

# Инфраструктурные накопители в энергетике

## Infrastructure storage in the energy sector

Виталий БУШУЕВ  
Генеральный директор Института энергетической стратегии, д. т. н., профессор  
e-mail: vital@df.ru

Vitaly BUSHUEV  
Director General with Institute for Energy Strategy, President of the Laboratory «Energy Initiative», professor, Doctor of Engineering  
e-mail: vital@df.ru

Николай НОВИКОВ  
Заместитель научного руководителя НТЦ ФСК, Ведущий научный сотрудник ОИВТ РАН, д.т.н., МЭИ  
e-mail: universe@mpei.ac.ru

Nikolay NOVIKOV  
Doctor of Engineering, MPEI, Deputy scientific adviser «R&D Center at FG C of UES»  
e-mail: universe@mpei.ac.ru

Северо-Западная ТЭЦ

Источник: amp.energybase.ru



Аннотация. В статье проанализированы необходимость и место применения систем накопления энергии. Подробно рассмотрены основные виды систем накопления энергии и изучены возможности локализации их производства на территории России. Кроме того, поставлена задача о необходимости развития центра испытаний и сертификации накопителей энергии.

Ключевые слова: системы накопления энергии, энергетическая система, хранение энергии, виды накопителей.

Abstract. The article analyzes the need for and place of application of energy storage systems. The main types of energy storage systems are considered in detail and the possibilities of localizing their production on the territory of Russia are studied. In addition, the task was set on the need to develop a center for testing and certification of energy storage devices.

Key words: energy storage systems, energy system, energy storage, types of storage.



**Развитие систем накопления приведет к увеличению двунаправленных потоков, в то время как сейчас они распределяются однонаправленно**

### Перспективы технологии хранения электроэнергии

Развитие электроэнергетики в настоящее время происходит под влиянием нескольких технологических трендов. Во-первых, идет процесс цифровизации инфраструктуры – разворачивание систем интеллектуального учета энергетических потоков, систем распределенной автоматизации, систем контроля оперативного состояния оборудования и качества энергоснабжения, формирования цифровых моделей для оптимального управления функционированием и развитием энергосистемы.

Во-вторых, наблюдается глубокая децентрализация производства энергии – масштабное вовлечение в энергосистему распределенных энергетических ресурсов



ГЭС-1 им. Смидовича

Источник: МОСЭНЕРГОПРОЕКТ

(в том числе и возобновляемых источников энергии), оптимальное сочетание большой, распределенной и автономной энергетики, использование потенциала многофункциональных энергетических объектов (например, ко- и тригенерационных установок).

В-третьих, происходит переход к интеллектуальному управлению и инжинирингу – внедрение интеллектуальных киберфизических устройств, использование методов и инструментов искусственного интеллекта для автоматического управления технологическими процессами и коммерческими отношениями, а также для автоматического инжиниринга, настройки, восстановления систем управления.



Накопители энергии повышают надежность энергосистемы

Источник: AtomicSummer / Depositphotos.com

Формируемая новая технологическая модель электроэнергетики будет характеризоваться увеличением сложности энергосистем, появлением существенной доли распределенной генерации, формированием нового типа субъекта — активных потребителей, соединяющих в себе функции потребления и производства энергии, повышением требований по доступности, качеству и надежности энергии.

Технологическим способом ограничения этой сложности является массовое применение накопителей электроэнергии, приводящее к разрыву базовой парадигмы построения энергосистемы: одновременное и синхронное производство и потребление.

---

**Новая технологическая модель дает российской энергетике уникальную возможность радикально поднять свою эффективность и поддержать конкурентоспособность энергоёмкой промышленности**

---

В результате электроэнергия становится обычным товаром. Кроме того, развитие систем накопления приведет к увеличению двунаправленных потоков электроэнергии, в то время как сейчас потоки распределяются, преимущественно, однонаправленно по иерархической ветке «магистральные сети — распределительные сети — потребитель». В целом накопители электроэнергии — это одни из ключевых элементов в новой парадигме «умной» энергетики.

Потенциальные области применения накопителей включают: сглаживание неравномерности производства и потребления (в том числе на ВИЭ), регулирование напряжения и частоты, предоставление горячего резерва мощности, аварийное питание для предотвращения развития системных чрезвычайных ситуаций (при секционировании энергосистемы) и для восстановления энергосистемы после них. Особая ценность накопителей состоит в том, что они могут осуществлять перечисленные функции одновременно.

Новая технологическая модель дает российской энергетике уникальную возможность радикально поднять свою эффективность и поддержать конкурентоспособность энергоёмкой промышленности, которая на ближайшие 15 лет по-прежнему будет вносить основной вклад в экономику,

---

**Работа с минимальным резервом мощности, повышение числа высокоэкономичных, но маломаневренных энергоблоков, отставание сетевого строительства усложнили проблемы устойчивости**

---

даже в случае успешных сдвигов в сторону отказа от сырьевой модели развития. Она даст существенное повышение коэффициента использования существующей генерации сетей, снизит потребность в строительстве новых мощностей, повысит операционную эффективность энергетических компаний и инфраструктурных организаций. В целом это позволит в рамках нового инвестиционного цикла в электроэнергетике, который начнется в России в первой половине 20-х годов, сдерживать рост цен на электроэнергию.

Однако современное регулирование в электроэнергетике, в значительной мере, не учитывает особенности функционирования накопителей и возможности, которые они предоставляют. Оно построено преимущественно из необходимости обе-

Тяговая подстанция  
Источник: electroinfo.net



спечения неразрывности и синхронности производства и потребления электроэнергии, пассивной роли конечного потребителя, «снабженческой» модели продажи электроэнергии. Более того, действующее регулирование предусматривает жесткое разделение функций в отрасли на производство, передачу, сбыт, потребление электроэнергии.

**Существующие системы аккумуляции электроэнергии**

В последние годы в электроэнергетике России произошли количественные и качественные изменения, режимы энергосистем значительно утяжелились. Работа с минимальным резервом по мощности, повышение числа высокоэкономичных, но маломаневренных энергоблоков, отставание сетевого строительства и увеличение числа слабых связей существенно усложнили проблемы статической и динамической устойчивости, живучести энергосистем, надежности и качества электроснабжения, несмотря на успехи, достигнутые в области автоматизированных систем диспетчерского управления, систем автоматического управления и противоаварийной режимной автоматики.

В настоящее время в ЕЭС России продолжают оставаться напряженными режимы ее работы, сохраняется достаточно сложная топливная проблема, возрастают трудности управления энергосистемами в связи с большой долей недостаточно маневренных крупных энергоблоков тепловых электростанций. Высокие требования, предъявляемые к электроэнергетике, определяют радикальную перестройку электроэнергетики, начиная с принципов ее построения и управления, и заканчивая техническим оборудованием. Необходимость сокращения непроизводительных расходов топлива предъявляет высокие требования к экономичности режимов.

В настоящее время формирование мощных электроэнергетических систем характеризуется повышением доли блоков, работающих в базе суточных графиков нагрузки. В определенной мере этому способствует существующая практика обновления генерирующих мощностей, при которой на станциях последователь-

но демонтируются маневренные агрегаты мощностью 50–200 МВт. В результате, при нагрузках, составляющих 50 % от номинальной, расход топлива увеличивается на 16–26 г/кВт·ч. Статистический анализ работы объединенных энергосистем показывает, что, наряду с повышением надежности энергоснабжения и снижением затрат на резервирование, уплотнения суточных графиков нагрузки не наблюдается. Объективный учет тенденций в развитии топливно-энергетического комплекса также говорит о том, что в ближайшие 30–40 лет основными производителями электроэнергии останутся тепловые электростанции, стоимость топлива будет возрастать, а межсистемные связи еще на долгие годы будут отнесены к разряду «слабых». Вследствие этого, включение в электроэнергетическую систему накопителей, позволяющих разделить во времени процессы выработки и потребления энергии (при условии их высокого КПД), имеет большое народно-хозяйственное значение.

Аккумуляция энергии позволит увеличить мощность и время работы базовых электростанций, улучшив тем самым технико-экономические показатели крупных энергоблоков благодаря существенному уменьшению эксплуатационных расходов, уплотнить график нагрузки и компенсировать ее пиковые изменения. Кроме того, накопители могут существенно повысить устойчивость крупной станции при обеспечении баланса мощности электроэнергетической системы. Включение накопителя в энергосистему в качестве самостоятельной структурной единицы является объективной необходимостью и на ближайшую перспективу нет альтернативных решений для мощных ТЭС и АЭС с накопителями энергии. Можно ожидать, что более 10 % всей вырабатываемой энергии, прежде чем попасть к потребителю, будут проходить через системы накопителей.

На современном этапе развития Единой энергетической системы динамические свойства энергообъединений настолько усложнились, и системная автоматика достигает такого уровня сложности, что могут возникать проблемы в отношении устойчивости, регулирования частоты и активной мощности [1,2]. Именно сложность динамических свойств энергообъединений и отсутствие целостного взгляда на проблему управляемости привели к тому, что некоторые научно-исследовательские орга-

низации и специалисты считают неизбежной необходимостью выполнять объединения подсистем только через вставки постоянного тока, с целью секционирования энергообъединения по каналам распространения возмущений, обеспечивающих либо полное разделение системы по возмущениям, либо интенсивное затухание по мере их трансляции.

Переходные процессы в сложных энергообъединениях представляют собой взаимообусловленную совокупность движений локального (в подсистемах) и межсистемного (обменного) характера. Результатом взаимодействий выступает процесс распространения и распределения возмущения, проявляющийся в том, что движение, инициированное возмущением в одной из подсистем, последовательно и постепенно, через промежуточные подсистемы,

Современная энергосистема основана на управлении возмущениями  
Источник: cboswell / Depositphotos.com



транслируется вдоль энергообъединения, вызывая развитие переходных процессов в удаленных от места возмущения регионах. Возмущения, действующие на ОЭС можно разделить по частотному спектру на высокочастотные (с периодом менее 1 минуты), низкочастотные (с периодом колебания до 5 минут) и инфранизкочастотные (с периодом колебания более 5 минут). Высокочастотные составляющие колебаний мощности (так называемые «шумы» системы), как правило, имеют небольшую амплитуду, но могут угрожать устойчивости связи, особенно слабой. Низкочастотные колебания мощности имеют большую амплитуду и связаны с действительными обменами мощности.

Таким образом, вытекает необходимость решения задачи управления процессами распространения возмущений, формирование комплекса противоаварийных мероприятий и системной автоматики. Решение проблемы локализации возмущений с помощью средств регулирования и противоаварийного управления во многом определяют показатели надежности работы протяженных энергообъединений. При этом в определении надежности функционирования электроэнергетической системы целесообразно выделить понятия схемной и режимной надежности. Схемная надежность в основном связана со структурой системы. Режимная надежность является сложной функцией структуры, динамических и статических параметров, диапазона осуществляемых режимов, статистических параметров возмущающих воздействий. Обеспечение схемной надежности, то есть построение системы с достаточным уровнем резервирования при отказах элементов, автоматически не приводит к системе с высоким уровнем режимной надежности во всем диапазоне пространства состояний. Режимная надежность определяется технологическими ограничениями (в том числе по устойчивости), процессами распространения возмущающих воздействий и развития аварийных состояний.

Многочисленные системные испытания, проведенные в объединенных энергосистемах ЦДУ ЕЭС, ВНИИЭ, НИИПТ, «Энергосеть-проект», СибНИИЭ, ВЭИ, НИИ «Электромаш» позволили обнаружить одну важнейшую общую закономерность для переходных явлений в объединенных энергосистемах. Чем более низкочастотный спектр рассма-



Обрывы ЛЭП зимой  
Источник: images.helionews.ru

триваемых движений, тем более системный характер они приобретают, другими словами низкочастотные движения определяются не столько региональными параметрами района возмущения, сколько свойствами всей системы в целом [3].

Целостный взгляд на анализ динамических свойств энергообъединений позволяет оценить эффективность традиционных средств регулирования (АРВ, АРС, АРЧМ), а также определить необходимость создания принципиально новых комплексов электрооборудования — накопителей энергии и устройств управляемых (гибких) систем электропередач переменного тока — Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS)

Новые возможности появились с разработкой управляемых статических компенсаторов реактивной мощности (СТК

### Решение проблемы локализации возмущений с помощью средств регулирования и противоаварийного управления во многом определяют показатели надежности работы протяженных энергообъединений

и СТАТКОМ), которые, кроме обеспечения требуемого баланса реактивных мощностей и поддержания уровня напряжения, при соответствующих законах регулирования могут эффективно демпфировать как локальные колебания, так и системные.

При анализе системных испытаний, все возмущения разнесены на три группы: возмущения, связанные с отклонением графика нагрузки от прогнозного; кратковременные, случайные колебания, не превышающие 2–5 % общей мощности; крупные возмущения.

Количественные характеристики этих возмущений являются исходными данными для определения допустимых значений



Технологии накопления требуют серьезных инвестиций  
Источник: cienpies / Depositphotos.com

перетоков, а также для предъявления требований к системной автоматике и к регулирующим станциям, включающие в себя регулировочный диапазон и требуемую скорость изменения мощности станций.

В тех случаях, когда крупные блоки вынуждены привлекать к регулированию переменной части графика нагрузки, значительно увеличивается расход топлива.

Активное внедрение систем накопления энергии (СНЭ) в энергосистемах в какой-то мере позволит преодолеть указанные выше проблемы. Предлагаемые накопители могут ранжироваться по мощности от нескольких кВт до тысяч МВт. Время разряда может также меняться от сотых долей секунды до нескольких суток. Си-

стемы накопления могут управляться локально и с удаленных центров управления. Они могут быть спроектированы таким образом, чтобы очень быстро реагировать на управляющие команды. Накопители могут потреблять и выдавать активную мощность, а в соединении с устройствами силовой электроники – реактивную мощность. В зависимости от потребностей энергосистемы они могут обеспечить регулирование частоты и напряжения, сдвиг во времени потребления и генерации, регулировку мощности на выходе системы ВИЭ+СНЭ, расширить возможности диспетчерского управления. Они могут быть спроектированы для потребностей распределительной и/или передающей сети, для одноцелевого или многоцелевого использования, или для целей управления на стороне потребителя.

Каждая технология накопления энергии характеризуется своими капитальными затратами на ее внедрение, а также эксплуатационными расходами. В настоящее время некоторые технологии накопления энергии не являются экономически эффективными, и в перспективе необходимо снизить, в первую очередь, капитальные затраты. Стоимость различных систем накопления и выгода от их применения в значительной степени зависят от мощности разряда (МВт) и энергетической емкости (МВт·ч). Независимым системным операторам (НСО), энергокомпаниям, продавцам и провайдером технологий накопления энергии необходимо активно формировать правила развивающегося рынка накопления энергии, а также эксплуатационные требования с тем, чтобы добиться максимальной экономической эффективности от применения накопителей. В идеале рынки и тарифы должны быть спроектированы таким образом, чтобы можно было воспользоваться преимуществами систем накопления без дополнительных неоправданных затрат.

### Управления режимами энергосистем

Нагрузка любой узловой точки электроэнергетической системы однозначно определяется напряжением и частотой в этой точке.

Для того чтобы обеспечить требуемое значение частоты и напряжения, необходимо правильное планирование балансов активных и реактивных мощностей в узле.

Баланс активных и реактивных мощностей состоит из приходной части, к которой относятся располагаемые мощности станции и накопителей энергии, и расходной, к которой относятся мощности нагрузок и мощности накопителей, поскольку они позволяют независимо изменять активную и реактивную мощности. Схемы связи накопителей с энергосистемой, построенные на базе современной силовой электроники, позволяют практически мгновенно изменять активную и реактивную мощности. Таким образом распределенная система накопления энергии является основой построения скоординированной системы локализации возмущающих воздействий в узле по активной и реактивной мощности любого спектра. Экономически целесообразно спектр изменения активной мощности накопителей энергии ограничить периодом колебаний 25 минут. Колебания выше 25 минут экономически целесообразно возлагать на генерирующие источники, например, на газотурбинные станции, которые при таком спектре возмущающих воздействий будут работать экономично и надёжно. Экономические показатели многофункциональной быстродействующей системы управления режимами энергосистем можно существенно повысить, привлекая к регулированию потре-

### Все возмущения разнесены на три группы: возмущения, связанные с отклонением графика нагрузки от прогнозного; кратковременные, случайные колебания в 2–5 % общей мощности; крупные возмущения

бителей энергии. Таким образом, сетевые накопители с соответствующей системой управления позволят обеспечить качество электрической энергии по частоте, действующему значению напряжения, форме его кривой, симметрии и импульсам напряжения. Улучшение качества электрической энергии существенно влияет на народнохозяйственный эффект, поскольку потребители работают в номинальных режимах (повышается срок службы электрооборудования), имеет место улучшение нормального функционирования электроприёмников, отсутствие провалов напряжения и высших гармоник тока и напряжения.

Таким образом, распределенные схемы накопления являются первоочередной

Диспетчерский центр «Россети»

Источник: electrocentr.info



задачей внедрения систем накопления энергии в единую электроэнергетическую систему. Требуемая мощность систем накопителей энергии — около 30 ГВт. Энергоёмкость систем накопления — около 15 ГВт·ч. Предварительный анализ показывает, что срок окупаемости такой системы составляет 5–6 лет за счет локализации возмущающих воздействий активных и реактивных мощностей нагрузок, стабильного качества электроэнергии, экономии топлива на генерирующих станциях, увеличения времени безотказной работы генерирующего оборудования и оборудования потребителей энергии.

### Основные типы накопителей

Существует много различных классификаций накопителей электрической энергии. Наиболее удобной с практической точки зрения представляется классификация на электрохимические и физические накопители энергии. Первые — преобразуют электрическую энергию в химическую энергию веществ, вторые — в механическую энергию.

К электрохимическим накопителям энергии относятся аккумуляторные батареи, накопители энергии на основе молекулярных конденсаторов и др. Все типы электрохимических накопителей подключаются к сети через преобразователи (инверторы).

К физическим накопителям электроэнергии в основном относятся два вида комплексов:

- кинетические накопители энергии (маховики);
- гравитационные накопители энергии.

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) являются одной из самых ранних технологий запасания больших объемов энергии. Следует заметить, что основными факторами, определяющими возможность постройки ГАЭС, её максимальную емкость и капитальную стоимость, являются особенности рельефа местности, а также необходимость затопления значительных территорий.

Гидронакопитель энергии гравитационного типа (ГЭГТ) является развитием широко применяемых в настоящее время гидронакопителей в схемах гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС). Идея состоит в том, чтобы использовать воду в качестве гидравлического домкрата для



Tesla выпустила одну из самых больших систем для хранения энергии  
Источник: shazoo.ru

поднятия тяжелого груза. Гравитационная система включает в себя следующие компоненты:

- рабочая масса (диск или поршень);
- корпус камеры, в которой поршень движется;
- домкрат, использующий воду в качестве гидравлической жидкости;
- системы преобразования энергии (гидронасосы, гидротурбины).

### Наиболее удобной представляется классификация на электрохимические и физические накопители энергии. Первые — преобразуют электрическую энергию в химическую, вторые — в механическую

Есть много вопросов, касающихся методов строительства, уплотнения, структурной целостности, безопасности, преобразования энергии, управления поршнем. Предварительный анализ показывает, что получить практичные, реальные решения с учетом современного уровня развития науки и техники очень затруднительно, поскольку идет речь об очень больших давлениях, при этом плотность энергии поднятого груза очень низкая.

Накопитель энергии гравитационного типа фирмы «Энергозапас» использует вместо воды вертикальный подъем/спуск твердых брикетов упакованного грунта.

Для накопления потенциальной энергии, привод в режиме двигателя поднимает грунт. Во время генерации под действием силы тяжести грунт опускается, и привод в режиме генератора передает электроэнергию в сеть. Требования к рельефу и источникам воды отсутствуют. Работа находится в начальной стадии. Создать эффективный накопитель весьма затруднительно.

Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии (СПИНЭ) уже нашел небольшое практическое применение. Особенно, если речь идет о передвижных накопителях этого типа сравнительно небольшой энергоёмкости (до  $10^6$  Дж). Широкое применение СПИНЭ возможно после разработки и создания на их базе высокотемпературных сверхпроводников. Ожидаемое время их практического применения — 2025 год.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научный центр РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» предложил и испытал новый вид сверхпроводниковой обмотки — компактный тор [9,10].

Минэнерго подтвердило готовность «Россети Центр» к отопительному сезону  
Источник: «Россети Центр»



Традиционная, поддерживаемая внешним бандажом обмотка неизбежно деформируется под действием пондеромоторной силы. Такая деформация сопровождается тепловыми возмущениями, вызывающими переход обмотки в нормальное состояние при токах, существенно меньших критического (деградация в ламинарной конструкции, где каждый виток приклеен к жесткой бандажирующей пластине). Деформация уменьшена в меру жесткости пластины и происходит упруго. Возмущения не возникают. В ламинарной обмотке отсутствует деградация. Структурные пластины используются как хладопровод. Энергия запасается внутри тора с постоянной плотностью.

### Перспективным топливом будущего является водород. Водород, как и алюминий, может быть доставлен к месту потребления и преобразован в полезную электрическую и тепловую энергию

Вне обмотки поле отсутствует. Однородность плотности энергии обеспечено распределением обмотки в объеме тора.

В традиционных обмотках напряженное состояние провода и силовой структуры нарастает с увеличением размеров обмотки. Соответственно растет амплитуда механотермических возмущений. Их амплитуда непредсказуема.

Поэтому моделирование обмоток не дает надежных результатов.

Чтобы не допускать перегрева провода под действием возмущений, необходимо обеспечивать хороший теплоотвод.

В ламинарных обмотках нет возмущений, большая мощность теплоотвода не требуется, можно применять косвенное охлаждение.

В ламинарных обмотках условия работы провода зависят лишь от используемого поля и не зависят от размеров обмотки. Это позволяет применять результаты, полученные на моделях к обмоткам произвольных размеров. Достоинства ламинарных обмоток многократно проверены на различных сверхпроводящих магнитах.

Компактный тор — наиболее выгодная форма из накопителей с замкнутым потоком.

Компактный тор — вне конкуренции благодаря однородной плотности запасаемой энергии во внутреннем объеме.

Удельная стоимость СПИНЭ с тороидальной обмоткой энергоёмкостью 10 ГВт·ч составляет 300 долл./кВт·ч, что экономичней ГАЭС.



Рис. 1. АЭС с СПИНЭ 10 ГВт·ч  
Источник: Е. Ю. Клименко

### Алюмо-водородная энергетика

Перспективным топливом будущего является водород. Водород, как и алюминий, может быть доставлен к месту потребления и преобразован в полезную электрическую и тепловую энергию.

Водород может быть получен прямым электролизом воды электрическим током — так может решаться проблема хранения электроэнергии. Такая схема хранения может быть использована для регулирования работы электростанций как традиционного типа, так и на основе ВИЭ, в силу более высокой маневренности электролизера воды по сравнению с электролизером алюминия, который требует буферного накопителя из-за высокой чувствительности к изменению режимов работы. Однако на пути транспортировки баллонного водорода стоят серьезные ограничения, связанные с пожаро- и взрывоопасностью таких перевозок. Существует вариант с криогенным хранением водорода, но он также является не вполне безопасным и сопряжен с затратами

на сжижение газа и последующими потерями при транспортировке за счет испарения. Достаточно широко распространен способ хранения водорода в гидридах интерметаллических и металлогидридных соединений, однако его существенным недостатком являются низкая емкость по водороду таких соединений (1–3%), высокая стоимость и малое количество циклов гидрирования-дегидрирования.

По своему энергетическому потенциалу к водороду, считающемуся сегодня перспективным топливом, очень близок алюминий. При этом алюминий лишён недостатков, свойственных водороду (чрезвычайно малая плотность газа и взрывоопасность). Когда речь идёт о хранении и транспортировке водорода, возникает масса вопросов, связанных с безопасностью. Также до сих пор не существует простого и недорогого способа производства водорода в массовых количествах из возобновляемых ресурсов.

Алюминий же по распространённости в природе стоит на первом месте среди металлов и на третьем, после кислорода и кремния, среди химических элементов. В обычных условиях алюминий химически инертен. Причём продукты его окисления можно вторично использовать для восстановления металла, поэтому нет необходимости значительно расширять добычу алюмосодержащих ископаемых.

В Объединённом институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН, Москва) разработали серию воздушно-алюминиевых топливных элементов.

Таким образом, алюминий может участвовать в распределении экологически чистой (по сравнению с ископаемыми топливами) энергии возобновляемых источников

**По своему энергетическому потенциалу к водороду очень близок алюминий. При этом алюминий лишён недостатков, свойственных водороду: чрезвычайно малая плотность газа и взрывоопасность**



Завод по производству «зеленого» водорода

Источник: laptrinhx.com

и АЭС, и регулировании их генерирующей мощности. При этом наработанные оксиды снова возвращаются на алюминиевый завод для регенерации.

**Главное значение накопителей – не просто решить задачу энергообеспечения при перерывах внешнего питания, а сформировать новую энергетическую инфраструктуру, свободную от ограничений**

Традиционный вариант использования дизельного топлива помимо чисто экологических имеет и «энергетический» недостаток — плотность запасенной энергии меньше, чем у алюминия. Кроме того, алюминий в отличие от водорода и дизельного топлива более удобен при транспортировке (не огнеопасен, не текуч, не испаряется).

Разрабатываемые технологии алюмо-водородной энергетики могут быть применены как в «водородной экономике» будущего в качестве эффективного и без-

опасного способа транспортировки водорода и запасаемой энергии, так и в качестве дополнения существующих энергосистем в регионах, где отсутствуют централизованная газовая сеть или местные виды топлива. Применение алюминия для генерации водорода и энергии позволяет снизить нагрузку на окружающую среду. Эффективность применения подобных установок во многом определяется стоимостью исходного сырья и побочных продуктов реакции, а также наличием или отсутствием конкурирующих решений по централизованному энергоснабжению потребителей.

### Создание центра испытаний и сертификации накопителей

Испытания накопителей электрической энергии являются единственным способом получения данных о его номинальных характеристиках и поведении в различных возможных, не нормируемых условиях работы, циклах эксплуатации, которые невозможно провести силами производителей оборудования, особенно для больших мощностей. В качестве таких режимов можно отметить короткие замыкания, внезапные обрывы, размыкание индуктивных потребителей, нелинейные источники и приёмники электроэнергии, четырёхква-

## По оценкам экспертов, в ближайшие 10 лет рынок накопителей энергии будет расти со среднегодовыми темпами, превышающими 30% с тенденцией к снижению удельной стоимости запасенной энергии

дратные (рекуперативные), опережающие/отстающие нагрузки, не симметричные нагрузки/генераторы, генераторы с изменяемой частотой и скоростью изменения частоты. Накопители представляют собой электротехнические комплексы из взаимосвязанных элементов с существенно разнесёнными постоянными времени управления. Например, аккумулирующий элемент имеет характерные времена — минуты и часы, преобразователь — до единиц миллисекунд, средства измерения и контроля — несколько периодов сетевого напряжения или до единиц секунд. Во всех этих элементах существуют не одинаковые параметры для элементов одного типа или изменяемые параметры с течением времени, обусловленные длитель-

ностью эксплуатации, температурными режимами работы. При воздействии экстремальных факторов, таких как короткие замыкания, перегрузки можно выявить степень надёжности работы оборудования, соответствие запасов по перегрузочной способности. Возможно также применение специальных нагрузок в виде нелинейных потребителей или с опережающим током. Проверяется качество работы системы управления, локальных алгоритмов управления силовым оборудованием и общего поведения всей системы в целом, к примеру, исследуются переходные процессы, наличие статической ошибки по заданным сигналам задания, как переменным так и постоянным, появление динамических ошибок и степени их отработки, перерегулирования, избыточных колебаний, наличия нелинейных эффектов, превышение допустимых эксплуатационных параметров накопителей. Система подвергается испытаниям: исследовательским, типовым, приемо-сдаточным, контрольным, периодическим.

Центр создается с целью повышения показателей надежности и безопасности функционирования объектов электроэнергетики средствами комплексного решения задач повышения качества применяемых накопителей энергии и внедрения новых технологий на предприятия топливно-энергетического комплекса РФ.

Водородный накопитель энергии

Источник: [energydelta.org](http://energydelta.org)



- предоставление заводам-изготовителям информационно-технологических систем услуг по проведению комплексных испытаний и контролю качества продукции на соответствие требованиям профильной нормативно-технической документации (аттестация, сертификация);
- проведение испытаний накопителей на соответствие требованиям электромагнитной совместимости;
- проведение специализированных испытаний, определяющих границы допустимых значений параметров системы;
- проведение испытаний на отказоустойчивость при возникновении существенных отклонений параметров;
- проведение испытаний с недопустимыми значениями управляющих воздействий, ошибок в информационном обеспечении и изменении топологии силовой системы и системы управления ввиду внутренних обрывов или закорачиваний, включая ошибки информационного обеспечения в виде зависаний, и иными проблемами с вычислителем.

Потенциальными пользователями услуг центра являются:

- производители и поставщики продукции, применяемой на предприятиях электроэнергетического комплекса, системные интеграторы, проектные организации;
- эксплуатационные организации субъектов электроэнергетики;
- разработчики и интеграторы решений с использованием накопителей;
- участники координации профильных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по направлениям деятельности центра.

### Локализация производства накопителей в России

Ряд производителей предлагает законченные решения энергоустановок с накопителями энергии в широком диапазоне энергоёмкости и мощности с использованием литий-ионных аккумуляторов. Использование магистрально-модульного принципа при создании накопителей и преобразо-

вателей электрической энергии большой энергоёмкости и высокого напряжения на базе литий-ионных аккумуляторов в настоящее время является наиболее прогрессивным и широко используемым решением для изделий стационарного и транспортного применения.

Первая в Китае энергоёмкая система накопления электрической энергии мощностью 100 МВт была изготовлена в 2018 году компанией Zhongtian Yipin Technology, которая входит в группу ZTT.



Твёрдотельная аккумулирующая электростанция, Новосибирск

Источник: [energozapas.ru](http://energozapas.ru)

Система, установленная на подстанции Danjiang Dagang в г. Чжэньцзяне, состоит из двух видов блок-контейнеров: 1 МВт / 2 МВт·ч (системных блок-контейнеров / батарейных блок-контейнеров).

В системе накопления электроэнергии ZTT (в батарейных модулях) используются литий-ионные железо-фосфатные элементы (аккумуляторы) типа ZTT27173200 на 3,2 В ёмкостью 86 а.ч. Энергоёмкость одной группы накопителей до 2,7 МВт·ч.

В последние годы группа ZTT неуклонно увеличивала свои инвестиции в области накопления электрической энергии, благодаря постоянным исследованиям, разработкам и инновациям разработала серию новых продуктов для удовлетворения рыночного спроса.

Ценовой показатель стоимости систем накопления в контейнере мощностью 1 МВт/энергоёмкостью 1 МВт·ч составляет 100 млн рублей с учетом поставки, монтажа и пуско-наладочных работ.

В настоящее время «ЗТТ Рус» ищет партнера для локализации производства накопителей контейнерного и блочно-модульного исполнения в России.

«ЗТТ Рус» планирует осуществлять поставку серийно изготавливаемых преобразователей-PCS (подсистему преобразования энергии) и батарейных стоек с батарейными модулями (подсистему накопления), включая шкафы DC распределения из Китая, а остальные подсистемы планирует изготавливать в России.

Установленная мощность построенной в Сан-Диего системы хранения энергии

Рис. 2. Система накопления мощностью 100 МВт компании Zhongtian Yipin Technology



составляет 30 мегаватт, а емкость 120 МВт·ч. Объект представляет собой 24 контейнера, в которых размещены 400 тысяч литий-ионных аккумуляторов (Samsung SDI), собранных в 20 тысяч модулей.

### Заключение

Электроэнергетика является типичным примером холистической системы, все составные части которой (генерация, сеть, нагрузка) структурно и функционально взаимосвязаны в одно целое.

Главное значение накопителей — не просто решить задачу энергообеспечения при перерывах внешнего питания, а сформировать новую энергетическую инфраструктуру, свободную от ограничений непрерывности одного вида электрических процессов, а по сути — значительно расширить вид и форму энергетических объединений, позволяющих интегрировать автономные, распределенные и централизованные системы, включая новые центры генерации и потребления в общую энергетическую «систему систем».

По оценкам экспертов в ближайшие 10 лет рынок накопителей энергии будет расти со среднегодовыми темпами, превышающими 30 % с тенденцией к снижению удельной стоимости запасенной энергии.



Рис. 3. Система накопления в Сан-Диего 30 МВт, емкость 120 МВт·ч

## Использованные источники

1. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
2. Экспериментальное определение режимных характеристик энергообъединений и межсистемных электропередач при параллельной работе ОЭС Сибири и Казахстана в составе ЕЭС СССР / В.Ф. Тимченко, А.А. Хачатуров, Н.Л. Новиков, В.А. Киладзе, Ю.И. Парамонов, В.И. Решетов, В.В. Бушуев, М.И. Кобытев, Ю.П. Щеглов // Повышение надежности объединений энергосистемы Северного Казахстана. Алма-Ата, 1977. С. 94–107.
3. Автоматическое регулирование частоты и активной мощности в энергосистемах // Энергетика за рубежом, 1967. 70 с.
4. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
5. N. G. Hingorani and L. Gyugyi. Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press, New York, 2000.
6. URL: <http://energystorageexchange.org/projects>
7. Joint EASE/EERA Recommendation for a European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030, Final Report, March 2013.
8. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. №3. С. 28–37.
9. Ковалев Г.Ф. Ветрогидроэнергетический комплекс с гидравлическим накопителем энергии гравитационного типа как источник надёжного электроснабжения. Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко. Иркутск, 2015. С. 146–155.
10. Клименко Е.Ю., Малофеев А.М., Новиков С.И. Superconducting magnets for MHD Ship Propulsion. В книге «Applied Superconductivity», ред. Н.С. Freyhardt, DGM informationsgesellschaft verlag, 1993, том 2, С. 953–955 (Материалы конференции EUCAS, октябрь 1993, Геттинген, Германия).
11. Патент RU(11) 2 370 923(13) C2 Тороидальная обмотка с однородным модулем магнитного поля / Клименко Е.Ю.(RU), Полулях Е.П.(RU)
12. Yingjie Tan, Kashem M. Muttaqi. Multilevel energy storage based frequency regulation in remote area power supply system's 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) Year: 2016. P. 1–6, DOI:10.1109/POWERCON.2016.7754028
13. Ziping Wu, Wenzhong Gao, Huaguang Zhang, Shijie Yan, Xiao Wang. Coordinated Control Strategy of Battery Energy Storage System and PMSG-WTG to Enhance System Frequency Regulation Capability. IEEE Transactions on Sustainable Energy. Year: 2017, Volume: PP, Issue: 99. P. 1, DOI: 10.1109/TSTE.2017.2679716
14. Analytical Methods for Characterizing Frequency Dynamics in Islanded Microgrids with Gensets and Energy Storage. Ajit A. Renjit, Abrez Mondal, Mahesh S. Illindala, Amrit S. Khalsa. IEEE Transactions on Industry Applications. Year: 2017, Volume: PP, Issue: 99. P. 1, DOI: 10.1109/TIA.2017.2657481
15. Daniel-Ioan Stroe, Vaclav Knap, Maciej Swierczynski; Ana-Irina Stroe; Remus Teodorescu Operation of a Grid-Connected Lithium-Ion Battery Energy Storage System for Primary Frequency Regulation: A Battery Lifetime Perspective. IEEE Transactions on Industry Applications. Year: 2017, Volume: 53, Issue: 1. P. 430–438, DOI: 10.1109/TIA.2016.2616319. IEEE Journals & Magazines.
16. Фортон В.Е., Сон Э.Е., Деньщиков К.К., Жук А.З., Новиков А.Н., Новиков Н.Л. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Инновационные технические решения в программе НИОКР ПАО «ФСК ЕЭС» Сборник статей – М., 2016. С. 198–212.
17. Алюмоводородная энергетика / Под ред. акад. РАН А. Е. Шейндлина. – М.: ОИВТ РАН, 2007.
18. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/02/27/krupnejshij-nakopitel-energii-otkryt-v-kalifornii/>