

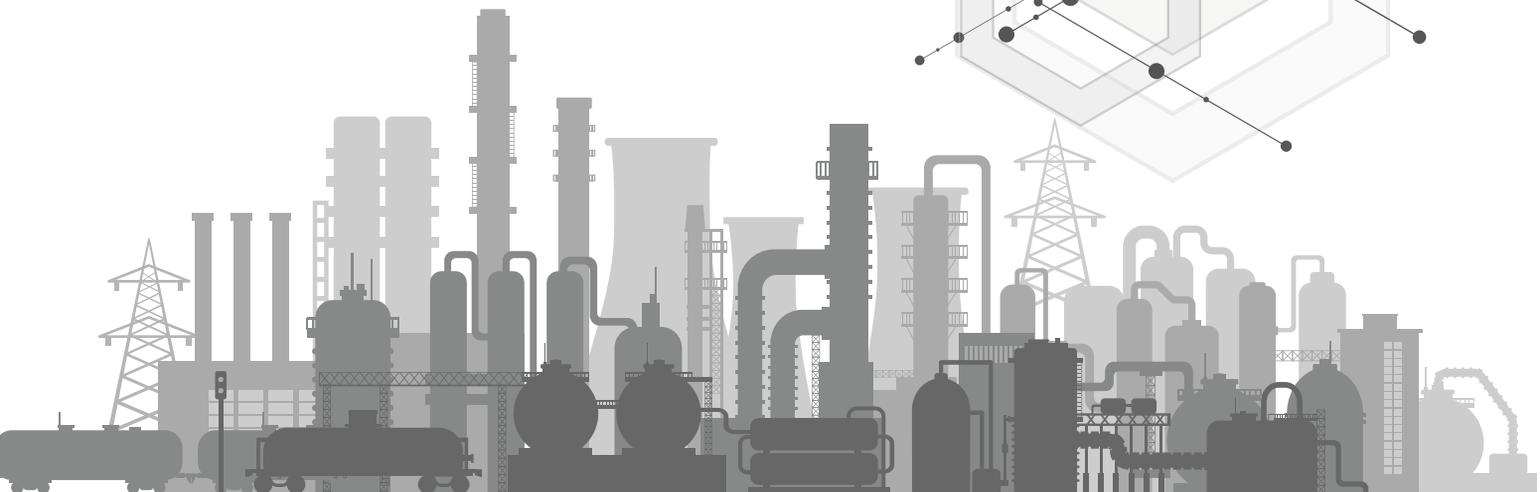
ГЛАВНЫЙ ЭНЕРГЕТИК

Производственно-технический журнал

**ПУСКОНАЛАДОЧНЫЕ
РАБОТЫ
НА ПРОИЗВОДСТВЕ**

**ДЕМОНТАЖ,
ПЕРЕВОЗКА И МОНТАЖ
ОБОРУДОВАНИЯ —
ПРАКТИЧЕСКИЕ
РЕКОМЕНДАЦИИ
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЭК**

**СИСТЕМЫ
АНАЛИЗА ДАННЫХ
ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО
ОТСЛЕЖИВАНИЯ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**



ISSN 2074-7489

ЖУРНАЛ
«ГЛАВНЫЙ ЭНЕРГЕТИК»
 № 9 (254), 2024

Журнал зарегистрирован
 Министерством Российской
 Федерации по делам печати,
 телерадиовещания и средств массовых
 коммуникаций

Свидетельство о регистрации
 ПИ № ФС77-83153 от 26.04.2022

Учредитель

ООО Издательский Дом «ПАНОРАМА»
 119602, г. Москва, ул. Академика Анохина,
 д. 34, корп. 2

Издатель

© Издательский Дом «Панорама»
 127015, г. Москва, Бумажный проезд,
 д. 14 стр. 2, под. 3, а/я 27. www.panor.ru

Президент ИД «Панорама» —
 Председатель Некоммерческого фонда
 содействия развитию национальной
 культуры и искусства **К. А. Москаленко**

Генеральный директор
ИД «Панорама» Г. К. Москаленко

Издательство «Промиздат»
 127015, г. Москва, Бумажный проезд,
 д. 14, стр. 2, подъезд 3, а/я 27
 Тел.: 8 (495) 274-22-22
 www.promizdat.com

Редакция

E-mail: promizdat@panor.ru

Журнал распространяется через подписку.
Оформить подписку с любого месяца можно:

- На нашем сайте **panor.ru**;
- Через нашу редакцию
по тел. **8 (495) 274-2222** (многоканальный)
или по заявке в произвольной форме
на адрес: **podpiska@panor.ru**;
- По официальному каталогу Почты России
«Подписные издания» (индекс — **П7203**);
- По «Каталогу периодических изданий.
Газеты и журналы» агентства «Урал-пресс»
(индекс на полугодие — **82717**).

Отдел подписки:

Тел./факс: 8 (495) 274-22-22,
 E-mail: **podpiska@panor.ru**

Отдел рекламы:

тел.: 8 (495) 274-22-22. E-mail: **reklama@panor.ru**

Журнал издается под эгидой
 Международной Академии технических наук
 и промышленного производства

Подписано в печать 18.09.2024 г.

Отпечатано в типографии
 ООО «ПРОФПРИНТ»,
 105103, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 104
 Установочный тираж 5000 экз.
 Цена свободная

Приглашаем авторов к сотрудничеству.
 Статьи в журнале публикуются на
 безгонорарной основе.

ЭНЕРГЕТИК.РФ

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

**Демонтаж, перевозка и монтаж оборудования —
 практические рекомендации для предприятий ТЭК..... 3**

Дмитрий Титов

Предприятия топливно-энергетического комплекса России не могут эффективно работать без специальной техники. Транспортировка такого оборудования на большие расстояния зачастую является непростой задачей. Необходимо учесть особенности продукции, габариты, вес. Автор статьи дает практические рекомендации по транспортировке и монтажу промышленного оборудования.

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

**«Зеленая» энергетика и принцип «производить то,
 что необходимо и когда необходимо»..... 6**

Кодкин В. Л.

Эффективное или хотя бы рациональное использование энергоресурсов — проблема, которая интересует подавляющее большинство людей в современном обществе — от крупных ученых и политиков до журналистов и школьников, плохо имеющих представление об основных законах физики (знания политиков в этой области тоже иногда сомнительны).

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Системы анализа данных для диагностического
 отслеживания электрооборудования 20**

Юдин А. А.

В условиях цифровой трансформации электроэнергетики ключевую роль в обслуживании электрооборудования должны играть системы технической диагностики, основанные на обработке данных. Для создания таких систем необходимо изучить методы и знания, применяемые в уже существующих продуктах на рынке, которые успешно внедрены. Внедрение новых методов обработки данных в существующие комплексы может стать эффективным инструментом для управления жизненным циклом электрооборудования.

**Применение накопителей
 для распределенной электроэнергетики 24**

Шульга Р. Н., Смирнова Т. С.

Выполнен сопоставительный анализ наиболее применяемых и развиваемых накопителей электрохимического и водородного типа, которые применяются в малой и распределенной энергетике в диапазоне мощностей от 1 кВт до 30 МВт. Ускоренное развитие указанных накопителей обусловлено потребностями домашних хозяйств, транспорта, энергоснабжения в условиях отсутствия или отказа от централизованного энергоснабжения. Показано, что водородные накопители имеют наиболее высокую удельную энергоемкость, в три раза превышающую энергоемкость жидких углеводородов и во много раз превышающую энергоемкость электрохимических накопителей. Натрий-сернистые

аккумуляторы обладают наибольшей удельной энергоемкостью до 500–700 Вт·ч/кг сравнительно с 200 кВт·ч/кг для литий-ионных аккумуляторов ЛИА, имеют большой ресурс и срок службы, но за счет меньшей тиражируемости дороже и реже применяются на транспорте. Литий-ионные аккумуляторы благодаря достаточно высокой энергоемкости, сравнительно низкой стоимости до 250 долл./кВт·ч, благодаря высокой тиражируемости и применению на транспорте выгодно отличаются от других типов аккумуляторов.

Построение сетей АСУ ТП и промышленных контроллеров42

Беликов К. А., Силаев А. А.

Основная цель создания распределенной системы автоматизации — снизить затраты и упростить технологию и управление производством и эксплуатацией системы, предоставляя сквозные технологии сетевого доступа, от мощных компьютеров и многофункциональных контроллеров до интеллектуальных пассивных элементов. Современные системы управления невозможны без использования промышленных сетей. В мире уже существуют десятки таких сетей.

ИННОВАЦИИ И РАЗВИТИЕ

Перспективы применения искусственного интеллекта в промышленности46

Константин Кутуков

Действительно ли есть измеримый эффект от использования искусственного интеллекта (ИИ) на производстве и можно ли говорить об увеличении производительности, снижении затрат и повышении качества конечной продукции в результате внедрения этой технологии? По мнению автора статьи, на рынке представлены инструменты и решения, позволяющие за счет использования ИИ получить дополнительный экономический эффект и повысить качество продукции. Однако у этой технологии есть свои особенности и ограничения.

СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Информационная и технологическая безопасность предприятия50

Овчинников Д. Б.

За последние десятилетия цифровые технологии сильно преобразили повседневную жизнь людей. Смартфоны с доступом в сеть Интернет, программы для навигации, онлайн оплата — все это изменило наше представление об окружающем мире, о нашем представлении, об удобствах и комфорте. Однако, цифровые технологии произвели еще большие, изменения в безопасности на промышленных предприятиях и организациях. Возможности по автоматизации, сбору и обработке данных позволили поднять безопасность технологических процессов на новый уровень.

Пусконаладочные работы на производстве55

Идиятуллина Э. Ф.

В данной статье описывается процесс пусконаладочных работ. Рассматриваются виды работ, не входящие в состав пусконаладочных работ, а также виды риск-сессий.

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ

Компетентностный подход как основа найма, удержания и комплексного управления кадрами58

Мария Дорофеева

В статье рассматривается один из подходов к комплексному управлению персоналом — компетентностный подход, который поможет компаниям решить проблему оттока квалифицированных специалистов за счет прозрачных требований к сотрудникам и унификации программ подготовки кадров. Статья основана на практическом опыте автора.

Демонтаж, перевозка и монтаж оборудования — практические рекомендации для предприятий ТЭК

Предприятия топливно-энергетического комплекса России не могут эффективно работать без специальной техники. Транспортировка такого оборудования на большие расстояния зачастую является непростой задачей. Необходимо учесть особенности продукции, габариты, вес. Практические рекомендации по транспортировке и монтажу промышленного оборудования дает Дмитрий Титов — главный инженер компании BELUGA TEC (АО «Белуга Проджектс Лоджистик») — поставщика комплексных услуг для промышленности по проектированию и организации грузоподъемных, монтажных и транспортных работ на промышленных объектах.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, транспортировка и монтаж промышленного оборудования, транспортные работы.



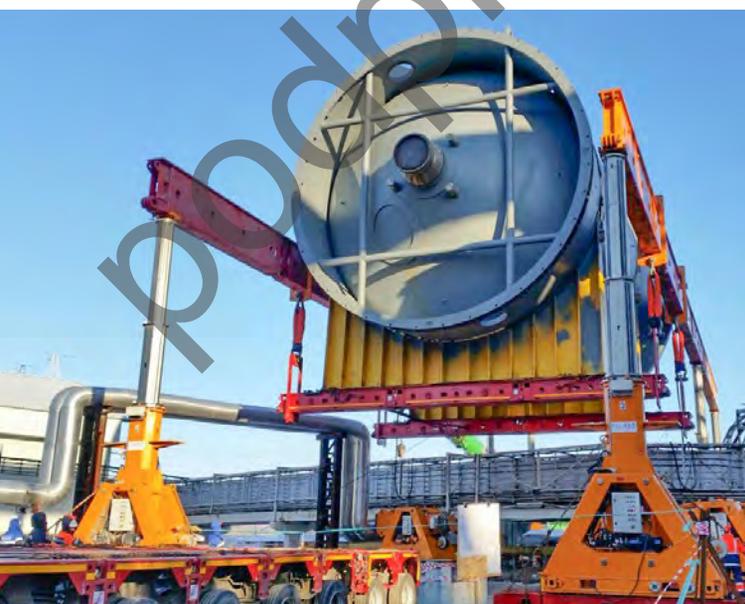
Дмитрий Титов

Основа каждого проекта по строительству или реконструкции генерирующих мощностей — установка крупногабаритного оборудования: паровых и газовых турбин, генераторов. В период активного строительства новых электростанций в рамках программы ДПМ, многие проекты в России включали перемещение и установку оборудования массой 200–300 т. В связи с этим демонтаж, перевозка и установка масштабного оборудования для предприятий энергетики представляло собой непростую задачу с особыми требованиями к проблемам безопасности.

Виды крупногабарита и особенности транспортировки

Оборудование для ТЭК обладает отраслевой спецификой. Одной из особенностей негабаритных грузов для ТЭК является их большая масса, например, у трансформаторов, статоров и турбин. Так, масса корпуса реактора для АЭС может достигать 350 т, а транспортируется он как единое изделие. Изготовителей такого уникального оборудования, как правило, немного, а потребители могут находиться в любой точке в России или за рубежом. Вот почему каждый проект по доставке является таких грузов по сути является уникальным.

Чаще всего представители топливно-энергетического сектора заказывают генерирующее оборудование (статоры, генераторы, турбины), средства передачи электроэнергии (трансформаторы), оборудование для отопления (котельное оборудование). Обычно массогабаритные показатели такого оборудования колеблются в широком диапазоне, начиная от небольших поверхностей нагрева котельных установок массой в несколько десятков килограмм и заканчивая корпусами реакторов для АЭС, которые весят сотни тонн.



Портальная система SBL 1100

В связи с этим при их транспортировке задействована специальная техника, так как обычно подобные силовые агрегаты невозможно разделить на части, поскольку они отгружаются заводом-изготовителем в виде готового изделия, имеющего большие габариты и массу. Например, для перевозки сверхтяжелых грузов размеры автопоезда могут превышать 20 м по длине, 5 м по ширине и 5 м по высоте. Для транспортировки такого оборудования необходима специализированная техника: модульные гидравлические оситяжеловозы, балластные тягачи и т.д.

Кроме того, для перевозки энергетических установок используются особопрочные крепления с целью минимизации рисков повреждения дорогостоящего оборудования. Например, это могут быть стальные тросы с винтовыми зажимами и коушем, чтобы обустроить петли и применить крюки, цепи и дополнительные устройства, повторяющие геометрическую форму и обеспечивающие устойчивость груза. В таких ответственных случаях необходимо производить разработку схемы крепления для определения необходимого количества удерживающих элементов (цепей, талрепов). К примеру, при проведении демонтажа, перевозки и монтажа станины прессы LZK-4000 массой 115 т на Челябинском кузнечно-прессовом заводе наша компания применила портальную систему SBL 1100 и модульные самоходные оси Cometto, благодаря чему станины были перемещены и установлены на новом месте в течение 20 дней.

Основные сложности и распространенные ошибки при транспортировке

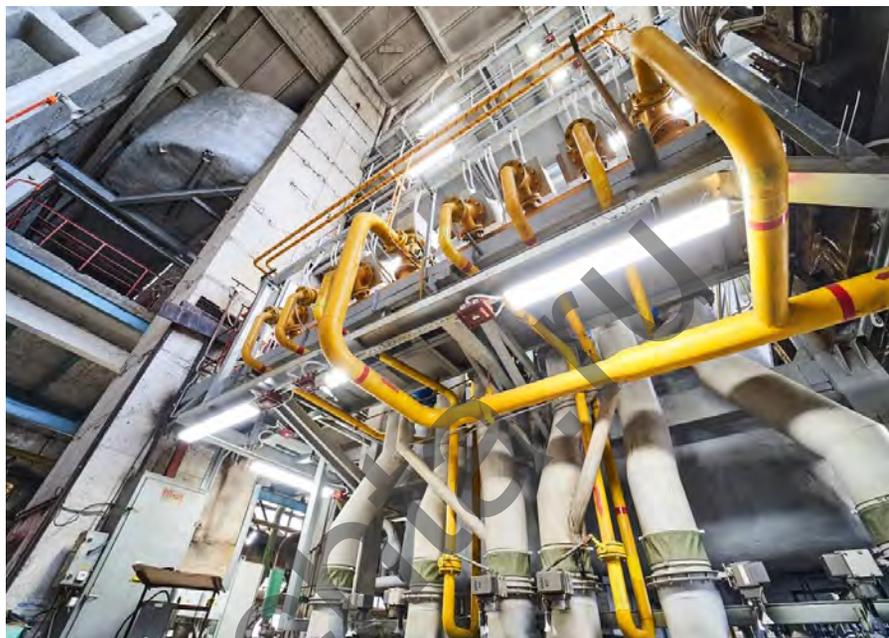
Главная сложность перемещения энергетических установок обычно связана с расположением производственных площадок, где производятся работы по демонтажу, транспортировке и монтажу оборудования. Часто они находятся в труднодоступных районах,

где наблюдается дефицит техники большой грузоподъемности, а также имеют достаточно ограниченную площадь. Например, при транспортировке статора и конденсатора турбоагрегата при модернизации ТЭЦ в Краснодарском крае пришлось преодолевать ряд эстакад с минимальным зазором до 5 см, а при демонтаже и монтаже агрегатов на площадке заказчика было важно не повредить существующие подземные коммуникации, поэтому работать приходилось в сложных условиях. Для эффективного выполнения этой задачи были разработаны специальные мероприятия, в частности, спроектирован и смонтирован временный мост через циркводоводы длиной 18 м, который позволил избежать передачу нагрузок на подземные коммуникации.

При этом помимо выполнения работ по доставке и монтажу энергетических установок, подрядчик должен разработать несколько сценариев дальнейшего обслуживания этих установок, их последующей реконструкции или замены. Так, на большом количестве объектов теплогенерации в России котельные установки уже выработали свой ресурс. Причем они вводились в эксплуатацию 50, а то и 60 лет назад, и тогда, очевидно, не думали о том, как будет производиться их модернизация. Например, замена барабанов котла, которая требует нестандартных решений. Необходимость решения таких задач может вызвать как увеличение сроков производства работ, так и увеличение стоимости.

Выбор подрядчика

Предприятия российского ТЭК — крупные компании, соблюдающие строгие стандарты и регламенты внутренней работы, и предъявляющие соответствующие требования к подрядчикам. К тому же эта



отрасль находится под пристальным вниманием регулирующих органов, поэтому участники рынка должны соответствовать предъявляемым к ним требованиям. Компании, оказывающие услуги по транспортировке, монтажу и демонтажу энергетических установок, также должны отвечать требованиям таких стандартов работы, в том числе и в области ОТиПБ.

При выборе подрядчиков для проведения такелажных работ на предприятиях ТЭК стоит обратить внимание на реальный опыт, численность и квалификацию персонала компании. Для изучения инженерных компетенций подрядчика можно запросить визуализацию плана реализации заказа на схемах, рисунках, 3D-моделях, а также уточнить наличие собственного парка необходимой техники. Если у компании в наличии только пара грузоподъемных машин, существует большая вероятность того, что при выполнении задачи будет задействован субподрядчик, а это существенно увеличит сроки реализации работ и принесет дополнительные риски. Учитывая, что большинство предприятий ТЭК относятся к государственному сектору, стоит удостовериться также и в том, что подрядчик имеет возможность заключать госконтракты.

УДК 681.11.031

Применение накопителей для распределенной электроэнергетики

Шульга Р. Н., канд. техн. наук,

Смирнова Т. С.,

ВЕИ – филиал ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина», г. Москва

Выполнен сопоставительный анализ наиболее применяемых и развиваемых накопителей электрохимического и водородного типа, которые применяются в малой и распределенной энергетике в диапазоне мощностей от 1 кВт до 30 МВт. Ускоренное развитие указанных накопителей обусловлено потребностями домашних хозяйств, транспорта, энергоснабжения в условиях отсутствия или отказа от централизованного энергоснабжения. Показано, что водородные накопители имеют наиболее высокую удельную энергоемкость, в три раза превышающую энергоемкость жидких углеводородов и во много раз превышающую энергоемкость электрохимических накопителей. Натрий-сернистые аккумуляторы обладают наибольшей удельной энергоемкостью до 500–700 Вт·ч/кг сравнительно с 200 кВт·ч/кг для литий-ионных аккумуляторов ЛИА, имеют большой ресурс и срок службы, но за счет меньшей тиражируемости дороже и реже применяются на транспорте. Литий-ионные аккумуляторы благодаря достаточно высокой энергоемкости, сравнительно низкой стоимости до 250 долл./кВт·ч, благодаря высокой тиражируемости и применению на транспорте выгодно отличаются от других типов аккумуляторов.

Ключевые слова: накопитель, распределенная энергетика, аккумуляторная батарея, топливный элемент, водород.

APPLICATION OF STORAGE DEVICES FOR DISTRIBUTED ELECTRIC POWER INDUSTRY

Shulga R. N., PhD of technical sciences,

Smirnova T. S.,

VEI – branch of FSUE "Academician Zababakhin RFNC – VNIITF", Moscow

A comparative analysis of the most widely used and developed electrochemical and hydrogen type storage devices, which are used in small and distributed power generation in the power range from 1 kW to 30 MW, has been performed. The accelerated development of these storage devices is due to the needs of households, transport,

and energy supply in the absence or rejection of centralized energy supply. It is shown that hydrogen storage devices have the highest specific energy intensity three times higher than the energy intensity of liquid hydrocarbons and many times higher than the energy intensity of electrochemical storage devices. Sodium-sulfur batteries have the highest specific energy consumption of up to 500–700 Wh/kg compared with 200 kWh/kg for LIA lithium-ion batteries, have a longer life and service life, but due to lower replication, they are more expensive and less often used in transport. Lithium-ion batteries due to their sufficiently high energy consumption, relatively low cost up to \$ 250 /kWh differs favorably from other types of batteries due to its high replicability and use in transport.

Keywords: storage device, distributed energy, rechargeable battery, fuel cell, hydrogen.

Прогресс в разработке новых технологий генерации, транспорта, распределения и потребления электроэнергии привел к необходимости пересмотра представлений в части энергоснабжения. Преимущественное централизованное энергоснабжение для городских и густозаселенных районов оказалось более затратным для сельских регионов, а для громадных просторов Арктики, Сибири и Дальнего Востока – а это две трети территории страны – вообще не приемлемы. Рост энерготарифов в связи с обновлением инфраструктуры энергетики, освоением ВИЭ и новых территорий, требования экологии и другие факторы привели к стремительному росту распределенной энергетики в составе как традиционных источников, так и ВИЭ, которые из-за стохастического характера не могут быть использованы без накопителей электроэнергии НЭЭ. Наличие НЭЭ переводит ВИЭ из резервных источников в базисные, экономя топливо традиционных источников и снижая горячий резерв в централизованной энергетике.

Применение НЭЭ вначале было использовано на транспорте, затем в домашних хозяйствах, в промышленности и энергетике. С точки зрения потребителей распределенная и малая энергетика занимает диапазон мощностей от 1 кВт до 30 МВт и развивается ускоренным темпом во всем мире в значительной мере благодаря прогрессу в разработке НЭЭ. Разнообразие типов НЭЭ столь значительно, и их совершенствованию и описанию

посвящено множество литературы, патентов, устройств.

Целью настоящей работы является сопоставительный анализ наиболее применяемых и развиваемых накопителей электрохимического и водородного типа, которые применяются в распределенной энергетике.

1. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА НЕКОТОРЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Для первоначального анализа целесообразно сравнить наиболее употребительные виды топлива по удельной энергетической емкости (кВт·ч/кг) при его полном сгорании, которое приведено в табл. 1 [1].

Таблица 1

Энергетическая удельная емкость топлива

| Топливо | Энергетическая емкость (кВт·ч /кг) |
|-------------------|------------------------------------|
| Антрацит | 9,08–9,32 |
| Пропан-бутан | 10 |
| Нефть | 11,63 |
| Бензин | 12,8 |
| Дизельное топливо | 11,84 |
| Водород | 33,58 |

Удельные энергоемкости топлива значительно (примерно более чем в 50 раз) превосходят энергоемкость накопителей электроэнергии НЭЭ.

Удельные энергетические емкости электрохимических и водородных накопителей электроэнергии НЭЭ

| Накопитель энергии | Характеристики возможной реализации накопителя | Запасенная энергия, кВт·ч | Удельная энергетическая емкость, Вт·ч/кг | Максимальное время работы на нагрузку 100 Вт, мин. | Объемная удельная энергоемкость, Вт·ч/дм ³ | Срок службы, лет |
|--------------------------------------|--|---------------------------|--|--|---|------------------|
| Конденсаторный (СК) | Батарея емкостью 1 Ф, напряжением 250 В, массой 120 кг | 0,00868 | 0,072 | 5,2 | 0,0868 | До 20 |
| Свинцово-кислотный аккумулятор (АБ) | Емкость 190 А·ч, выходное напряжение 12 В, масса 70 кг | 1,083 | 15,47 | 650 | 60–75 | 3...5 |
| Баллон с водородом (H ₂) | Объем 50 л., плотность 0,09 кг/м ³ , степень сжатия 10:1 (масса 0,045 кг) | 1,5 | 33 580 | 906,66 | 671 600 | Более 20 |
| Баллон с пропан-бутаном (СПГ) | Объем газа 50 л, плотность 0,717 кг/м ³ , степень сжатия 10:1 (масса 0,36 кг) | 3,6 | 10 000 | 2160 | 200 000 | Более 20 |
| Канистра с дизельным топливом | Объем 50 л (=40 кг) | 473,6 | 11 840 | 284 160 | 236 800 | Более 20 |

В табл. 2 приведены для сопоставления удельные энергетические емкости наиболее распространенных электрохимических и водородных накопителей энергии и сроки службы с учетом их типовой реализации (последние две строки в этой таблице добавлены для сравнения с традиционными энергоносителями).

Приведенные в этой таблице цифры носят примерный характер, т. к. не учтены многие факторы, например, КПД электрогенератора, объем и вес необходимого оборудования и др. Однако эти цифры позволяют дать первоначальную оценку потенциальной энергоемкости различных видов накопителей энергии. Энергоемкость водорода в 3 раза выше, чем жидких углеводородов (нефти, бензина, дизельного топлива), а также сжатого природного газа СПГ. Энергоемкость традиционных свинцово-кислотных аккумуляторов АБ в 6000 раз ниже водорода, а для конденсаторов СК вообще несопоставима.

Как следует из приведенной таблицы, наиболее эффективным видом накопителя представляется баллон с водородом. Если

для получения водорода используется «дармовая» (избыточная) энергия из возобновляемых источников ВИЭ, то именно водородный накопитель оказывается самым перспективным [2].

Водород может использоваться в качестве топлива в обычном двигателе внутреннего сгорания, который будет вращать электрогенератор, либо в водородных топливных ячейках, которые непосредственно производят электроэнергию. Способ выгоднее, требует уже отдельного рассмотрения. Вопросы безопасности при производстве и использовании водорода должны учитываться при рассмотрении целесообразности применения определенного вида НЭЭ, например, в опубликованном в *esonet.ru*. В то же время применение водородных НЭЭ предпочтительно с точки зрения снижения выбросов диоксида углерода и других примесей. Решающим фактором, однако, является развитие инфраструктуры добычи, переработки, транспортировки и регазификации СПГ как основного источника водорода.

2. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ НАКОПИТЕЛИ НЭЭ

2.1. Свинцово-кислотные аккумуляторы

Свинцово-кислотные аккумуляторы АБ, появившись первыми, получили наибольшее распространение на транспорте и благодаря тиражированию являются самыми дешевыми НЭЭ. Их преимуществами являются: отработанная технология, невысокий саморазряд – 3–10% в месяц, относительно простая система обслуживания.

Недостатками являются: низкая удельная энергоемкость – 35 Вт·ч/кг, средний КПД – 85%, количество циклов – до 2000, а также жесткие требования по экологической безопасности при утилизации.

2.2. Натрий-сернистые аккумуляторы

Преимуществами натрий-сернистых аккумуляторов являются: большая емкость – 700 Вт·ч/кг, средний КПД – 85%, относительно большой ресурс – 5000 циклов, высокое быстродействие – 1 мс, относительно низкий саморазряд, экологическая безопасность за счет применения герметичных элементов. Налажено серийное производство и имеется значительный опыт эксплуатации в течение более 15 лет. Перспективны для больших мощностей на уровне 100 МВт с временем разряда до 6 час.

Недостатками являются: относительно высокая стоимость и высокая рабочая температура.

2.3. Ванадий-редоксные (проточные) аккумуляторы

Преимуществами проточных аккумуляторов являются: высокая емкость благодаря большому запасу электролита 80 Вт·ч/кг, средний КПД – 80%, большое количество циклов, превышающее 10 000, длительный срок службы составляет 10–20 лет, а также высокое быстродействие на уровне 1 мс.

Недостатками являются: высокая стоимость, отсутствие серийного производства, причем единичные установки в мире

выполняются на мощность 4–100 МВт с временем разряда до 2–6 час.

2.4. Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА)

Преимуществами литий-ионных аккумуляторов являются: наибольшая плотность энергии из всех разновидностей аккумуляторов – как объемная, так и весовая до 200 Вт·ч/кг, а также быстрый процесс заряда батарей – до 80% емкости за 30–40 мин. ЛИА имеют низкий показатель саморазряда – до 5% в месяц и могут утилизироваться без предварительной переработки.

Недостатками ЛИА являются: возможность взрыва при механическом повреждении или перезарядке аккумулятора. Достаточно быстрое старение аккумулятора – большинство аккумуляторов резко снижают свои характеристики при хранении или использовании в течение более 5 лет.

Для создания аккумуляторных батарей требуется сложная система управления батареей. ЛИА имеют относительно высокую стоимость, превышающую АБ примерно в 5 раз.

В настоящее время литий-ионные аккумуляторы являются одним из самых массовых промышленных продуктов в мире в качестве перезаряжаемых химических источников тока (ХИТ). Их количество, типы и сферы применения постоянно увеличиваются. Транспорт, системы безопасной эксплуатации важнейших объектов являются теми сферами применения, в которых литий-ионные батареи активно вытесняют традиционные ХИТ.

Эта система демонстрирует относительно длительный срок службы (примерно 5 лет), большую цикличность до 5000 циклов, высокую надежность и безопасность, широкий температурный диапазон применения, высокие удельные энергетические и мощностные характеристики, низкий саморазряд.

При применении литий-ионных аккумуляторов можно рассчитывать на повышение энергоемкости и мощности батарей при сохранении малой

массы и объема, на достижение более высокого напряжения, снижение саморазряда. Преимуществом этих батарей перед аналогами является герметичность, отсутствие выделения газа, большой показатель цикличности и срок службы.

Литий-ионные батареи допускают форсированный заряд и разряд. Их эксплуатация требует установки средств электронного контроля и управления зарядом и разрядом (СКУ) как на уровне аккумуляторов, так и батареи в целом.

В связи с тем, что применение литий-ионных аккумуляторов позволяет использовать параллельно-последовательное соединение аккумуляторов в батарею по принципу модульной конструкции, на базе одного типоразмера литий-ионного аккумулятора можно осуществлять разработку и изготовление батарей в широком диапазоне электрической емкости и напряжения. Литий-ионные аккумуляторы не допускают переразряда и перезаряда и должны быть защищены от короткого замыкания. Для поддержания высокой разрядной емкости в течение всего периода эксплуатации необходимо выравнивание напряжений последовательно соединенных аккумуляторов, компенсирующее разброс характеристик в период эксплуатации.

От характеристик материалов, используемых для изготовления литий-ионных аккумуляторов и батарей различного назначения (активных катодных и анодных материалов, электролитов, добавок в электролит, сепарационных материалов, электропроводных добавок в активные массы электродов, водных и неводных связующих), определяющим образом зависят технические характеристики конечных изделий.

Для производства литий-ионных аккумуляторов применяются активные электродные материалы, способные обратимо внедрять ионы лития. Перспективные катодные и анодные материалы выбираются по удельным энергетическим и мощностным характеристикам, по ресурсным характеристикам, температурно-

му диапазону эксплуатации, стоимостным показателям.

В настоящее время литий-ионные аккумуляторы с электрохимической системой «литированный смешанный оксид никеля-кобальта-марганца (NMC)/углерод (графит) (C)» наиболее часто используются при изготовлении как высокомоощных, так и энергоемких аккумуляторов, что обусловлено оптимальным соотношением «цена/качество». Удельная энергия для высокоэнергоемких литий-ионных аккумуляторов с использованием этого типа электродных материалов составляет от 160 до 200 Вт·ч/кг и от 120 до 150 Вт·ч/кг для высокомоощных аккумуляторов. Удельная мощность у высокомоощных аккумуляторов достигает 2÷4 Вт/кг. Температурный диапазон работоспособности при разряде для лучших образцов этого типа аккумуляторов составляет $-40 \div 60^\circ\text{C}$, при заряде от 0 до 60°C . Высокой мощностью также обладают литий-ионные аккумуляторы с положительным электродом на основе литий-марганцевой шпинели (LMO) и отрицательным электродом на основе неграфитизированного углеродного материала (Soft Carbon (SC) или Hard Carbon (HC)).

Реже применяют аккумуляторы с катодом на основе литированного фосфата железа (LFP), у которых показатель удельной энергии по массе не превышает 110 Вт·ч/кг, а температурный диапазон ограничивается разрядом при -20°C . Однако они конкурентны по стоимости 1 Вт·ч со свинцово-кислотными аккумуляторами.

Несколько компаний производят литий-ионные аккумуляторы с отрицательным электродом на основе титаната лития (LTO). Данные аккумуляторы имеют относительно низкую удельную энергию (порядка 70 Вт·ч/кг), имеют существенно более высокую, чем у конкурентов стоимость 1 Вт·ч, однако им свойственна способность заряжаться большими токами при низких температурах (заряд при температуре -40°C).

Количество полных циклов заряд-разряд у литий-ионных аккумуляторов ве-

дущих производителей составляет от 1000 до 5000, сроки хранения и эксплуатации – 5–8 лет.

Для всех типов литий-ионных аккумуляторов характерны свои среднеразрядные напряжения: NMC/C (3,6–3,7 В), LFP/C (3,2–3,3 В), LMO/HC или SC (3,6 В), NMC(LMO, LCO)/LTO (2,3–2,4 В). Также существенно отличается и форма разрядных кривых. Например, аккумуляторы с электрохимическими системами NMC/графит и LMO/неграфитизированный углерод имеют практически одинаковое среднеразрядное напряжение. За счет более существенного изменения потенциала неграфитизированного углерода в процессе введения/выведения лития из структуры напряжение аккумулятора снижается/увеличивается в сильной степени в зависимости от заряженности литий-ионных аккумуляторов. В этой связи формы зарядных/разрядных кривых литий-ионных аккумуляторов для систем NMC/графит и LMO/неграфитизированный углерод будут отличаться, и это должно учитываться при разработке систем контроля батарей.

Выбор используемых при производстве литий-ионных аккумуляторов активных материалов, технологий и конструкций определяется техническими и экономическими требованиями к накопителю электрической энергии, в состав которого входит аккумуляторная батарея.

Различные производители выпускают литий-ионные аккумуляторы различной конструкции. Например, широко применяют цилиндрические аккумуляторы. Ряд компаний отдадут предпочтение литий-ионным аккумуляторам в корпусе из ламинированной фольги. Имеются производители, применяющие призматические литий-ионные аккумуляторы в пластмассовых и металлических корпусах.

Отечественный и зарубежный опыт позволяет разрабатывать и изготавливать литий-ионные батареи требуемой электрической емкости и напряжения, работающие при различной токовой нагрузке с характерным временем разряда от нескольких минут до сотен часов.

Ведущие мировые производители в настоящее время изготавливают базовые батарейные модули (БМ) на базе высокоэнергоемких или высокомошных литий-ионных аккумуляторов различного конструктивного исполнения. С использованием базовых БМ и магистрально-модульного принципа создаются накопители электрической энергии требуемой электрической емкости, мощности и напряжения.

Конструкция базового БМ включает в себя последовательно и/или параллельно соединенные литий-ионные аккумуляторы, систему контроля и управления и корпус. Конструкция БМ может предусматривать воздушное или жидкостное охлаждение. При создании стационарных накопителей в основном используется воздушное охлаждение. Для работы при пониженных температурах может использоваться система обогрева.

В настоящее время ведущие мировые производители выпускают широкий спектр БМ в различном конструктивном исполнении для энергоустановок транспортного и стационарного назначения, отличающихся номинальной емкостью и энергией, номинальным напряжением и мощностью.

Номинальное напряжение БМ (обычно от 48 В) выбирается из условий удобства эксплуатации и определяется количеством последовательно соединенных аккумуляторов (кратно среднеразрядному напряжению аккумулятора). Требуемая величина емкости БМ достигается выбором величины электрической емкости базового аккумулятора и/или числом параллельно соединенных аккумуляторов. Мощность и удельная энергия определяются типом используемых аккумуляторов. Для комплектации БМ, в зависимости от требований к скорости разряда, применяются высокоэнергоемкие или высокомошные аккумуляторы.

На базе БМ изготавливают накопители энергии с различной энергией и мощностью в диапазоне от нескольких кВт до десятков МВт. БМ повышенной мощности (ток разряда – 4С, 6С) используются при

Характеристики различных типов АБ

| Параметр | | Вид | Натрий-серные | Ванадий-редоксные | Свинцово-кислотные | Цинк-бромидные | Литий-ионные |
|---|---------|-----|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------------|---|
| Напряжение разомкнутой цепи (НРЦ) | (В) | | 2,08 | 1,4 | 2,0 | 1,8 | 3,4–3,9 |
| Удельная энергоёмкость | Вт·ч/кг | | 350 | 80 | 35 | – | 130 |
| | Вт·ч/л | | | 100 | 40 | – | 150 |
| КПД (%) | | | 85 | 80 | 85 | 80 | 90–95 |
| Температура (С°) | | | 280–350 | 40–80 | 5–50 | 20–50 | –20 – +45 |
| Электролит | | | Твердый композит (керамика+ алюминий) | Раствор оксида ванадия в воде | Серная кислота | Раствор бромида цинка в воде | Не водные (спиртовые) растворы солей лития или полимерные (твердые) электролиты |
| Вспомогательное оборудование (операции) | | | Нагрев | Насос | Добавка воды | Насос | Не требуется |
| Опыт установки | | | > 500 МВт > 400 проектов | – | – | 10 МВт, 10 проектов | 2-ЮМВт – Проекты «Альтаир-Нано»; Проекты в Китае |

изготовлении источников бесперебойного питания (ИБП), обеспечивающих энергоснабжение постоянным и переменным током потребителей. Данный тип ИБП способен обеспечить аварийное и резервное питание в течение 10–15 мин. до включения аварийных ДВС.

Ряд производителей предлагает законченные решения энергоустановок с накопителями энергии в широком диапазоне энергоёмкости и мощности на базе БМ с использованием литий-ионных аккумуляторов. Использование магистрально-модульного принципа при создании накопителей и преобразователей 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. В табл. 3 приведены характеристики АБ различных типов, их применение и вспомогательное оборудование, которые показывают преимущества натрий-сернистых АБ по удельной энергоёмкости, а литий-ионных по КПД, на-

пряженности и рабочей температуре [3]. Более развернутые данные по АБ приведены в [4–6].

3. СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ СК

Современные суперконденсаторы с рабочим напряжением 2,7...2,85 В на основе нанопористых углеродных электродов и органических электролитов широко применяются в технике, благодаря высокой удельной мощности (до 110 кВт/кг) и наработке – более 500 тыс. циклов в течение 100 тыс. час., несмотря на невысокую удельную энергию (5...7 Вт·ч/кг). Современные суперконденсаторы (электрохимические двойнослойные конденсаторы) способны заряжаться и разряжаться большими токами, работоспособны в широком диапазоне температур (–50 ÷ 65 С°), имеют линейную зависимость степени заряженности от напряжения, герметичные, необслуживаемые. Они не имеют конкурентов среди других накопителей электрической энергии при работе в условиях импульсных нагрузок во временном диапазоне 10–2 ÷ 1 с.

Исключительно высокая надежность современных суперконденсаторов на

основе нанопористых углеродных электродов и органических неводных электролитов, в сравнении с другими типами суперконденсаторов (так называемыми гибридными и «молекулярными» суперконденсаторами), связана с отсутствием электрохимических реакций, протекающих на электродах в процессе зарядки и разрядки. В электрохимических двойнослойных конденсаторах энергия на электродах накапливается за счет диффузии и адсорбции ионов в двойном электрическом слое на поверхности электродов под воздействием электрического поля и отсутствуют параллельные электрохимические реакции. Областью применения СК является транспорт и бесперебойное питание ряда ответственных потребителей, например, в составе оперативного тока на подстанциях.

Основные усилия разработчиков современных суперконденсаторов направлены на увеличение удельной энергии и удельной мощности накопителей энергии этого типа.

4. ЯЧЕЙКИ И БАТАРЕИ АБ И СК

Характеристики батареи в первую очередь определяются параметрами элемен-

тов (ячеек). Основными из них являются: удельная мощность, удельная энергия, допустимые токи заряда-разряда в долях емкости C , число выдерживаемых циклов и др. Имеется возможность оптимизации параметров: так, литий-никель-кадмий-алюминиевые (NCA) обеспечивают наибольшую удельную мощность (до 104 Вт/кг), никель-марганец-кобальтовые (NMC) обеспечивают наибольшую удельную энергию до 180 Вт·ч/кг, а самые широко распространенные литий-железо-фосфатные LiFePO_4 обеспечивают промежуточное положение сравнительно с вышеуказанными типами ЛИА.

На рис. 1, по данным [7], приведены сравнительные характеристики элементов: NCA – зеленым, NMC – желтым, а литий-железо-фосфатные – синим цветом, причем градации элементов фирмы Saft – VL типа U, V, P, M и E – позволяют комплектовать батареи с разными характеристиками. Там же коричневым цветом даны характеристики свинцово-кислотных и никель-кадмиевых элементов, которые значительно уступают показателям ЛИА. Область характеристик конденсаторов большой емкости бледно-желтого цвета существенно уступает ЛИА на порядок

Таблица 4

Характеристики ячеек ЛИА

| Производитель | $U_1, В$ | $C_1, А·ч$ | $C_{уд1}, Вт·ч/кг$ | $n, шт.$ | $m, шт.$ | $K, шт.$ | $m_1, шт.$ | $L_{разр}/имп.$ | $M, кг$ |
|---|----------|------------|--------------------|----------|----------|----------|------------|-----------------|---------|
| Saft BA 685 A | 30 | 13,6 | 95 | 14 | 750 | 10490 | 3 | 3С/8С | 31 470 |
| Ригель 10НМГ-ГЦ-150 Никель-металл | 12 | 7,5 | 30 | 34 | 1401 | 47619 | 2,1 | 0,2С/2С | 100 000 |
| Ригель 14ЛИК-ГП-150 Литий-ион | 25,2 | 260 | 61 | 16 | 41 | 654 | 75 | 0,2С/2С | 49 050 |
| Литий-ионный аккумулятор Лиотех 300LT-LFP300 | 3,2 | 300 | 101 | 125 | 36 | 4464 | 9,5 | 3С | 42 408 |
| Absolyte GP 1-100G75 | 2 | 3600 | | 200 | 3 | 600 | 276 | | 165 600 |
| ВАИТ 24ВАИТ250 | 38,8 | 58,33 | 125 | 11 | 173 | 1894 | 12,7 | | 24 054 |

Примечания: U_1 – номинальное напряжение ячейки; C_1 – емкость; $C_{уд1}$ – удельная энергоемкость; n, m, K – соответственно число последовательных, параллельных и общее число ячеек в батарее; m_1, M – соответственно масса ячейки и батареи.

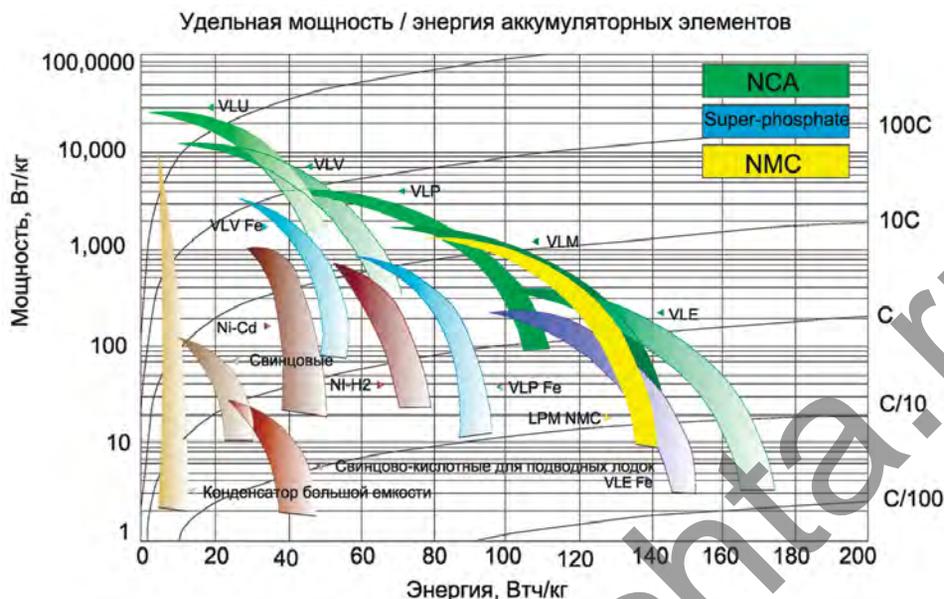


Рис. 1. Зависимости удельной мощности, Вт/кг, удельной энергии, Вт·ч/кг, тока заряда, доли емкости C , А·ч, элементов типа VL для ЛИА фирмы Saft (США) с разными характеристиками: U, V, P, M, E [7]

и более в части удельной энергии, но в части разрядных токов сопоставимы и достигают 10–100 С.

Исходными величинами для расчета батареи являются: напряжение и ток нагрузки, а также время ее работы от аккумуляторной батареи. Необходимое напряжение аккумуляторной батареи должно соответствовать напряжению питания нагрузки. Количество элементов батареи в соответствии с [8] рассчитывают по формуле:

$$N = \frac{U_n}{U_{эл}}$$

где U_n – напряжение нагрузки;

$U_{эл}$ – напряжение заряженного элемента батареи.

При выборе емкости батареи следует учитывать тип нагрузки, режим работы батареи и время непрерывной работы при питании нагрузки от полностью заряженной батареи.

Емкость, которую должна выдавать АБ, рассчитывается исходя из количества электроэнергии в Вт·ч, потребляемого от АБ в режиме разряда [9].

При наличии нескольких секций батареи количество энергии в них складывается. Диапазон поддержания напряжения

элемента и ячейки составляет 20–80 % от номинального значения. Расчет числа ячеек K и их массы M выполняется применительно к батарее, выдающей мощность 1 МВт в течение трех часов для покрытия пика нагрузки и ликвидации вращающегося резерва; результаты расчета приведены в табл. 4.

В табл. 4 приведены характеристики ячеек, ориентировочные значения количества ячеек K и их массы M батарей без учета секционирования. В верхней части таблицы приведены литий-ионные ячейки фирм: Saft (США) [7], Ригель и Лиотех (Россия) [10, 11] с суммарной массой соответственно от 30 до 40 т (меньшее значение в основном за счет пластмассового корпуса Saft). В нижней части таблицы для сопоставления приведены лучшие из кислотных аккумуляторов AGM (Абсолют GP, Германия) [12] с массой 165 т, что неприемлемо для контейнерного исполнения. В самой нижней строке таблицы приведены характеристики воздушно-алюминиевых источников тока (ВАИТ), которые характеризуются наименьшей сухой массой 24 т, наименьшей стоимостью, наибольшим ресурсом, числом циклов и отсутствием зарядных цепей. Но ВАИТ требуют механической заливки

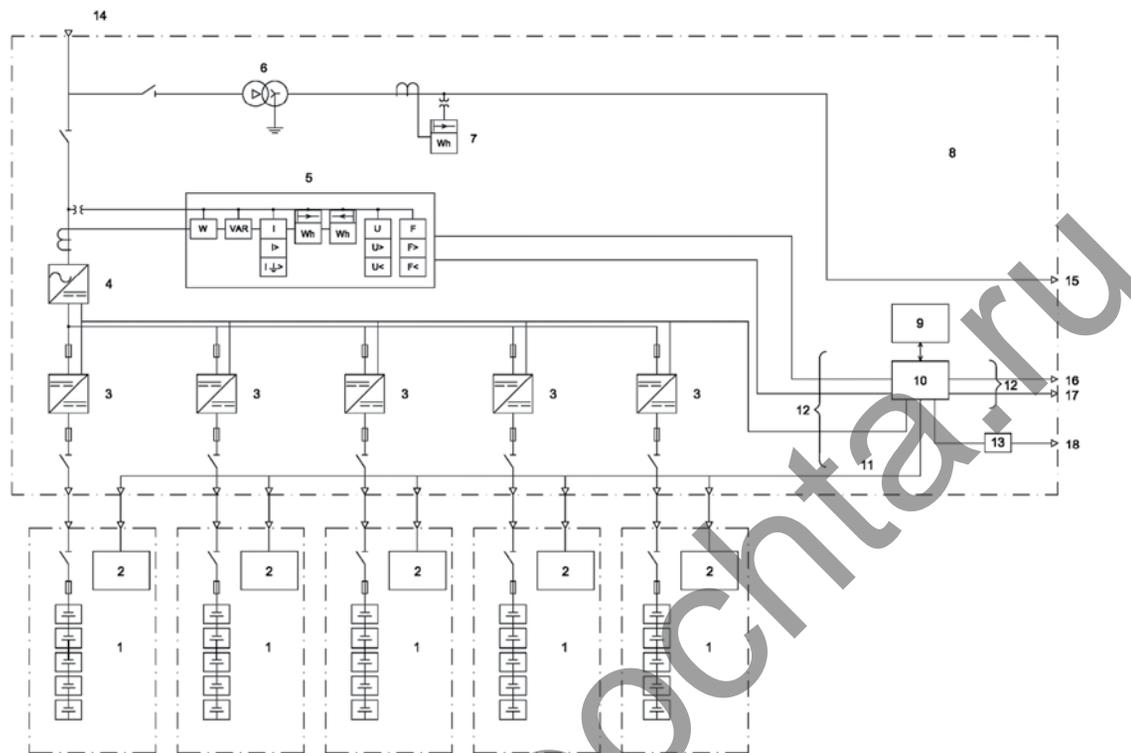


Рис. 2. Структурная схема системы аккумулирования контейнерного типа [6]

щелочным или соевым раствором (интервал готовности к разряду 15–20 мин., что недопустимо для ряда применений, однако, может быть использован в комбинации с другими источниками в виде ЛИА, несмотря на то, что разрядный ток ВАИТ из-за высокого сопротивления ограничен и требуется применить 173 параллельные секции) [13].

Наиболее перспективными для применения являются модули ССК групп (Москва) [14] на 880 В емкостью 80 А·ч, массой 601 кг, которые обеспечивают массу батареи менее 30 т. В ближайшей перспективе благодаря переходу от трубчатой к планарной технологии изготовления элементов, предлагаемых СК ТЭЭМП (Москва) [15], удастся существенно снизить массогабаритные показатели батареи. Модули (секции) батареи постоянным напряжением несколько сотен вольт и мощностью от 200–400 кВт для применения в энергетике требуют преобразования в переменный ток с помощью обратимых IGBT-преобразователей.

На рис. 2 приведен один из вариантов системы аккумулирования контейнерного

типа с литиевыми батареями (ЛИА) мощностью 1 МВт [16]. Принимаются следующие обозначения: 1 – секция НЭЭ 200 кВт, напряжением = 600–800 В; 2 – СКУ секции; 3 – DC/DC-преобразователь 200 кВт, 340 А; 4 – инвертор 1300 кВА, 1100 А; 5 – микропроцессорный терминал; 6 – трансформатор 500 кВА, напряжением 620/400 В; 7 – счетчик, Вт·ч; 8 – СКУ контейнера DC 5×200 кВт/AC 1200 кВА; 9 – контроллер СКУ контейнера; 10 – системный контроллер; 11 – шина CAN; 12 – шины Modbus; 13 – модем GPS/ГЛОНАСС; 14 – вход, 1350 кВА, напряжением 620 В; 15 – выход, 500 кВА, напряжением 400 В, частотой 50 Гц; 16 – система управления системы; 17 – SCADA; 18 – вход модема GPS/ГЛОНАСС.

Возможен другой вариант системы, когда инвертор 4 заменяется на инверторы 3 соответственно в 5 раз меньшей мощности, но это удорожает их и усложняет элементы 9, 10, а также заменяет шину постоянного тока модулей на шину переменного тока с проблемами синфазирования и синхронизации. Трансформатор 6 в зависимости от нагрузки может выполняться на мощность до 1000 кВА.

Работа системы заключается в зарядке батареи с помощью инвертора 4 в режиме выпрямителя, разряде батареи переводом 4 в режим инвертора или работе в режиме компенсатора реактивной мощности для поддержания стабильного напряжения сети. Если компенсация реактивной мощности не требуется, то инвертор 4 может выполняться на тиристорах (фототиристорах), работая в 1 и 4 квадрантах диаграммы активной-реактивной мощности, что позволяет упростить систему резервного энергоснабжения, если она не является пассивной. Число секций может изменяться от 5 до 3 соответственно при изменении их мощности от 200 до 400 кВт. Длительность работы батареи в режиме разряда зависит от их энергоемкости и условий применения, и, например, для покрытия пиков нагрузки составляет 3 часа. СКУ контейнера 8 и СКУ секции 2 обеспечивают управление зарядом-разрядом, контроль, балансировку и защиту контейнера, модулей и ячеек. Микропроцессорный терминал 5 обеспечивает реализацию функций РЗА, а также поддержание в заданных пределах тока, напряжения и частоты.

Преобразователь 3 согласует выходное напряжение секции 1 и входного напряжения инвертора 4. Контроллер СКУ контейнера 9 связан с системным контроллером 10, который, получая сигналы от модема GPS 13, системы управления энергосистемы 16, СКУ секций 2, терминала 5, выдает сигналы на верхнюю систему управления SCADA 17 и осуществляет управление режимом контейнера.

На рис. 3 приведена структурная схема СКУ секции НЭЭ, соответствующая на рис. 2 позициям 1, 2, где принимаются следующие обозначения: 1 – источник АС 85–265 В; 2 – выпрямитель; 3 – выключатель; 4 – датчик напряжения; 5 – датчик тока; 6, 7 – полевые транзисторы; 8 – драйверы; 9 – контроллер заряда-разряда; 10 – интерфейсы связи оптические; 11 – ждущий режим; 12 – источник питания; 13 – контроллер секции; 14 – контроль изоляции; 15 – датчик температуры; 16 – защита секции; 17 – система контроля и управления (СКУ) блока; 18 – блок (более 16 элементов).

От источника АС 1 напряжение через выпрямитель 2 и выключатель 3 подается на полевые транзисторы 6 и 7, осу-

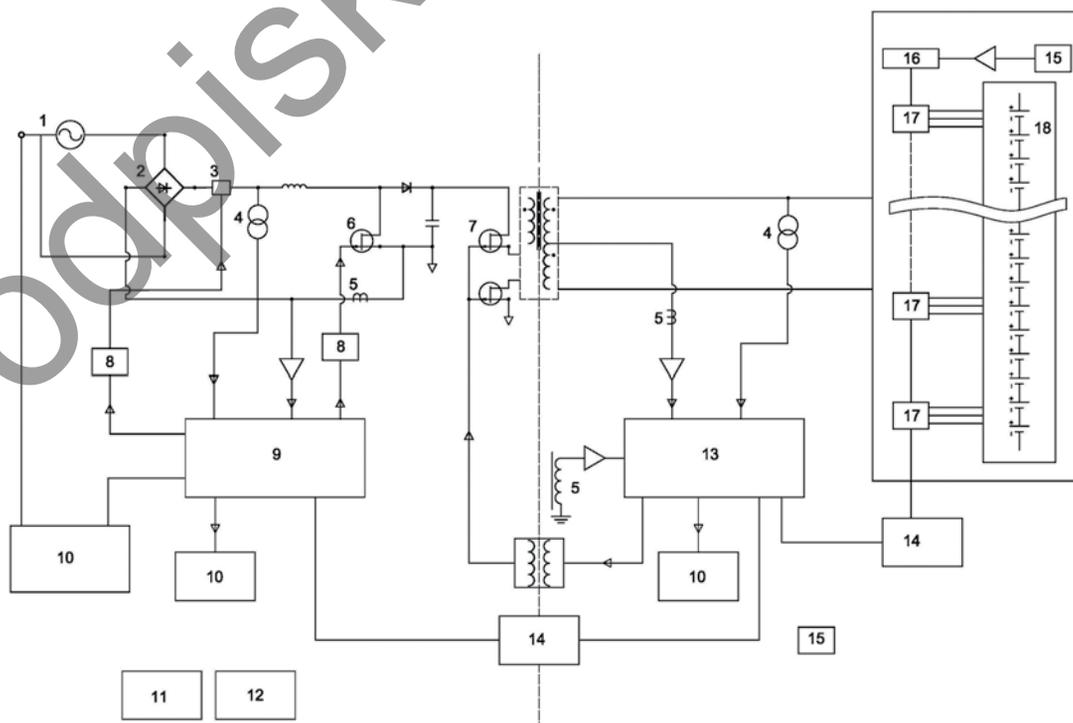


Рис. 3. Структурная схема системы контроля и управления СКУ секции НЭЭ

существляющие заряд-разряд ячейки 18, содержащие от 16 и выше элементов ЛИА, которая гальванически развязана от СКУ секции с помощью изолирующих трансформаторов. Контроллер заряда-разряда 9 через драйвер 8 обеспечивает управление транзистором 6 для стабилизации питающего напряжения, контроллер секции 13, получая сигналы от контроллера 9 от датчиков изоляции 14 и температуры 15, а также датчиков тока 5 и напряжения 4, осуществляет управление и контроль блока 18. Внутри ячейки 18 датчик температуры 15 через усилитель связан с контроллером защиты 16, который задает режим работы СКУ блока 17. СКУ блока 17 выполнена в виде однокристалльной микросхемы, которая контролирует ток заряда-разряда, допустимое напряжение каждой из ячеек внутри блока и осуществляет балансировку напряжений по ячейкам. С помощью оптических интерфейсов связи 10 осуществляется передача сигналов из источника питания 12, который может быть переведен в режим ожидания 11. Наибольшие по мощности и энергоемкости, определяемой длитель-

ностью разряда соответственно 100 МВт и 3/6 час., приведены в [17].

5. ВОДОРОДНЫЕ НАКОПИТЕЛИ

Водородные накопители электроэнергии конструктивно изготавливаются в виде топливных элементов (ТЭ), в основу классификации которых положен тип электролита (жидкий, газообразный, твердый) с характеристиками, приведенными в табл. 1. Для ВНЭ используют получаемый при электролизе воды водород, запасаемый в резервуарах при высоком давлении (до 600 атм.) для мембранных ТЭ, либо природный газ, подаваемый по трубе для твердооксидных ТЭ (ТОТЭ). Запасание водорода может производиться в баках и подземных хранилищах в жидком (криогенном) виде, в гидридных пористых материалах (металлогидридные системы накопления).

Вид электролита определяет тип химической реакции, рабочую температуру, мощность и КПД ТЭ.

Наиболее распространенным ТПТЭ является PEM на основе протообменной мембраны толщиной примерно 0,2 мм,

Таблица 5

Характеристики ТЭ

| Тип ТЭ (электролит) | Рабочая температура, °С | Мощность на выходе, кВт | КПД, % | Особенности | Область применения |
|--|-------------------------|-------------------------|---|--|--|
| Алкалин (AFC) | 90...100 | 10...100 | 60...70 электрический | | Военная, космос |
| Полимерная или протообменная мембрана (PEM) ТПТЭ | 50...100 | ≤ 250 | 50...60 электрический | Быстрый старт | Портативные устройства, транспорт, распределенная генерация |
| Фосфорная кислота (PAFC) ФКТЭ | 150...200 | 50...1000 (250-модуль) | 80...85 комбинированный 36...42 электрический | Пластины большого размера, чистый водород | Распределенная генерация |
| Литой углерод (MCFC) КРТЭ | 600...700 | < 1000 (250-модуль) | 85 комбинированный 60 электрический | Гибкость, разные катализаторы | Электроэнергетика, большая распределенная генерация |
| Твердые окислы (SOFC) ТОТЭ | 650...1000 | 5...3000 | 85 комбинированный 60 электрический | Гибкость, разные катализаторы, низкая коррозия | Вспомогательное питание, электроэнергетика, большая распределенная генерация |

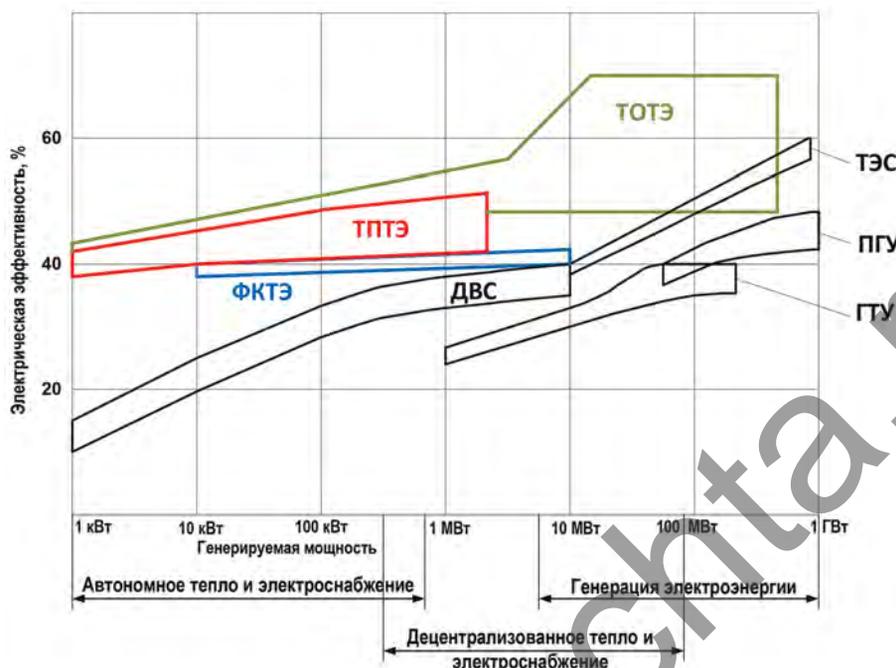


Рис. 4. Электрическая эффективность НЭЭ в зависимости от мощности установок и области применения различных типов топливных элементов

которая заключена между двумя электродами (анодом и катодом), с которых снимаются соответственно электроны и ионы, поступающие во внешнюю цепь (в нагрузку).

По закону Фарадея электрохимический потенциал водорода равен 1,48 В. В ТЭ происходит синтез H и O при температуре 25 °С, которые превращаются в воду H₂O, создавая потенциал $U = 1,23$ В. Разница потенциалов между электродами PEM – 0,95...1,0 В (из-за потерь на поляризацию). Конструктивное напряжение на ТПТЭ составляет 0,75 В (в пределах 0,6...0,8 В). Таким образом, средняя эффективность (КПД) ТПТЭ – $0,75 \text{ В} / 1,48 \text{ В} = 50\%$.

Напряжение х.х. ТПТЭ равно 1,16 В при температуре 80 °С и давлении 1 атм., а рабочее напряжение при выработке электричества равно 0,7 В при электрическом КПД 50%. Рабочее напряжение при комбинированном использовании ТЭ составляет 0,9 В (КПД 77%), причем КПД по теплу составляет от 22 до 40%.

Электрическая эффективность (КПД, %) в зависимости от мощности установок (МВт) и области применения для различных типов топливных элементов и источ-

ников показана на рис. 4 [4], где принимаются следующие обозначения топливных элементов в виде цветных линий: ТОТЭ – твердооксидные, ТПТЭ – протообменные мембранные, ФКТЭ – фосфорно-кислотные; источников в виде черных линий: ТЭС – тепловые электростанции комбинированного типа, ПГУ – парогазовые установки, ГТУ – газотурбинные установки, ДВС – двигатели внутреннего сгорания. Видно, что во всей зоне мощностей твердооксидные накопители ТОТЭ имеют наивысшие показатели. Еще более высокие показатели имеют кинетические накопители, КПД которых достигают уровня 85% при длительности хранения до 5 час.

Распределенная генерация находится в диапазоне от 1 кВт до 30 МВт и практически охватывает два нижних поддиапазона автономного и децентрализованного тепло- и энергоснабжения. Видно, что накопители во всей зоне распределенной генерации имеют практически вдвое более высокий КПД, нежели традиционные источники (сравнить цветные и черные линии), при том что их экологические показатели в части выброса диоксида угле-

рода существенно ниже или практически отсутствуют.

Для НЭЭ наиболее характерным показателем является удельная энергия (энергоемкость), Вт·ч/кг, и в меньшей степени удельная мощность, кВт/кг. На рис. 5 приведены усредненные показатели удельной мощности и удельной энергии для различных типов НЭЭ, которые показывают, что АБ в части ЛИА на сегодня достигают 150–200 Вт·ч/кг (для больших батарей вдвое ниже), в то время как ТЭ в части ТОТЭ достигают 500 и даже 1000 Вт·ч/кг, т. е. в 5 раз выше. Удельная мощность наибольшая для СК, но их время разряда невелико и составляет десятки минут, что позволяет их использовать только в системах оперативного тока и в качестве составных элементов с ЛИА для устранения быстрых колебаний напряжения типа фликера. Удельная мощность источников пока составляет примерно 1000 Вт/кг для ГТУ и примерно в 5 раз выше, чем для АБ и ТЭ, что затрудняет применение последних в авиации и автотранспорте.

Применение НЭЭ для распределенной генерации резко возрастает благодаря широкому распространению ВИЭ, стремлению к экономии топлива и улучшению

экологических показателей. Из рис. 4 следует, что непосредственная выработка электроэнергии в НЭЭ вдвое выигрышней, нежели при сгорании топлива в традиционных источниках, и только ограничения по массогабаритным показателям и по инфраструктуре замедляют распространение АБ и ТЭ.

На сегодня известен НЭЭ на ТПТЭ мощностью 250 кВт, выдающий энергию в течение 8 час., в котором используется два бака с жидким электролитом емкостью 140 т. Площадь НЭЭ составляет 200 кв. м, рабочая температура – 5...40°C, быстродействие – менее 5 мс. НЭЭ применяется для стабилизации напряжения в энергосистеме 25 кВ при напряжении на выходе 480 В и длительности провала напряжения до 30 мин.

Накопители на ТОТЭ наиболее динамично развиваются, используют дешевый природный газ любого состава (в отличие от ТПТЭ, где водород должен быть чистым и полученным путем электролиза) и имеют широкий рыночный потенциал. ТОТЭ на основе диоксида циркония имеют анод, катод и электролит из керамики, способны работать при температурах 650...1000°C без дорогой и чувствитель-

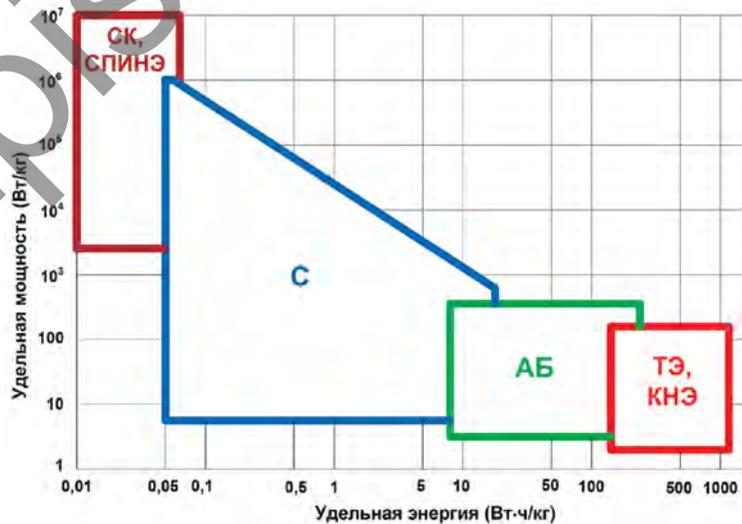


Рис. 5. Удельная мощность, Вт/кг, и удельная энергия, Вт·ч/кг, для НЭЭ различного типа, где СК – суперконденсатор; СПИНЭ – сверхпроводящий индуктивный накопитель; С – электролитический конденсатор; АБ – аккумулятор; ТЭ – топливный элемент; КНЭ – кинетический накопитель

ной к отравлению платины, применяемой в ТПТЭ.

ТОТЭ может работать как генератор, так и как накопитель в стационарном режиме на протяжении ряда лет. Их недостатком является необходимость подогрева топлива и кислорода воздуха до рабочей температуры, что требует применения внешнего микроканального теплообменника. Помимо подогрева в теплообменнике происходит паровой реформинг, в результате чего получаемая на выходе ТОТЭ вода и углекислый газ, реагируя с входящим газом и кислородом при высокой температуре, дают водород и угарный газ, которые играют роль топлива. В результате электрический КПД может превысить 60 %, а суммарный достигает 85 %.

Установленная мощность ТОТЭ изменяется в диапазоне от 2 кВт до 2 МВт и более. Учитывая, что их КПД высок, а транспортные потери электроэнергии практически отсутствуют при автономной установке, ТОТЭ составляет серьезную конкуренцию централизованному энергоснабжению с использованием ТЭС, удельная стоимость установленной мощности которой на сегодня составляет 2000 долл. США/кВт и более. ТОТЭ уже сегодня имеет чуть меньшую стоимость, а в ближайшее время снизятся до 1000 долл. США/кВт. ТОТЭ мощностью около 2 кВт являются основой энергообеспечения домового хозяйства и может стать столь же тиражируемым как мобильный телефон или компьютер.

Преимуществом ТОТЭ является их экологическая чистота, т. к. их выходом является вода, и не требуется разрешения на их применение от органов контроля загрязнения окружающей среды. Существуют три направления применения ТОТЭ:

- в комбинации с ГТУ и ПГУ для повышения КПД и снижения техногенного воздействия на окружающую среду;
- в комбинации с реакторами АЭС в едином агрегате для покрытия пиков нагрузки и для пассивных систем защиты с рекомбинацией водорода;

– использование ТОТЭ как в качестве накопителя в малой и распределенной энергетике в комбинации с ВИЭ, так и в качестве автономных источников, устанавливаемых непосредственно в зданиях и домохозяйствах, для обеспечения их электроэнергией, отоплением и горячим водоснабжением.

Одним из направлений является достигнутое снижение рабочей температуры ТОТЭ до 500 °С, что позволяет расширить номенклатуру используемых конструктивных материалов и делает возможным их быстрый пуск и останов. В результате снижения рабочей температуры значительно уменьшается скорость коррозии и деградации керамики, что положительно влияет на срок службы энергоустановок с ТОТЭ.

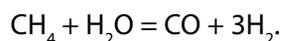
6. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМОСТИ АБ И ТЭ

В настоящее время АБ в виде литиевых батарей развивается опережающими темпами сравнительно с ТЭ в основном для автомобильного транспорта и отчасти авиации. В США и Европе развивается инфраструктура зарядки и обслуживания АБ, в то время как указанная инфраструктура для ТЭ практически отсутствует. Рыночная цена водорода на 2014 г. в США составляет 8,96 долл. на 1 кг, а в перспективе – 3 долл. за 1 кг. Стоимость заправки бака легкового автомобиля – 45 долл., а в перспективе – 30 долл. Стоимость проезда на электромобиле 100 км для Toyota Prius – 2,76 долл., для Tesla S – 2,99 долл., в то время как для водородомобиля несоизмеримо выше.

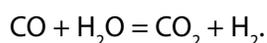
На сегодня в США производится 7,31 млн т водорода, а в год – 2,6 млрд т. При среднем пробеге автомобиля 21,5 тыс. км водорода должно хватить на 12 млн водородомобилей, что явно недостаточно.

Производство водорода с помощью электролиза из метана в 3 раза дороже его производства с использованием паровой конверсии, так что, 95 % водорода

получают с помощью последнего способа. Реакция парового реформинга из метана протекает при температуре 500 °С при взаимодействии с водой и дает на выходе окись углерода в соответствии с формулой:



Реакция конверсии окиси углерода соответствует формуле:



Для получения 1 кг водорода путем электролиза с КПД 75 % надо затратить 52,5 кВт·ч электроэнергии. В результате электромобиль Tesla S затратит 23,75 кВт·ч электроэнергии, а водородомобиль Toyota Mirai затратит вдвое выше – 54,69 кВт·ч для пробега на 100 км. Вдобавок требуются дополнительные траты на транспортировку и компрессию водорода, его добычу с помощью реформинга или электролиза, а также строительства водородозаправочных станций, т. е. развития водородной инфраструктуры. Стоимость строительства одной водородозаправочной станции на 30 автомобилей в день составляет 2 млн долл., а в США пока только 13 таких заправок.

Следующим фактором, ограничивающим распространение водородомобилей, является их стоимость. Так, стоимость в США водородомобиля Toyota Mirai с углепластиковым баком при давлении водорода 680 атм. составляет 62 тыс. долл., т. е. примерно вдвое выше, чем электромобиль Tesla S, однако, запас хода водородомобиля составляет 480 км, а электромобиля – 424 км. Время заправки водородомобиля составляет 3 мин., в то время как для электромобиля равно примерно 40 мин. до емкости 80 % заряда АБ.

Важным фактором распространения водородомобилей является стоимость их перевода для производителей с жидкого на газообразное топливо, стоимость такого перевода невелика и составляет примерно 1 млн долл.

Существенным обстоятельством, благоприятным для распространения водородомобилей является новое законодательство CARB, принятое в США и Европе, которое делает покупку водородомобиля в 5 раз выгоднее приобретения электромобиля. Указанное законодательство учитывает ограниченность запасов лития на планете, трудности его утилизации, ограниченность достижимой энергоёмкости 250–300 Вт·ч/кг скорее является пределом для ЛИА. Тем более кажущаяся экологическая привлекательность электромобилей ограничена относительно низким КПД централизованной электрогенерации (в среднем в мире, по данным МЭА, – на уровне 32%), сопровождаемой выбросом CO₂ и дымовыми газами электростанций.

Для ТЭ, а в особенности ТОТЭ, которые являются, по сути, как источниками, так и накопителями достижения энергоёмкости до 1000 Вт·ч/кг не является проблемой и с учетом высокого КПД до 75 % и практическом отсутствии вредных выбросов их применение особенно предпочтительно. Показателем сказанного является Япония, которая к началу Олимпиады в 2020 г. должна выпустить 40 тыс. водородомобилей, включая общественный транспорт, и перейти на применение водорода для распределенной энергетики. Начинается перевод ж/д сообщения на водородопоезда в Германии и Австрии, широкое использование водородных ТЭ на дронах, а в перспективе – на вертолетах, самолетах и дирижаблях благодаря ресурсу хода и устойчивости к температурным и высотным изменениям.

Для распределенной энергетики в мире и в России наступает переломный момент, связанный с расширением добычи, переработки, хранения, транспортировки и регазификации СПГ, добываемого на Севере, где перспективы водородной энергетики неизмеримо выше, чем для традиционной энергетики. Уже сегодня ресурс хода, срок службы и устойчивость ТЭ с учетом развития средств защиты и безопасности позволяют перевести тра-

традиционные источники вначале на двухкомпонентное топливо, а в перспективе на метан и водород.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ наиболее перспективных для распределенной электроэнергетики накопителей электроэнергии с использованием электрохимических накопителей электроэнергии НЭЭ в виде аккумуляторных батарей АБ разных типов, а также водородных топливных элементов ТЭ. Показано, что для транспорта и распределенной генерации на сегодня наиболее применяемыми являются литий-ионные аккумуляторы ЛИА с достигнутыми показателями энергоемкости 150–200 Вт·ч/кг, которые, однако, уступают натрий-сернистым аккумуляторам энергоемкостью 300 Вт·ч/кг, но более широко применяются благодаря тиражируемости и меньшей стоимости.

Приведены примеры выполнения на базе ЛИА ячеек, секций и батарей контейнерного типа на мощность 1 МВт и время разряда 3 часа для покрытия пиков энергоснабжения, также снижения мощности горячего резерва, стабилизации напряжения и экономии топлива традиционных источников. Приведена структура систем контроля и управления секций и батарей ЛИА, которые требуют контроля темпера-

туры и напряжения в условиях плотной компоновки.

Анализируются характеристики водородных накопителей ТЭ, которые превосходят АБ по ресурсу, сроку службы, условиям эксплуатации и экологическим показателям, но пока еще дороже из-за меньшей тиражируемости и затратам на производство водорода и затратам на создание инфраструктуры. Резкий рост добычи СПГ стимулирует перевод традиционных источников вначале на двухкомпонентное топливо, а в дальнейшем на водород, содержание которого в метане достигает 95%.

Применение ВИЭ в системах энергоснабжения делает оправданным использование НЭЭ, которые заряжаются в ночное время и разряжаются во время пиков нагрузки, снижая установленную мощность генераторов, экономя топливо и снижая выбросы в атмосферу.

Применение водорода из метана в домашних хозяйствах на мощности единицы-десятки кВт является безальтернативным, на транспорте на мощности сотни и тысячи кВт будет осуществляться конкурентное соревнование АБ и ТЭ, а для больших мощностей будет происходить конкуренция между традиционными источниками и ТЭ с возможным их сочетанием для улучшения технико-экономических показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Новиков Н.Л.** Система аккумулирования электроэнергии для обеспечения надежности работы ЭЭС / Н.Л. Новиков, А.Н. Новиков // Энергоэксперт. – 2017. – № 2.
2. Какой накопитель энергии самый энергоемкий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://econet.ru/articles/109310-kakoy-nakopitel-energii-samyu-energoemkiy>
3. **Шакарян Ю.Г.** О применении в электрических сетях накопителей энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sskgroup.ru (дата обращения: 15.04.2019).
4. **Шульга Р.Н.** Накопитель электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов мегаваттного класса мощности / П.В. Боровиков, М.М. Степичев, Б.А. Риэр, Н.Ю. Гетманова, Р.Н. Шульга // Электро. – 2017. – № 3. – С. 38–43.
5. **Шульга Р.Н.** Характеристики накопителей и статических преобразователей // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – № 1. – С. 68–77.
6. **Путилов В.Я., Шульга Р.Н.** Некоторые технические и экологические аспекты применения накопителей электроэнергии в энергетике // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – № 1. – С. 6–12.
7. Литий-ионные системы аккумулирования энергии для крупных оборонных применений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.saftbatterie.com/>

8. **Хрусталеv Д. А.** Аккумуляторы. – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.
9. [Электронный ресурс]. – <http://avtonom.com.ua/akkumulvatornve-batarei/>
10. ООО «Лиотех» (г. Новосибирск). – <http://www.liotech.ru/newsection7159>
11. ОАО «Ригель» (г. Санкт-Петербург). – http://www.rigel.ru/rigel/akk/l_i.html
12. GNB Industrial Power (Германия). – http://www.akuu--vertrieb.ru/upload/iblock/d0c/AGM_03_19.pdf
13. **Коровин Н.В., Клейменов Б.В.** Воздушно-алюминиевые источники тока // Информост «Радиоэлектроника и телекоммуникации». – 2002. – № 6 (24). – С. 62–65.
14. ООО «НПО ССК». – <http://www.sskgroup.ru/files/li-ion.pdf>
15. Компания «ТЭЭМП» (г. Химки). – <http://teemp.ru/products/ehnergetika/setevye-nakopiteli/>
16. **Торри Д., Гатти Э., Брокка К.** Соединение в сеть систем аккумуляирования энергии // Нидек-АСИ, 2016. – 13 с.
17. **Fialka J.** World's Largest Storage Battery Will Power Los Angeles, Climate Wire on July 7, 2016.

НАДЕЖНЫЙ ПРОВОДНИК В МИРЕ ПРИБОРОВ И АВТОМАТИКИ

kip.panor.ru

Производственно-технический журнал «КИП и автоматика: обслуживание и ремонт» для специалистов в области приборостроения, систем промышленной автоматизации, измерительных технологий, компьютерной техники.

Без эффективного обслуживания и ремонта систем КИП и автоматики невозможно организовать современное производство промышленной продукции, обеспечить внедрение новой техники и инновационных технологий. Во всех тонкостях этой работы поможет разобраться данное издание.

Наши эксперты и авторы:

Пахомов В.И., ПО «Спецавтоматика»; **Вьюгов Д.А.**, ООО «КИП-сервис»; «Систем Сенсор Файр Детекторс», **Неплохов И.Н.**, канд. техн. наук; **Телитченко Г.И.** и **Швецов В.Н.**, ВНИИ метрологии; **Алексеев А.А.**, ЗАО «ЭМИКОН»; **Громов Д.Н.**, НПФ «Кон-траВт»; **Леонов Г.В.**, КубГТУ; **Никоенко В.А.**, заслуженный метролог России, ОАО НПП «Эталон»; **Примеров М.С.**, канд. техн. наук; ЗАО «РТ-Софт»; **Андреев В.С.**, ОАО «Элара» и многие другие специалисты в области КИПиА.

Председатель редакционного совета журнала — проф. **Красовский В.Е.**, ученый секретарь Института электронных управляющих машин им. И.С. Брука.

Издается при информационной поддержке Российской инженерной академии, Института электронных управляющих машин, ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева, ВНИИ метрологической службы и Союза машиностроителей.

Ежемесячное издание.

Распространяется по подписке и на отраслевых мероприятиях.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ

- Рынок аппаратуры
- Измерительные технологии и оборудование
- Интегрированные датчики
- Бесконтактные измерения
- Автоматизация
- Автоматика
- Обслуживание и ремонт
- Советы профессионалов
- Метрология

КИП и АВТОМАТИКА
ОБСЛУЖИВАНИЕ
И РЕМОНТ



На правах рекламы

ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ



84818



P7210

Для оформления подписки через редакцию пришлите заявку в произвольной форме по адресу электронной почты podpiska@panor.ru или позвоните по тел. 8 (495) 274-22-22 (многоканальный).