

В.П. Степаненко

ВЫБОР НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Системы электроснабжения, удаленные от высоковольтных электрических сетей, в основном, питаются от автономных электростанций с двумя поочередно работающими дизель-генераторными установками. Рассмотрены пути снижения расхода дизельного топлива на автономных электростанциях. В состав автономной энергосистемы предлагается включать возобновляемые источники и гибридные накопители энергии. В качестве источников энергии использовать ветряные генераторы, солнечные батареи, водородное топливо, в качестве накопителей – аккумуляторные батареи ЭХН и суперконденсаторы КДЭС. Использование возобновляемых источников и гибридных накопителей энергии позволит снизить эксплуатационные расходы не менее, чем на 30–60%, капитальные затраты на 10–40%, стоимость 1 кВтч электроэнергии – на 60–80%. Ключевые слова: водородное топливо, электроснабжение, возобновляемые источники, энергия, дизельное топливо, гибридные накопители, электроэнергия, суперконденсаторы, топливные элементы, капитальные затраты.

Предприятия и населенные пункты с каждым годом осваивают новые территории, находящиеся в отдалении от традиционных источников энергии. Для строящихся 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. 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 современных накопителей и возобновляемых источников энергии.

Накопители энергии необходимы для обеспечения автономного питания потребителей в рабочих и аварийных режимах, для сглаживания пиков нагрузки и провалов напряжения в электрических сетях [1–12].

В табл. 1 представлены перспективные типы и параметры накопителей энергии и водородных топливных элементов, а также их места размещения. В качестве накопителей возможно использование сверхпроводящих индукционных накопителей (СПИН), инерционных накопителей (ИНЭ), электрохимических накопителей (аккумуляторов ЭХН), конденсаторов с двойным электрическим слоем КДЭС (суперконденсаторов), топливных элементов ТЭ.

Все накопители энергии, представленные в табл. 1, обладают как достоинствами, так и недостатками, имеют свои области эффективного применения. Наибольшей запасаемой энергией обладают СПИН накопители (более 10 ГДж). Запас энергии в инерционных накопителях ИНЭ до 100–150 МДж, КПД 86–90% [7–12]. Энергия, отдаваемая аккумуляторными батареями ЭХН, очень сильно зависит от температуры окружающей среды и величины отношения разрядного тока к номинальному. При возрастании отношения разрядного тока ЭХН (аккумуляторной батареи) I_p к номинальному $I_{\text{н}}$ 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 значения отдаваемой при разряде

Таблица 1

Тип, энергоёмкость и места размещения накопителей энергии

Типы накопителей энергии	Место размещения, энергоёмкость накопителя и мощность топливных элементов			
	районные подстанции	электрические подстанции	электрические сети	передвижные и накопительные подстанции
Сверхпроводящие индуктивные СПИН	≤10 ГДж	–	–	–
Инерционные ИН	–	≤100–200 МДж	–	≤7–10 МДж
Суперконденсаторные КДЭС	–	≤100 МДж	≥50 МДж	≤5–50 МДж
Аккумуляторные батареи ЭХН	–	–	–	≤2900 МДж
Комбинированные КДЭС+ ЭХН	–	–	–	≤3000 МДж
Водородные топливные элементы	≤250 кВт	≤150 кВт	≤50 кВт	≤0,5 кВт

энергии справедливы при температурах окружающего воздуха от + 15 °С до + 35 °С. При температуре ниже +15 °С отдаваемая ЭХН энергия резко падает и при температуре ниже минус 25 °С КПД разряда не превышает 5–10%. При температуре выше плюс 55 °С ЭХН вообще не принимают заряд.

Основного недостатка ЭХН лишены суперконденсаторы КДЭС и топливные элементы ТЭ. При пиковых скачках тока и отрицательных температурах КПД и отдаваемая КДЭС энергия изменяются незначительно.

Одиночные суперконденсаторные накопители КДЭС целесообразно использовать для поддержания стабильного напряжения в системах электроснабжения, для сглаживания в них пиков и провалов нагрузки, для приема тормозной энергии.

Большую удельную мощность КДЭС с большой удельной энергоемкостью ЭХН при необходимости можно легко объединить в одном гибридном накопителе КДЭС+ ЭХН. В гибридных накопителях величина энергоемкости КДЭС обычно принимается не более 2–3% от энергоемкости ЭХН. Гибридные накопители могут найти широкое применение в системах автономного электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии ВИЭ.

Мощность электростанций для питания жилых домов и поселков колеблется от 0,6 кВт до 30 кВт, запас накопителей энергии ЭХН равен 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 ветряные генераторы. При частом изменении направления ветра рекомендуется установка вертикальных ветряных генераторов, которые в 2–3 раза дороже горизонтальных.

Ночью в безветренную погоду электрическая энергия может поступать из аккумуляторной батареи ЭХН, что уменьшает расход дизельного топлива. При неработающем дизельном двигателе аккумуляторная батарея может заряжаться от ветряного генератора или от солнечной батареи. По сравнению с использованием двух дизельных генераторов в такой системе автономного электроснабжения расход дизельного топлива снижается на 95–70% [1–6].

В автономных энергетических системах в качестве возобновляемого источника энергии ВИЭ, кроме ЭХН, КДЭС, вет-

Таблица 2

Водородные топливные элементы

Тип установки	Мощность
Стационарные	от 5 до 250 кВт и выше
Транспортные	25–150 кВт
Портативные мощные	1–50 кВт
Портативные маломощные	1–500 Вт

ряных генераторов, солнечных панелей и солнечных вакуумных коллекторов могут использоваться водородные топливные элементы ТЭ (см. табл. 2). ТЭ и воздушно-алюминиевые электрохимические генераторы осуществляют превращение химической энергии топлива в электрическую энергию.

В табл. 3 указаны типы водородных топливных элементов. Наиболее перспективными представляются низкотемпературные топливные элементы: мембранный PEM и метаноловый DMFC. Топливный элемент PEM имеет протонно-обменную мембрану, метаноловый DMFC – полимерную мембрану. Рабочие температуры топливных элементов: 60 °С для метанолового и 80 °С для мембранного.

В табл. 4 приведены результаты технико-экономического сравнения различных источников энергии.

Из анализа табл. 4 следует, что наибольшие капитальные и эксплуатационные затраты и наихудшие технико-экономические показатели присущи дизель-генераторным электрическим станциям. Наименьшую стоимость электроэнергии и низкие

Таблица 3

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

Таблица 4

Технико-экономическое сравнение источников энергии

№ пп	Источник энергии	Относительные затраты			Стоимость 1 кВтч энергии
		капи- тальные	эксплуатационные		
			за 10 лет	за 20 лет	
1	Дизельное топливо	1,0	1,0	1,0	1,0
2	Электрические сети	0,13	0,75	0,63	0,95
3	Водородное топливо	0,9	0,7	0,6	0,4
4	Ветряные генераторы	07	0,6	0,5	0,25
5	Солнечные вакуум- ные коллекторы	0,8	0,5	0,43	0,32
6	Солнечные панели	0,6	0,4	0,3	0,2

эксплуатационные затраты обеспечивают ветряные генераторы и солнечные панели. Вакуумные солнечные коллекторы характеризуются большими материалоемкостью и капиталовложениями по сравнению с традиционными электрическими сетями. Эксплуатационные затраты при использовании солнечных вакуумных коллекторов примерно в два раза ниже, чем при питании от дизель-электрических генераторов. Стоимость 1 кВтч электроэнергии, полученной от ветряных генераторов в 4 раз ниже, чем от дизель-генераторов. Стоимость 1 кВтч энергии солнечных вакуумных коллекторов примерно в 3 раза ниже, чем при питании от электрических сетей и от дизель-генераторных установок. Электрическая энергия солнечных панелей в 4 раза дешевле, чем традиционных электрических сетей. Расчеты показывают, что использование возобновляемых источников энергии и гибридных накопителей, состоящих из КДЭС и ЭХН, позволит снизить расход дизельного топлива и смазочных материалов не менее, чем на 30–50%.

Выводы

1. В статье рассмотрены перспективы применения гибридных накопителей, возобновляемых источников энергии и водородных топливных элементов .

2. Использование возобновляемых источников и гибридных накопителей энергии позволит снизить эксплуатационные расходы не менее, чем на 30–60%, капитальные затраты на 10–40%, стоимость 1 кВтч электроэнергии – на 60–80%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степаненко В. П.* Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 166–174.
2. *Степаненко В. П.* Применение возобновляемых источников энергии и суперконденсаторов на открытых горных работах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 175–182.
3. *Степаненко В. П.* Повышение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – вип. 42. – С. 20–25.
4. *Степаненко В. П.* Пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 128–137.
5. *Степаненко В. П.* Применение в горной промышленности КЭСУ с возобновляемыми источниками и накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 138–146.
6. *Степаненко В. П.* Перспективы применения в горной промышленности нетрадиционных возобновляемых источников и комбинированных накопителей энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 10. – С. 93–146.
7. *Степаненко В. П.* Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 11. – С. 322–328.
8. *Степаненко В. П., Сорин Л. Н.* Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 6. – С. 135–140.
9. *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.
10. *Степаненко В. П., Белозеров В. И.* Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 174–181.
11. *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.
12. *Белозеров В. И., Степаненко В. П.* Потребность создания карьерных локомотивов с накоплением энергии // Горная промышленность. – 2014. – № 5. – С. 76. **ИИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

SELECTION OF ENERGY STORAGE UNITS

Electric power systems located far from high-voltage electric mains are mainly supplied by stand-alone power plants with two alternate Diesel-generator sets. The article gives the analysis of feasible reduction in diesel fuel consumption by stand-alone power plants. It is proposed to add self-sufficient power systems with renewable energy sources and hybrid energy storage units. The energy sources may be windmills, solar batteries and hydrogen fuel; the energy storage units—accumulator batteries of electrochemical storage units and supercapacitors KDES. The application of renewable energy sources and hybrid energy storage units will enable cutting down operating costs not less than by 30–60%, capital costs—by 10–40% and cost per 1 kWh of electric energy—by 60–80%.

Key words: hydrogen fuel, power supply, renewable energy sources, energy, diesel fuel, hybrid energy storage units, electric energy, supercapacitors, fuel cells, capital costs.

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. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 8, pp. 166–174.
2. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 8, pp. 175–182.
3. Stepanenko V.P. *Visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu*. 2016, no 42, pp. 20–25.
4. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9, pp. 128–137.
5. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 9, pp. 138–146.
6. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 10, pp. 93–146.
7. Stepanenko V.P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 11, pp. 322–328.
8. Stepanenko V.P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 6, pp. 135–140.
9. Stepanenko V.P., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 323–328.
10. Stepanenko V.P., Belozеров V.I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 2, pp. 174–181.
11. Stepanenko V.P., Belozеров V.I., Sorin L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 5, pp. 317–322.
12. Belozеров V.I., Stepanenko V.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2014, no 5, pp. 76.

