки	1,35 В
2	Рабочее напряжение	1,2 В
3	Напряжение полностью разряженного элемента	0,8В
4	Удельная плотность энергии,	20–50 Втч/кг
5	Объемная плотность энергии	350 Втч/дм^3
6	Удельная мощность	100 Вт/кг^3
7	Число циклов до потери 20% от номинальной емкости	800
8	Рабочие температуры	от -40 °С до + 46 °С
9	Месячный саморазряд при температуре 15–25 °С	20–40, %
10	Срок хранения	30 лет
11	Экологическая безопасность	опасны в аварийных режимах и при неправильной утилизации

Таблица 5

Параметры никель-кадмиевых аккумуляторов

№ пп	Параметры	Величина
1	Напряжение полностью заряженного элемента без нагрузки	1,37 В
2	Рабочее напряжение	1,2 В
3	Напряжение полностью разряженного элемента	0,9 В
4	Удельная плотность энергии,	45–65 Втч/кг
5	Объемная плотность энергии	50–150 Втч/дм^3
6	Число циклов до потери 20% от номинальной емкости	100–900
7	Рабочие температуры	от -40 °С до +50 °С
8	Месячный саморазряд при температуре 15–25 °С	2%
9	Срок хранения	20 лет
10	Экологическая безопасность	опасны в аварийных режимах и при неправильной утилизации

менту PAFC затруднено. Возможно использование водорода с примесью окиси углерода. КПД элементов PAFC высокий – до 80%. Кислотный топливный элемент типа PAFC используется для снабжения помещений электрическим током.

Метаноловый топливный элемент типа DMFC прямого действия. Электролитом служит полимерная мембрана. Водород поступает непосредственно из метанола. В реакции метанола CH_3OH с водой образуется метан и водород. Малые размеры элемента DMFC сочетаются с отсутствием необходимости очистки водорода, легкостью хранения метанола. Недостатки DMFC – высокая стоимость платинового катализатора, низкое напряжение, невысокий кпд (около 40%).

В качестве электролита в щелочном топливном элементе типа AFC применяется раствор едкого натрия или едкого калия, эти жидкие электролиты могут быть причиной коррозии. Рабочая температура топливного элемента типа AFC менее 100 °С. Щелочные топливные элементы типа AFC изготавливают из сравнительно дешевых материалов, в их катализаторах более низкое содержание платины, чем в катализаторвх кислотных топливных элементов PAFC. К недостаткам топливного элемента типа

AFC относятся большие размеры, потребность в чистых кислороде и водороде. Щелочной топливный элемент типа AFC применяется в космических аппаратах.

В топливном элементе типа MCFC электролитом служит калиево-литиевый карбонат, проводящий ионы при температуре < 650 °С. Его достоинства – высокий КПД, отсутствие платинового катализатора; водород может содержать примесь окиси углерода, извлекаться из природного газа, пропана и др. Недостаток MCFC – высокие температуры усложняют конструктивные решения. Топливный элемент типа MCFC с расплавленным карбонатом применяется для обогрева зданий и запуска турбин.

Топливный элемент типа SOFC с твердым электролитом, обладает высоким кпд и высокой мощностью. Рабочая температура около1000 °С. Вода при такой температуре находится в состоянии перегретого пара. Вместо жидкого электролита в топливном элементе SOFC используется керамический мате-

Таблица 6

Параметры свинцово-кислотных аккумуляторов

№ пп	Параметры	Величина
1	Напряжение полностью заряженного элемента без нагрузки	1,8 В
2	Рабочее напряжение	2,0 В
3	Напряжение полностью разряженного элемента	1,75–1,8 В
4	Удельная плотность энергии	30–60 Втч/кг
5	Объемная плотность энергии	100 Втч/дм^3
6	КПД	80–90%
7	Число циклов до потери 20% от номинальной емкости	600
8	Теоретическая предельная энергоемкость	133 Втч/кг
9	Рабочие температуры	от -40°С до + 40 °С
10	Месячный саморазряд при температуре 15–25 °С	2%
11	Срок хранения	5 лет
12	Экологическая безопасность	опасны в аварийных режимах и при неправильной утилизации

Таблица 7

Типы, мощности и области применения топливных элементов

Тип установки	Мощность	Области применения
Стационарные	от 5 до 250 кВт и выше	автономные источники тепло- и электроснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, источники бесперебойного питания, резервные и аварийные источники электроснабжения
Портативные маломощные	1–500 Вт	мобильные телефоны, ноутбуки, карманные компьютеры, различные бытовые электронные устройства, современные военные приборы
Портативные мощные	1–50 кВт	космические корабли и спутники, дорожные указатели, грузовые и железнодорожные рефрижераторы, инвалидные коляски, тележки для гольфа и др.
Транспортные	25–150 кВт	военные корабли и подводные лодки, автомобили и другие транспортные средства

риал. Применение элемента SOFC ограничено из-за высокой стоимости термостойких материалов. Элемент SOFC применяется для обогрева зданий, для запуска паровых турбин на крупных электростанциях и как источник тока.

Топливный элемент типа PEM с протонно-обменной мембраной дешевле высокотемпературных элементов. Электроли-

Таблица 8

Основные типы топливных элементов.

№ пп	Тип топливного элемента	Электролит	Температура, °С
1	Кислотный PAFC	раствор ортофосфорной кислоты	< 200
2	Щелочной AFC	раствор щелочи	< 100
3	Карбонатный MCFC	расплавленный карбонат	650
4	Твердотельный оксидный SOFC	смесь оксидов	1000
5	Мембранный PEM	протонно-обменная мембрана	80
6	Метаноловый DMFC	полимерная мембрана	60

том служит органическая мембрана, пропускающая в одном направлении. Элемент типа РЕМ отличается маленькими размерами, высоким кпд, низкой рабочей температурой (около 100 °С). Недостаток топливного элемента РЕМ – малый срок службы.

Выводы

1. Реальные перспективы применения в ближайшие годы в автономных энергосистемах с возобновляемыми источниками имеют свинцово-кислотные, никель-кадмиевые и литий-железо-фосфатные аккумуляторы

2. В последующее десятилетие можно ожидать применения в автономных энергосистемах с возобновляемыми источниками менатоловых и мембранных низкотемпературных водородных топливных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сокольникова Т. В.*, *Суслов К. В.*, *Ломбарди Пио*. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энргии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 10. – С. 206–2011.

2. *Водородная* энергетика в России. http://ru.wikipedia/org/wikil

3. *Максименко Т.* Водородная энергетика. Школа Жизни. http:// shkolazhizni.ru.world/articles/

4. *Гибридные* энергосистемы с использованием систем накопления энергии СНЭ – современный подход к организации автономной энергетики. http://enerz.ru./novosti/id8/

5. *Беляева О.* Энергетическая стратегия России до 2030 года. http:// radiovesti. ru/show/article_id/52999

6. *Арктика* перспективна для развития практически всех видов энергетики, использующей возобновляемые ресурсы. Заседание Государственной комиссии по вопросам развитии Арктики. Новосибирск. 09.06.2016 г. http://artic.gov.ru/News/

7. *Максименко Т.* Как поставить водород Черного моря на службу людям? Школа Жизни. http://shkolazhizni.ru.world/articles/13133/.

8. *Касаткин М. А.* Россия постепенно подтягивается к странам с наиболее развитой водородной энергетикой.http://regnum.ru/news/ innovation/1941837.html

9. *Степаненко В. П.* Определение параметров накопителей энергии комбинированных энергосиловых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 166–174.

10. *Степаненко В. П.* Применение возобновляемых источников энергии и суперконденсаторов на открытых горных работах // Горный

информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 175–182.

11. *Степаненко В. П.* Применение в горной промышленности КЭСУ с возобновляемыми источниками и накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 138–146.

12. *Степаненко В. П.* Перспективы применения в горной промышленности нетрадиционных возобновляемых источников и комбинированных накопителей энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 10. – С. 93–104.

13. *Степаненко В. П.*, *Юдин Ю. П.* Разработка методики расчета энергетических и весогабаритных показателей рудничных локомотивов с уменьшенной токсичностью выхлопа и улучшенными энергетическими показателями. Отчет ИГД им. А.А. Скочинского. – М., 1977. – С. 1–15.

14. *Степаненко В. П.*, *Юдин Ю. П.* Разработка методики расчета энергетических и весогабаритных показателей рудничных локомотивов с уменьшенной токсичностью выхлопа и Информационная карта № 15/38 (1978). – М.: ЦНИЭИуголь, 1978. – С. 1.

15. *Водородная* энергетика имеет в Якутии больший потенциал, чем солнечная. ПАО «Якутэнерго». Региональный центр биотехнологий. Республика Саха Якутия. 2016. http://greenevolution.ru/

16. *Коровин Н. В.* Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. – М.: Издательство МЭИ, 2005.

17. *Твердооксидные* топливные элементы. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 3, pp. 217–227.

UDC 620.92

V.P. Stepanenko

SELECTING ENERGY STORAGE UNITS FOR ISOLATED ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

One the major trends in the area of electric power systems is actually an increase in the share of renewable energy sources in the global energy balance. Renewable energy sources are volatile as they depend on a season and weather. Sustained power supply is possible with electrochemical storage units, electric batteries and fuel cells. This article discusses applicability of lithium-ion, lithium-iron-phosphate, nickel-iron, nickel-cadmium, lead-acid and hydrogen fuel cells.

Key words: energy, renewable energy sources, isolated electric power systems, electric batteries, lithium-ion, iron-phosphate, nickel-iron, lead-acid and hydrogen fuel cells.

AUTHOR

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

REFERENCES

1. Sokol'nikova T.V., Suslov K.V., Lombardi Pio. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no 10, pp. 206–2011.

2. *Vodorodnaya energetika v Rossii*. http://ru.wikipedia/org/wikil

3. Maksimenko T. *Vodorodnaya energetika. Shkola Zhizni*. http://shkolazhizni.ru.world/articles/

4. *Gibridnye energosistemy s ispol'zovaniem sistem nakopleniya energii SNE sovremennyy podkhod k organizatsii avtonomnoy energetiki*. http://enerz.ru./novosti/id8/

5. Belyaeva O. *Energeticheskaya strategiya Rossii do 2030 goda*. http://radiovesti. ru/show/article_id/52999

6. *Arktika perspektivna dlya razvitiya prakticheski vsekh vidov energetiki, ispol'zuyushchey vozobnovlyaemye resursy. Zasedanie Gosudarstvennoy komissii po voprosam razvitii Arktiki*. Novosibirsk. 09.06.2016. http://artic.gov.ru/News/

7. Maksimenko T. *Kak postavit' vodorod Chernogo morya na sluzhbu lyudyam? Shkola Zhizni*. http://shkolazhizni.ru.world/articles/13133/.

8. Kasatkin M.A. *Rossiya postepenno podtyagivaetsya k stranam s naibolee razvitoy vodorodnoy energetikoy*. http://regnum.ru/news/innovation/1941837.html

9. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 8, pp. 166–174.

10. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 8, pp. 175–182.

11. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9, pp. 138–146.

12. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 10, pp. 93–104.

13. Stepanenko V.P., Yudin Yu.P. *Razrabotka metodiki rascheta energeticheskikh i vesogabaritnykh pokazateley rudnichnykh lokomotivov s umen'shennoy toksichnost'yu vykhlopa i uluchshennymi energeticheskimi pokazatelyami. Otchet IGD im. A.A. Skochinskogo* (Design procedure for energy, weight and size of mine locomotives with reduced engine emission toxicity and improved energy data. Skochinsky Institute of Mining Report), Moscow, 1977, pp. 1–15.

14. Stepanenko V.P., Yudin Yu.P. *Razrabotka metodiki rascheta energeticheskikh i vesogabaritnykh pokazateley rudnichnykh lokomotivov s umen'shennoy toksichnost'yu vykhlopa i Informatsionnaya karta № 15/38 (1978)* (Design procedure for energy, weight and size of mine locomotives with reduced engine emission toxicity. Information card No. 15/38 (1978)), Moscow, TsNIEIugol', 1978, pp. 1.

15. *Vodorodnaya energetika imeet v Yakutii bol'shiy potentsial, chem solnechnaya. PAO «Yakutenergo»*. Regional'nyy tsentr biotekhnologiy. Respublika Sakha Yakutiya. 2016. http://greenevolution.ru/

16. Korovin N.V. *Toplivnye elementy i elektrokhimicheskie energoustanovki* (Fuel elements and electrochemical installations), Moscow, Izdatel'stvo MEI, 2005.

17. *Tverdooksidnye toplivnye elementy* (Solid oxide fuel cells), Snezhinsk, Izd-vo RFYaTs-VNIITF, 2003.