5. Kechiev L.N., Pozhidaev E.D. Protection of electronic devices from static electricity. Moscow: Group IDT. 2008. 352 p. (In Russian).
6. Titova A.S. Lightning protection device. *Modern scientific research and innovation.* 2018. No. 11, pp. 5. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ALISOVA Ekaterina Petrovna – 1st year Graduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: katerina_petrovna2014@mail.ru
LEBEDEV Viktor Vitalievich – 1st year Graduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shnuagele@mail.ru
KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Alisova E.P., Lebedev V.V., Krupnov A.V. Stages of building a lightning protection system and modeling a protection system against direct lightning strikes // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 2 (14), pp. 40–46.

УДК 621.3:681.11.031.1

КРАТКИЙ ОБЗОР ХАРАКТЕРИСТИК И СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

М.А. Колесова, А.В. Крупнов
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Колесова М.А., Крупнов А.В., 2022

Аннотация. В статье представлен краткий обзор основных накопителей электрической энергии, а также дана сравнительная характеристика известных на сегодняшний день накопителей электроэнергии с точки зрения их перспективного использования в системах электроснабжения.

Ключевые слова: накопители электрической энергии, электроэнергетика, энергосистема, гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС), супермаховик, суперконденсатор, сверхпроводниковый накопитель электрической энергии, батарея.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-2-46-56

ВВЕДЕНИЕ

Нестабильность работы энергосистемы России является актуальной проблемой электроэнергетики, преодоление которой требует своевременных решений. Применение систем накопления электрической энергии (СНЭ) поможет решить ряд задач, таких как выравнивание графиков электрических нагрузок, отклонение частоты, провал напряжения, потери в электрических сетях, которые остро влияют на работу энергосистемы в целом.

В зависимости от формы хранения электрической энергии системы накопления подразделяются на химические, электрические, магнитные и механические (рис. 1). Аккумуляторы и топливные элементы (FC) попадают в химические системы, в то время как электромагнитные системы включают в себя суперконденсаторы и сверхпроводники. Механические системы можно разделить на накопители кинетической энергии, к которым относятся супермаховики, и накопители потенциальной энергии, включающие в себя системы гидронасоса и сжатого воздуха. Рассмотрим некоторые из них (рис. 1).

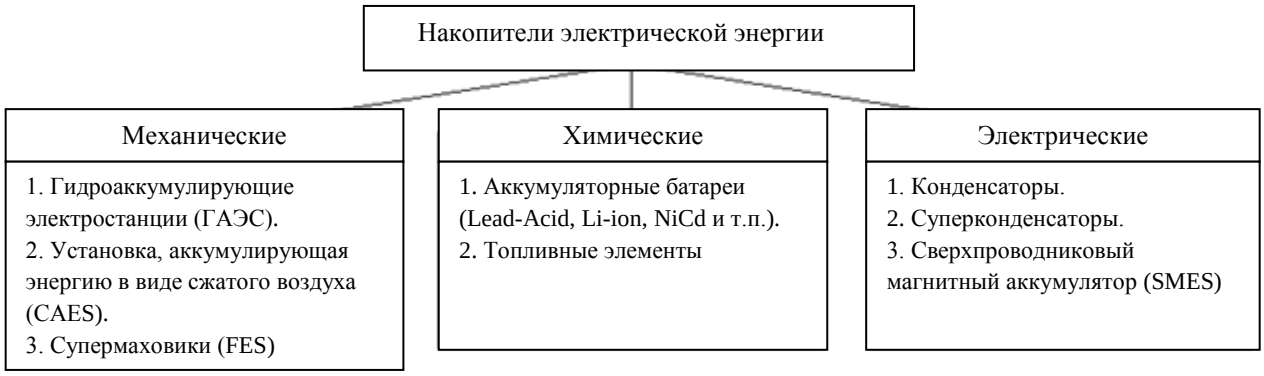

Рис. 1. Классификация накопителей электрической энергии

МЕХАНИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС) в настоящее время является единственной проверенной и наиболее широко применяемой технологией для крупномасштабного (>100 МВт) хранения энергии. Она предполагает длительный срок службы в диапазоне 30–50 лет, низкие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание. КПД ГАЭС составляет в среднем 80 % из-за изменения высоты и потерь на конверсию [1]. Данная технология обеспечивает наибольшую пропускную способность из всех современных технологий накопления, поскольку единственным ограничителем здесь является размер верхнего резервуара. Однако при этом требуются особые условия при строительстве, наиболее важными из которых являются наличие перепада высот и наличие обширного места для водохранилищ. Главная особенность ГАЭС состоит в том, что она работает на возобновляемом энергоресурсе, использование которого не истощает топливных запасов Земли. Существенно и то обстоятельство, что на ГАЭС отсутствуют вредные выбросы в атмосферу, воду, почву [2].

К механическим СНЭ относится также воздушно-аккумулирующая электростанция (CAES). Преимущества данной системы заключаются практически в неограниченном количестве хранимой энергии и в относительно низкой стоимости сооружения такой установки. В настоящее время существуют только две действующие системы первого поколения – в Германии (построена в 1978 году) и Алабаме (построена в 1991 году).

Система CAES наиболее эффективна в странах с низкой температурой в зимнее время, т.е. в период максимального расходования электроэнергии.

Однако традиционные системы CAES первого поколения демонстрируют низкую эффективность в диапазоне 42–54 % из-за больших потерь тепла в атмосферу при сжатии и повышенных требований к тепловой энергии, предъявляемых при охлаждении турбины декомпрессированным воздухом [3]. Для решения этих проблем, снижающих общую эффективность традиционных систем, были разработаны усовершенствованные адиабатические и изотермические системы CAES. Системы CAES второго поколения используют тепло, выделяемое в процессе сжатия, которое передается и хранится в тепловых хранилищах.

Усовершенствованные адиабатические CAES (AA-CAES), как правило, потребляют мало либо вообще не потребляют топливо или внешнюю энергию для нагрева воздуха во время расширения, тем самым повышая общую эффективность до 70 % и исключая сопутствующие выбросы. Изотермический CAES включает в себя отвод тепла, получаемого при сжатии, для поддержания постоянной температуры и, таким образом, позволяет избежать затрат на создание теплового хранилища. Соответственно, варианты CAES без необходимости в термальных подземных хранилищах могут быть построены в меньшем масштабе. Маломасштабные CAES (SS-CAES) вызывают особый интерес в промышленной области для обеспечения бесперебойного и резервного питания.

Другой механической СНЭ является супермаховик. Супермаховик (FES) – это маховик высокой удельной энергоемкости. Маховики обладают способностью обеспечивать как высокую энергию, так и высокую плотность мощности при кратковременных разрядах. Высокая эффективность в диапазоне 90–95 % также может быть достигнута за счет использования вакуумного насоса, постоянных и магнитных подшипников, которые необходимы для преодоления сил трения во время работы. Дополнительные преимущества (по сравнению с другими системами FES) включают в себя нечувствительность к условиям окружающей среды и отсутствие производства опасных химических веществ. Однако технология является очень дорогостоящей, так как для хранения энергии в электроэнергетической системе необходимы маховики большой мощности, что приводит к увеличению потерь на трение и снижению эффективности. По мнению некоторых исследователей, очевидно, что длительное хранение устройств этого типа невозможно, поэтому маховики используются в качестве дополнения к батареям в системах бесперебойного питания.

ХИМИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аккумуляторная батарея – это устройство, которое накапливает энергию в химической форме при подключении к источнику постоянного тока. Самый старый тип аккумуляторных батарей, свинцово-кислотный, широко используется в транспортных средствах для запуска двигателей и множества других объектов. Он считается одним из наиболее подходящих для стационарного применения, так как может обеспечивать отличную импульсную мощность. В заряженном состоянии батарея состоит из свинца (Pb) и оксида свинца (PbO_2), находящихся в 37%-й серной кислоте (H_2SO_4), тогда как в разряженном состоянии сульфат свинца ($PbSO_4$) образуется как на аноде, так и на катоде, в то время как электролит превращается в воду. Номинальное напряжение свинцово-кислотного элемента составляет 2 В, диапазон рабочих температур от –5 до 40 °C. Хотя свинцово-кислотная технология является достаточно старой, она имеет низкую стоимость.

Свинец и серная кислота токсичны, а срок службы последней относительно ограничен. Кроме того, аккумуляторы затопленного типа требуют периодического обслуживания водой и занимают большую площадь из-за их низкой удельной энергии (25 Вт·ч/кг) и глубины разряда (70 %), поэтому они считаются неблагоприятными для крупномасштабного применения.

Благодаря изобретению свинцово-кислотных батарей с регулируемым клапаном (VRLA), батареи мощностью до 36 МВт уже используются для производства электроэнергии из возобновляемых источников энергии, поскольку они достигают более высокой удельной энергии (30–50 Вт·ч/кг) и глубины разряда (80 %) при незначительных требованиях к техническому обслуживанию. Как в портативных, так и в стационарных устройствах используются также никель-кадмиевые батареи, имеющие значительные преимущества по сравнению со свинцово-кислотными – более высокую удельную энергию (60 Вт·ч/кг), более длительный срок службы (1 500–3 000 циклов «заряд – разряд») и более низкие требования к обслуживанию, но при более высоких производственных затратах.

Другой химической СНЭ являются FC. Топливный элемент – это электрохимическое устройство, преобразующее химическую энергию топлива в электрическую энергию прямым методом. В качестве основного топлива используется водород. Основным преимуществом FC является их способность преобразовывать химическую энергию непосредственно в электричество, т.е. без использования каких-либо промежуточных энергоемких этапов и шумных движущихся частей.

Регенеративные FC – это устройства, которые объединяют функции FC и электролизера в одном устройстве. Хотя все FC могут работать как регенеративные, они обычно оптимизированы для выполнения только одной функции.

Регенеративные FC можно охарактеризовать как долговременные устройства накопления электрической энергии. Они обеспечивают самую высокую удельную энергию, приходящуюся максимум на 1 200 Вт/кг, и превосходную циклическую производительность в 20 000 циклов. Их ежедневный саморазряд оценивается в 3 %, глубина разряда составляет 90 %, а общая эффективность находится в диапазоне значений 20–50 % (так как электролиз является самым слабым звеном в цепи). Помимо их применения в транспортном секторе, где они являются потенциальной заменой ископаемого топлива для транспортных средств, такие устройства накопления электрической энергии перспективны с точки зрения обеспечения как стационарной, так и распределенной мощности.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Суперконденсаторы (также называемые ультраконденсаторами, электрохимическими конденсаторами, ионисторами или электрическими двухслойными конденсаторами) – это устройства для хранения энергии со специальными функциями, переходные между обычными конденсаторами и батареями. Суперконденсаторы идеально накапливают электрическую энергию в электростатическом поле электрохимического двойного слоя, поэтому могут циклически работать миллионы раз и имеют гораздо больший срок службы по сравнению с батареями [4]. Они достигают более высокой плотности мощности, чем батареи, из-за короткого времени заряда, но обеспечивают более низкую плотность энергии из-за ограниченной площади поверхности электрода. Кроме того, суперконденсаторы демонстрируют очень высокую эффективность (до 95 %) благодаря низкому

сопротивлению, что приводит к снижению потери энергии. Они могут заряжаться и разряжаться быстрее, чем аккумуляторные батареи, из-за ускоренного переноса ионов в растворе к поверхности электрода. Несмотря на то что суперконденсаторы подвержены саморазряду и в настоящее время применяются в портативной электронике и автомобильной промышленности, они могут также использоваться в электрических или гибридных транспортных средствах для обеспечения пиковой (импульсной) мощности, необходимой во время пуска и ускорения. В последние годы батареи суперконденсаторов используются в энергетических установках для компенсации провала напряжения и хранения энергии.

Существует еще одна электрическая СНЭ – сверхпроводниковый индукционный накопитель (SMES). Это крупномасштабный энергонакопитель, который может хранить энергию в диапазоне от 10 до 100 МВт. Он накапливает энергию в виде постоянного электрического тока, проходящего через индуктор (катушку). Как правило, электрическая энергия накапливается в магнитном поле, создаваемом потоком выпрямленного тока в катушке, изготовленной из ниобий-титановых (NbTi) кабелей со сверхнизким сопротивлением. Для поддержания сверхпроводящего состояния устройство должно быть охлаждено до –264 °С (9,2 К), что позволяет постоянному току протекать через индуктор с наименьшим сопротивлением. Благодаря почти нулевому сопротивлению сверхпроводники обеспечивают высокую эффективность хранения (до 98 %), что обеспечивает совсем незначительные потери энергии и более быструю реакцию по сравнению с другими системами хранения энергии. Более того, эти устройства могут работать практически бесконечно и способны разряжать почти всю накопленную энергию за 1,2 с. Основными недостатками низкотемпературных сверхпроводящих катушек являются высокая стоимость сверхпроводящего провода и повышенные энергозатраты на охлаждение. В связи с этим они используются для кратковременного хранения энергии с целью повышения качества работы энергосистемы.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В таблице представлены основные технические характеристики и капитальные затраты на СНЭ.

Технические характеристики и капитальные затраты на СНЭ

Система	Мощ-ность	КПД, %	Время разряда	Самораз-ряд в день	Плотность энергии, Вт/кг	Срок службы, лет	Жизнен-ный цикл	Капиталь-ные за-траты, $ / кВт·ч
Механические СНЭ								
ГАЭС	100–5 000 МВт	70–85	От 1 до 24 ч и более	Очень низкий	0,5–1,5	40–60	–	5–100
CAES	5–300 МВт	68–80		Низкий	30–60	20–40	–	2–50
FES	0–250 кВт	90–95	От милли-секунд до 15 мин	100 %	10–30	До 15	20 000+	1 000–5 000

Продолжение таблицы

Система	Мощ-ность	КПД, %	Время разряда	Самораз-ряд в день	Плотность энергии, Вт/кг	Срок службы, лет	Жизнен-ный цикл	Капиталь-ные за-траты, $ / кВт·ч
Химические СНЭ								
VRLA	0–20 МВт	68–80	От 1 с до не-сколь-ких часов	0,1–0,3 %	30–50	5–15	200–1 000	200–400
NiCd	0–40 МВт	60–70		0,1–0,6 %	50–75	10–20	2 000–2 500	800–1 500
NaS	50 кВт–8 МВт	72–90		До 20 %	150–240	10–15	2 500	300–500
ZEBRA (хлорид никеля, хлорид натрия)	0–300 кВт	85–90		До 15 %	100–120	10–14	2 500+	100–200
FC	0–50 МВт	20–50	От 1 с до 24 ч и бо-лее	Почти нет	800–10 000	5–15	1 000+	600–2 500
Металло-воздушные батареи	0–10 кВт	30–50		Очень низкий	150–3 000	–	100–300	10–60
Li-ion	0–100 кВт	90–97	От 1 мин до несколь-ких часов	0,1–0,3 %	75–200	5–15	1 000–10 000+	600–2 500
VRB	30 кВт–3МВт	73–83	От 1 с до 10 ч	Низкий	10–30	5–10	12 000+	150–1 000
ZnBr	50 кВт–2 МВт	68–75			30–50	5–10	2 000+	150–1 000
PSB	1–15 МВт	60–75			–	10–15	–	150–1 000
Солнечное топливо	0–10 МВт	20–30	От 1 до 24 ч	Почти нет	800–100 000	–	–	–
Электрические СНЭ								
SMES	100 кВт–10 МВт	95–98	От милли-секунд до 8 с	10–15 %	0,5–5	20+	100 000+	1 000–10 000
Конден-сатор	0–50 кВт	60–70	От милли-секунд до 1 ч	40 %	0,05–5	До 5	50 000+	500–1 000
Суперкон-денсатор	0–300 кВт	90–97		20–40 %	2,5–15	20+	10 000+	300–2 000

Окончание таблицы

Система	Мощность	КПД, %	Время разряда	Саморазряд в день	Плотность энергии, Вт/кг	Срок службы, лет	Жизненный цикл	Капитальные затраты, $ / кВт·ч
Тепловые СНЭ								
Низкотемпературные	0–5 МВт	40–60	От 1 до 8 ч	0,5 %	80–120	10–20	–	20–50
Криогенные (CES)	100 кВт–300 МВт	40–50		0,5–1,0 %	150–250	20–40	–	3–30
Высокотемпературные	0–60 МВт	30–60	От 1 до 24 ч и более	0,05–1,0 %	80–200	5–15	–	30–60

Сравнивая вышеприведенные данные по номинальной мощности различных СНЭ, можно сгруппировать системы накопления для различных областей применения. Гидроаккумулирующие электростанции, пневматические системы (CAES) и криогенные накопители подходят для применения в масштабах свыше 100 МВт с длительностью от 1 до 24 ч. Их можно использовать для крупномасштабного управления энергопотреблением – выравнивания графика нагрузки, увеличения/уменьшения нагрузки и резерва мощности. Крупномасштабные батареи, проточные батареи, FC, солнечное топливо, CES- и тепловые накопители энергии подходят для управления энергией среднего масштаба мощностью 10–100 МВт. Батареи, SMES, конденсаторы и суперконденсаторы имеют высокий показатель реакции (миллисекунды), следовательно, могут быть использованы для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии, таких как провал напряжения, уменьшение колебания напряжения и мерцания, а также могут выступать кратковременными источниками бесперебойного питания. Типичная номинальная мощность для такого рода систем составляет менее 1 МВт [5].

Из приведенных выше табличных данных видно, что ГАЭС, CAES, FC, металловоздушные элементы, солнечное топливо и проточные батареи имеют очень малую степень саморазряда, поэтому подходят для длительного хранения. Срок свинцово-кислотного, NiCd, литий-ионного, теплового накопителей и CES, имеющих средний коэффициент саморазряда, ограничен десятками дней. Маховики, ZEBRA, SMES, конденсатор и суперконденсатор характеризуются очень высоким коэффициентом самозаряда – 10–40 % в день. Они могут быть реализованы только в течение коротких циклических периодов, максимум на несколько часов. Маховики будут разряжать 100 % накопленной энергии в течение дня.

Капитальные затраты при этом указаны с точки зрения затрат на выработку полезной мощности, поэтому их можно разделить по эффективности хранения. Самые низкие капитальные затраты идут на свинцово-кислотные батареи, но данная система по-прежнему остается дорогостоящей для управления энергопотреблением из-за ее относительно короткого срока службы и требует обслуживания. CAES, металлическая воздушная батарея, ГАЭС, тепловые СНЭ и CES находятся в низком диапазоне с точки зрения капитальных затрат на киловатт в час. Металлические воздушные батареи могут показаться лучшим выбором из-за их высокой плотности энергии и низкой стоимости, но они имеют весьма ограниченный жизненный цикл и все еще находятся на стадии разработки.

В сравнении с другими разработанными системами CAES имеют относительно низкие капитальные затраты. Капитальные затраты на батареи немного выше, чем затраты на безубыточные ГАЭС, хотя разрыв постепенно сокращается. SMES, маховики, конденсаторы и суперконденсаторы подходят для применения в системах с высокой мощностью и малой продолжительностью хранения, так как они относительно дешевые по выходной мощности, но дорогие с точки зрения емкости накопителя энергии. Топливные элементы имеют самую высокую стоимость за цикл, и им потребуется большой период окупаемости, чтобы стать экономически конкурентоспособными. Батареи на солнечном топливе находятся на ранней стадии разработки, поэтому данные о жизненном цикле, сроке службы и стоимости не указаны.

Следует также отметить, что капитальные затраты на системы хранения энергии могут существенно отличаться от приведенных выше оценок (например, из-за прорывов в технологиях, времени строительства, расположения установок и размера системы). Обобщенные данные следует рассматривать только как предварительные.

Наиболее технологически зрелыми системами накопления на сегодняшний день по-прежнему остаются ГАЭС и свинцово-кислотные батареи, используемые уже более ста лет (рис. 2). Системы CAES, различные батареи, SMES, маховики, конденсаторы, суперконденсаторы, низко- и высокотемпературные накопители электрической энергии – это технически разработанные и коммерчески доступные технологии. Их конкурентоспособность и надежность все еще нуждаются в дополнительных испытаниях в электроэнергетической отрасли и на рынке. Развивающимися технологиями являются FC, металловоздушная батарея и солнечное топливо, которые находятся на стадии разработки [6].

Из представленной на рис. 2 [6] траектории развития технологий следует, что очередной технологией, которая в ближайшее время будет готова к широкому применению, станут проточные накопители, высокоскоростные маховики и суперконденсаторы.

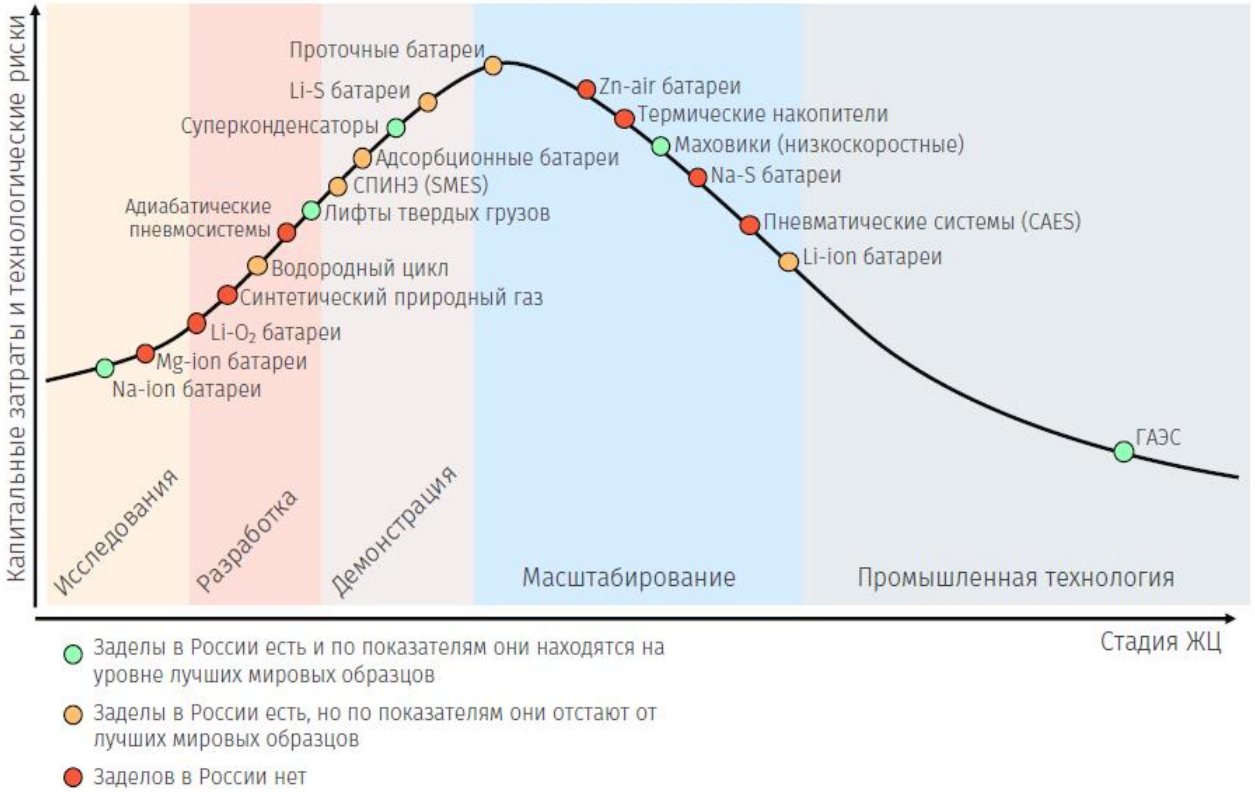

Рис. 2. Кривая зрелости отраслевых технологий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного сравнения можно сделать вывод о том, что СНЭ необходимы для современной отрасли производства и распределения электроэнергии. Технологии СНЭ обеспечивают функции управления энергопотреблением – выравнивание нагрузки, управление качеством электроэнергии, а также повышают надежность энергоснабжения. Основываясь на текущем уровне развития СНЭ, можно предположить, что показатель хранения энергии увеличится на 10–15 % (в настоящее время он составляет 3 %). На сегодняшний день доминирующей СНЭ остается ГАЭС. Ожидается, что CAES получит быстрое коммерческое развитие, особенно в странах с благоприятной геологией. Крупномасштабные батареи, такие как свинцово-кислотные, NiCd и Li-ion, будут постепенно внедряться для управления энергопотреблением с уменьшением затрат и увеличением срока службы. Батареи среднего масштаба (NaS и хлоридно-натриевые, никель-хлоридные), а также низкотемпературные накопители тепловой энергии могут найти применение в системах электроснабжения городов и промышленных предприятий. Ожидается дальнейшее развитие коммерчески доступных систем – SMES, супермаховиков и суперконденсаторов с высокой производительностью. Новые технологии, такие, например, как солнечное топливо, CES и металловоздушные батареи, привлекают все больше внимания исследователей благодаря низкому воздействию на окружающую среду и очень высокой плотности запасаемой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikolaidis P., Poullikkas A. Сравнительный обзор систем хранения электрической энергии для повышения устойчивости // Журнал энергетических технологий. 2017. URL: https://www.academia.edu/35017143/Journal_of_Power_Technologies_97_3_2017_220_245_A_comparative_review_of_electrical_energy_storage_systems_for_better_sustainability (дата обращения: 15.09.2021).
2. Производство электроэнергии на электрических станциях ГАЭС. URL: https://studfile.net/preview/6847543/ (дата обращения: 15.09.2021).
3. Poullikkas A. Сравнительный обзор крупномасштабных аккумуляторных систем для хранения электроэнергии. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/258022527_A_comparative_overview_of_large-scale_battery_systems_for_electricity_storage (дата обращения: 20.09.2021).
4. Ud din Mufti M., Lone S.A., Iqbal S.J., Ahmad M., Ismail M. Система накопления энергии на основе суперконденсатора для улучшенной регулировки частоты нагрузки. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/223540019_Super-capacitor_based_energy_storage_system_for_improved_load_frequency_control (дата обращения: 18.09.2021).
5. Chen H., Yang W. Прогресс в системах хранения электрической энергии: краткий обзор. 2009. URL: https: //www.researchgate.net/publication/220037284_Progress_in_electrical_energy_storage_systems_a_critical_review_Prog_Nat_Sci (дата обращения: 20.09.2021).
6. Абрамов А.Ю. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры. 2019. URL: https://www.eprussia.ru/upload/iblock/1b8/1b83729ddd27beaeb629e380293a4585.pdf (дата обращения: 20.09.2021).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛЕСОВА Марина Андреевна – студентка 2-го курса магистратуры кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: marina.kolesova69@yandex.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Колесова М.А., Крупнов А.В. Краткий обзор характеристик и сравнение параметров накопителей электрической энергии // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 2 (14). С. 46–56.

A BRIEF OVERVIEW OF THE CHARACTERISTICS AND COMPARISON OF PARAMETERS OF ELECTRIC ENERGY STORAGE SYSTEMS

M.A. Kolesova, A.V. Krupnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article provides a brief overview of the main electric energy storage devices, as well as a comparative characteristic of the currently known electric power storage devices from the point of view of their prospective use in power supply systems.

Keywords: electric energy storage, electric power industry, power system, pumped hydroelectric energy storage (PHES), super-flywheel, ultracapacitor, superconducting magnetic energy storage, battery.

REFERENCES

1. Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability // Journal of Power Technologies. 2017. URL: https://www.academia.edu/35017143/Journal_of_Power_Technologies_97_3_2017_220_245_A_comparative_review_of_electrical_energy_storage_systems_for_better_sustainability (date of access: 15.09.2021).
2. Production of electricity at the power stations of the PSPP. URL: https://studfile.net/preview/6847543 / (date of access: 15.09.2021). (In Russian).
3. Poullikkas A. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/258022527_A_comparative_overview_of_large-scale_battery_systems_for_electricity_storage (date of access: 20.09.2021).
4. Ud din Mufti M., Lone S.A., Iqbal S.J., Ahmad M., Ismail M. Super-capacitor based energy storage system for improved load frequency control. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/223540019_Super-capacitor_based_energy_storage_system_for_improved_load_frequency_control (date of access: 18.09.2021).
5. Chen H., Yang W. Progress in electrical energy storage systems: a critical review. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/220037284_Progress_in_electrical_energy_storage_systems_a_critical_review_Prog_Nat_Sci (date of access: 20.09.2021).
6. Abramov A.Y. Application of energy storage systems in Russia: opportunities and barriers. 2019. URL: https://www.eprussia.ru/upload/iblock/1b8/1b83729ddd27beaeb629e380293a4585.pdf (date of access: 20.09.2021). (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KOLESOVA Marina Andreevna – 2th year Graduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: marina.kolesova69@yandex.ru
KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kolesova M.A., Krupnov A.V. A brief overview of the characteristics and comparison of parameters of electric energy storage systems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 2 (14), pp. 46–56.