

Когда энергию девать некуда: BESS сегодня и завтра

Юрий Широков

Большие литий-железо-фосфатные ячейки ёмкостью сотни и тысячи ампер-часов становятся одним из ключевых направлений развития стационарных систем накопления энергии. На примере решений EVE Energy, HiTHIUM и BYD рассмотрено, как укрупнение ячеек меняет архитектуру BESS – от количества соединений и требований к BMS до теплового управления, безопасности и экономики эксплуатации. Отдельное внимание уделено роли PCS, EMS и алгоритмов искусственного интеллекта, а также перспективам новых электрохимических систем. Главный вопрос отрасли сегодня заключается уже не в том, насколько большой может быть аккумуляторная ячейка, а в том, где проходит граница между преимуществами укрупнения и ростом технических рисков.

Введение

Представим аккумулятор, способный хранить около двух киловатт-часов энергии. Для электромобиля это лишь небольшой фрагмент батарейного блока, но для смартфона – совершенно недостижимый масштаб. А если таких аккумуляторов собрать десятки тысяч, получится энергетическая установка, способная запастись сотнями мегаватт-часов электроэнергии.

Именно так долгое время и масштабировались крупные системы накопления энергии: необходимую энергоёмкость получали прежде всего за счёт увеличения количества относительно маломощных ячеек. Теперь отрасль постепенно меняет сам принцип масштабирования. Производители делают не только больше батарей, но и увеличивают размер каждой отдельной ячейки.

Если несколько лет назад крупноформатными считались элементы ёмкостью порядка 280–300 А·ч, то сегодня на рынке появились решения на 600, 1000 и более 2000 А·ч. На первый взгляд это выглядит как естественная гонка за большей ёмкостью: чем больше ячейка, тем меньше их потребуется для накопителя той же энергоёмкости.

Но за простой арифметикой скрывается гораздо более интересная инженерная история.

Оказалось, что увеличение ёмкости и физического масштаба ячейки влечёт за собой изменение количества межсоединений, конструкции батарейных блоков, системы охлаж-

дения, требований к BMS (Battery Management System – система управления батареей), силовой электронике, диагностике, безопасности и даже логистике. Иными словами, производители постепенно меняют не отдельный аккумулятор, а архитектуру всей системы хранения энергии.

Один из наиболее заметных примеров – литий-железо-фосфатная ячейка EVE Energy ёмкостью 628 А·ч. На её основе компания создала 5 МВт·ч систему Mr.Giant. В 2025 году такие системы начали применяться в крупном независимом накопителе мощностью 200 МВт и энергоёмкостью 400 МВт·ч в китайском уезде Линшоу. 31 января 2026 года EVE сообщила о подключении объекта к сети; в составе станции – 80 систем Mr.Giant и 40 интегрированных кабин преобразования и повышения напряжения. По данным компании, к началу 2026 года совокупный выпуск её крупноформатных аккумуляторных ячеек превысил 1 млн штук.

При этом 628 А·ч уже нельзя считать пределом. Компания HiTHIUM в 2024 году представила MIC1130Ah – ячейку класса 1 кА·ч, ориентированную на системы длительного хранения энергии. Производитель указывает для неё удельную энергию не менее 180 Вт·ч/кг и ресурс до 15 000 циклов при заданных условиях испытаний.

Ещё дальше пошла BYD с системой Naohan, использующей крупноформатные элементы Blade Battery. В технической документации компа-

нии для одного из вариантов системы указана номинальная энергоёмкость 14 568 кВт·ч и мощность 3,642 МВт. Система использует жидкостное охлаждение, а степень защиты корпуса заявлена на уровне IP66.

Это не означает появления нового формального отраслевого стандарта. Речь идёт о тенденции: крупноформатная ячейка становится одним из главных инструментов оптимизации BESS – Battery Energy Storage System (аккумуляторная система хранения энергии).

И здесь возникает главный вопрос. Если большую ячейку можно сделать надёжной, безопасной и недорогой, она действительно способна упростить накопитель. Но где проходит граница, после которой дальнейшее укрупнение перестаёт давать преимущество?

Возможно, именно поиск этой границы станет одной из главных инженерных задач следующего поколения BESS. Об этом, в частности, мы и поговорим, но сначала, во избежание пространённой путаницы, пара слов о единицах измерения и параметрах аккумуляторов.

А·ч, Вт·ч и МВт: три разных параметра

628 А·ч – это не энергия, а электрическая ёмкость. Ампер-час характеризует количество электрического заряда, которое может быть передано в нагрузку при заданных условиях. Чтобы оценить энергию, необходимо учитывать ещё и напряжение.

Если взять номинальное напряжение LFP-ячейки около 3,2 В, получится:

$$628 \text{ А·ч} \times 3,2 \text{ В} \approx 2009,6 \text{ Вт·ч},$$

то есть примерно 2 кВт·ч номинальной энергии.

Это уже позволяет представить масштаб: одна такая ячейка запасает примерно столько же номинальной энергии, сколько несколько десятков аккумуляторов бытового класса.

Однако 2 кВт·ч нельзя считать фактически доступной ёмкостью. Реальная отдаваемая ячейкой энергия зависит от рабочего диапазона напря-

жения, допустимой глубины разряда, температуры, токов заряда и разряда, деградации и ограничений системы управления.

Есть и ещё одна удобная для сравнения батарей характеристика – удельная энергия аккумулятора. Она представляет собой отношение запасаемой энергии к массе батареи и показывает, сколько энергии можно «извлечь» из 1 килограмма полностью заряженной батареи. Этот параметр весьма критичен, в частности, для автономного электрического транспорта.

Итак:

А·ч – электрическая ёмкость.

Вт·ч – запас энергии.

Вт или МВт – мощность.

Вт·ч/кг – удельная энергия.

Это разные физические параметры, и для BESS такое различие особенно важно.

Система мощностью 200 МВт и энергоёмкостью 400 МВт·ч в идеализированном случае может отдавать 200 МВт примерно два часа. При мощности 100 МВт теоретическое время увеличится примерно до четырёх часов.

Именно соотношение мощности и энергоёмкости определяет, какую услугу накопитель способен предоставлять энергосистеме.

От электромобиля к электросети

История современных аккумуляторов долгое время естественным образом развивалась вокруг мобильности. Для электромобиля каждый килограмм батареи имеет значение. Увеличение массы уменьшает запас хода или требует установки батареи ещё большей ёмкости. Поэтому разработчики стремятся получить как можно больше ватт-часов из каждого килограмма батареи, одновременно повышая мощность и сохраняя приемлемый уровень безопасности.

Стационарный накопитель энергии живёт по другим правилам. Ему не нужно разгоняться, преодолевать подъёмы или втискиваться под пол автомобиля. Никого не интересует, насколько быстро можно переместить сам накопитель из пункта «А» в пункт «Б» – он же стационарный.

Зато критически важно другое: сколько электроэнергии можно хранить за приемлемую стоимость, сколько циклов выдержит батарея, сколько энергии будет потеряно при преобра-

зовании «накопитель←→сеть», как долго система сможет работать без серьёзного ремонта и насколько безопасной останется эксплуатация на протяжении десятилетий. Поэтому для BESS максимальная удельная энергия ячейки далеко не всегда является главным критерием.

Иногда немного более массивная и менее энергоёмкая химическая система оказывается выгоднее, если она дешевле, долговечнее и проще в эксплуатации. Именно здесь особенно хорошо проявили себя литий-железо-фосфатные аккумуляторы – LFP, LiFePO_4 .

LFP относится к литий-ионным химическим системам, в которых катод выполнен на основе литий-железо-фосфата. В типичной ячейке используется графитовый анод, пористый сепаратор и электролит, обеспечивающий перенос ионов лития между электродами. LFP обычно уступает никельсодержащим литий-ионным химиям по удельной энергии, зато предлагает привлекательное сочетание стоимости, циклической долговечности и термической стабильности. Кроме того, катодный материал LFP не содержит никель и кобальт.

Для стационарного накопителя такой компромисс часто выглядит разумно. BESS позволяет частично компенсировать относительно невысокую удельную энергию архитектурой самой установки. Батареиные блоки размещаются в контейнерах, рядом работают системы охлаждения, пожарной безопасности, преобразования энергии, управления и связи. В результате заказчик получает уже не «большую батарею», а энергетическую установку.

Именно в силу блочной компоновки размер ячейки становится особенно интересным. Если одна ячейка содержит больше энергии, для создания накопителя заданной ёмкости потребуется меньше элементов. А значит, потенциально потребуется меньше электрических межсоединений, датчиков, коммутационных элементов и монтажных операций.

Но здесь возникает первый парадокс: чем меньше элементов в системе, тем большую долю общей энергии представляет собой каждый из них. Поэтому отказ крупной ячейки потенциально имеет более серьёзные последствия, чем отказ одного элемента в системе, состоящей из зна-

чительно большего числа небольших ячеек.

Получается своеобразный инженерный компромисс:

- меньше соединений – потенциально меньше точек отказа;
- меньше ячеек – проще сборка;
- более крупная ячейка – выше концентрация энергии.

Но:

- выше концентрация энергии – жёстче требования к диагностике и безопасности;
- более масштабная физическая структура – сложнее управление тепловыми режимами.

Именно в балансировании между этими противоречивыми приоритетами сегодня строится значительная часть конкуренции производителей BESS.

Меньше ячеек – не обязательно проще

Представим два накопителя одинаковой энергоёмкости. Первый построен на большом количестве относительно небольших ячеек, второй – на гораздо меньшем количестве крупноформатных. С точки зрения запасаемой энергии они могут быть эквивалентны, но конструктивно это совершенно разные устройства.

Каждая ячейка требует электрического соединения. Необходимо контролировать её напряжение и, в зависимости от архитектуры, температуру. Необходимо обеспечить механическую фиксацию, электрическую изоляцию, балансировку и обмен данными с системой управления.

Если ячеек становится в несколько раз меньше, сокращается объём таких операций. Это потенциально уменьшает:

- число соединений;
- объём монтажных работ;
- количество вспомогательных компонентов;
- сложность электрической архитектуры.

Кроме того, повышается и энергоёмкость на единицу занимаемого объёма.

EVE связывает крупноформатную архитектуру Mr.Big с сокращением количества системных компонентов и монтажных операций. Компания заявляла о сокращении количества компонентов на 50%, монтажного объёма на 50% и эксплуатационных расходов жизненного цикла на 30%.

От ячейки 628 А·ч к энергосистеме

Одна мощная аккумуляторная ячейка — это только начало. Настоящая ценность раскрывается, когда тысячи таких ячеек объединяются в систему, которая питает дома, предприятия и целые регионы.



Ёмкость
628 А·ч

Номинальное напряжение
3,2 В

Энергия
~2,0 кВт·ч
(на ячейку)



Ёмкость модуля
~ 100–200 кВт·ч
(в зависимости от конфигурации)

Система хранения
Десятки модулей в одном контейнере



Ёмкость системы
1–10 МВт·ч и более

Энергосистема
Стабильное, надёжное и чистое энергоснабжение

Как это работает на практике

- Снижение выбросов CO₂**
Чистая энергия вместо ископаемого топлива
- Энергетическая безопасность**
Надёжность и независимость от внешних факторов
- Гибкость и баланс**
Поддержка ВИЭ и стабилизация сети
- Развитие экономики**
Новые рабочие места и технологический рост

- 1 Ячейка**
 Литий-ионная ячейка на 628 А·ч — это высокая плотность энергии, долгий срок службы и стабильная работа в широком диапазоне температур.
- 2 Модуль**
 Ячейки объединяются в модули с системой управления (BMS), которая следит за безопасностью, температурой и балансом заряда.
- 3 Контейнер**
 Модули собираются в контейнерные системы накопления энергии (СНЭ), которые легко масштабируются под любые задачи.
- 4 Интеграция в сеть**
 Системы подключаются к распределительным сетям, объектам генерации и потребителям, обеспечивая гибкость, надёжность и устойчивость энергосистемы.
- 5 Энергия для людей**
 В результате — чистая, доступная и стабильная энергия для домов, бизнеса и целых регионов.

Рис. 1. Принцип построения энергетической системы BESS

Однако эти цифры необходимо рассматривать как показатели, заявленные производителем для собственной архитектуры. Их нельзя автоматически переносить на все BESS.

Здесь проходит важная граница между рекламной характеристикой и инженерным выводом. Можно уверенно сказать, что уменьшение количества ячеек потенциально снижает количество соединений и компонентов. Но нельзя автоматически утверждать, что любая BESS с более крупными ячейками будет дешевле. Производитель может сэкономить на одних элементах и одновременно потратить больше на охлаждение, диагностику, пожарную защиту или механическую конструкцию. Поэтому правильнее говорить не об устранении сложности, а о её «размытии» по другим компонентам системы.

От ячейки к контейнеру

Именно этот принцип хорошо виден на примере EVE. 628 А·ч ячейка получила название Mr.Big. На её основе компания построила 5 МВт·ч DC-систему Mr.Giant. Это принципиальное различие: Mr.Big – аккумуляторная ячейка, Mr.Giant – уже энергетическая система (рис. 1).

В 2025 году EVE сообщила о масштабном применении Mr.Giant в китайском проекте 200 МВт / 400 МВт·ч. Позднее компания объявила о поставках таких систем в Австралию и Европу. В ноябре 2025 года EVE сообщила о первой поставке Mr.Giant в Австралию, где система должна использоваться для интеграции возобновляемой генерации, снижения пиковых нагрузок и регулирования частоты. В январе 2026 года компания сообщила о подключении к сети 400 МВт·ч-станции, состоящей из 80 систем Mr.Giant по 5 МВт·ч и 40 кабин преобразования и повышения напряжения.

Такие проекты важнее очередного лабораторного рекорда, поскольку между «мы изготовили отличную ячейку» и «мы построили на её основе сетевой объект» находится огромная инженерная дистанция. Ячейка должна пройти квалификационные испытания, производство должно обеспечивать стабильные характеристики, затем тысячи элементов необходимо объединить в систему, обеспечить их охлаждение, управление и защиту. И только после этого накопитель можно подключать к энергосистеме.

Поэтому переход от 628 А·ч технологии к объекту на сотни мегаватт-часов – один из показательных этапов развития крупноформатных батарей.

Что находится внутри современной BESS

Если открыть контейнерную BESS, мы не увидим там одной гигантской батареи. Перед нами окажется многоуровневая система (рис. 2).

На нижнем уровне находятся электрохимические ячейки. Они объединяются в модули и батарейные блоки.

Далее появляется BMS – Battery Management System. BMS контролирует состояние батарей: напряжения, температуры, токи, состояние заряда и другие параметры. В зависимости от архитектуры она также оценивает SoC – State of Charge (состояние заряда), и SoH – State of Health (состояние «здоровья» батареи). Для эксплуатационных задач важна и оценка доступной мощности, то есть способности батареи выполнить требуемую функцию в конкретный момент.

Следующий уровень – тепловая система. Для крупных установок всё чаще применяется жидкостное охлаждение, поскольку оно позволяет эффективно управлять температурой больших массивов ячеек.

Отдельный уровень – пожарная безопасность. Здесь используются датчики, системы обнаружения аварийных процессов, отключения оборудования, вентиляции и средств пожаротушения.

Далее находится PCS – Power Conversion System. Именно эта система обеспечивает двусторонний обмен энергией между постоянным током батареи и переменным током электрической сети.

Над всем этим располагается EMS – Energy Management System, управляющая уже не отдельной ячейкой, а энергетическим поведением всей станции.

Получается многоуровневая архитектура:

электрохимия → BMS → тепловая система → защита → PCS → EMS → сеть

И чем крупнее становится батарея, тем теснее взаимодействуют эти уровни. Поэтому разговор о «большой батарее» постепенно становится условным. Перед нами уже не просто аккумулятор, а сложная

киберфизическая энергетическая система.

Цена укрупнения: тепло, безопасность и качество

Увеличение размера ячейки выглядит простым лишь на бумаге: электрохимические системы плохо поддаются простому геометрическому масштабированию. При заряде и разряде в батарее выделяется тепло. Его количество зависит от электрического режима, сопротивления, конструкции ячейки и других факторов. В крупногабаритной ячейке внутренние области могут находиться дальше от эффективных путей отвода тепла, а распределение температуры и тока становится более сложной задачей.

Проблема заключается не только в средней температуре. Гораздо важнее температурная неоднородность. Если разные участки ячейки работают при разных температурах, они могут стареть с различной скоростью. Меняются внутреннее сопротивление и кинетика электрохимических процессов, что, в свою очередь, тоже влияет на распределение тока и тепла. Получается потенциально замкнутый цикл: неоднородность ускоряет неоднородное старение.

Поэтому увеличение размера ячейки должно сопровождаться развитием тепловой архитектуры. Именно здесь жидкостное охлаждение становится особенно привлекательным. Но оно является далеко не бесплатным решением: появляются насосы, теплообменники, трубопроводы, клапаны, датчики и управляющая автоматика. В результате сокращение количества электрических компонентов может сопровождаться ростом сложности тепловой подсистемы, которая, кстати, ещё и потребляет энергию.

Это и есть принципиальный парадокс крупноформатной ячейки: меньше электрической сложности – больше требований к тепловой и диагностической архитектуре.

Диагностика становится критически важной

Представим накопитель, в котором было 20 000 ячеек, а после перехода на более крупные элементы их стало 5000.

С точки зрения соединений это очевидное преимущество. Но теперь каждая ячейка содержит значительно большую долю общей энергии. Поэ-

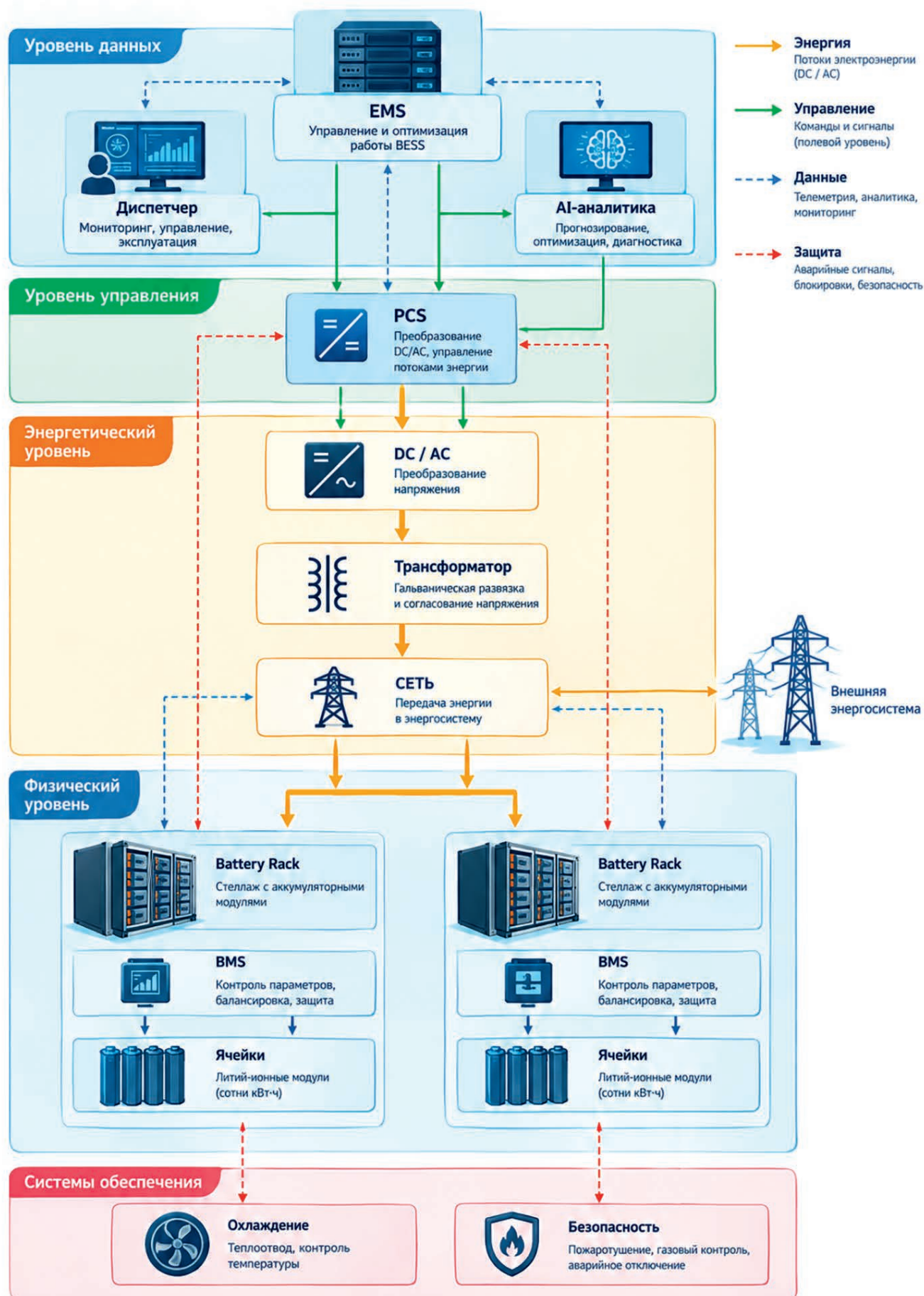


Рис. 2. Архитектура решений BESS

тому система управления должна гораздо лучше понимать состояние каждого элемента.

BMS должна отслеживать не только абсолютные значения, но и динамику изменения параметров:

- напряжения;
- температуры;
- тока;
- SoC;
- SoH;
- внутреннего сопротивления и связанных с ним диагностических признаков;
- отклонения от поведения соседних элементов.

Если температура одной ячейки постепенно начинает отличаться от соседних, это может быть диагностическим сигналом. Если при одинаковом режиме заряда один элемент демонстрирует отличное от других поведение, системе необходимо определить причину.

Таким образом, чем меньше ячеек в системе, тем важнее становится роль каждой из них.

Производственный контроль

Увеличение ёмкости одного элемента повышает требования и к производству.

Представим небольшой производственный дефект. В небольшой ячейке его последствия могут быть относительно локальными. В крупной потенциально затрагивается гораздо больший запас энергии.

Поэтому крупноформатные элементы требуют строгого контроля:

- геометрии;
- толщины электродов;
- качества нанесения активных материалов;
- сварных соединений;
- герметичности корпуса;
- электрических параметров;
- результатов формирования и старения.

Появляется интересная зависимость: чем дешевле становится единица накопления энергии, тем дороже может оказаться цена производственной ошибки.

Отсюда следует ещё один важный вывод. Масштабирование BESS невозможно без параллельного развития автоматизированного контроля качества. Производственная автоматизация становится частью энергетической безопасности ещё

до того, как батарея попадёт в контейнер.

1130 А·ч: следующий рубеж

Если 628 А·ч стало заметным рубежом, то 1130 А·ч показывает, куда движется отрасль дальше.

В 2024 году HiTHIUM представила первую ячейку класса 1 кА·ч MIC1130Ah для длительного хранения энергии. В документации компании указывается рабочее напряжение 2,5–3,65 В при температуре выше 0°C и 2,0–3,65 В при более низких температурах, удельная энергия не менее 180 Вт·ч/кг и ресурс до 15 000 циклов при 25°C, глубине разряда 100% и мощности 0,25 Р до достижения 60% исходного состояния здоровья.

Компания также заявляла объёмную энергоёмкость около 400 Вт·ч/л и повышение эффективности системной интеграции по сравнению с 280 А·ч решением.

Однако здесь важно не столько запомнить число 1130, сколько понять направление развития. Производители пытаются перенести всё большую долю энергии с уровня множества отдельных элементов на уровень одной ячейки. Это позволяет уменьшать количество элементов и одновременно повышать плотность системы. Но каждая новая ступень ёмкости требует заново решать целый набор задач.

То же относится к показателям ресурса. Цифры вроде 10 000 или 15 000 циклов впечатляют, но инженерный вопрос всегда звучит одинаково: при каких условиях? Количество циклов зависит от глубины разряда, температуры, токов заряда и разряда, рабочего диапазона напряжения и критерия окончания ресурса. Если батарея проходит 15 000 циклов в лабораторном режиме при строго заданных параметрах, это не означает, что любая реальная BESS гарантированно выдержит столько же циклов при любых условиях. Кроме циклической деградации существует календарное старение. Батарея меняет характеристики даже тогда, когда не проходит полный цикл. Поэтому нельзя просто разделить 15 000 циклов на один цикл в сутки и объявить получившееся число сроком службы.

Ресурс – это всегда характеристика пары: **батарея + режим эксплуатации**.

BYD Naohan: когда контейнер становится единицей эффективности

Другой путь к высокой плотности показывает BYD. Система Naohan использует крупноформатные элементы Blade Battery и рассчитана на высокую концентрацию энергии в контейнерном исполнении (рис. 3). В актуальной технической документации BYD для одного из вариантов указана номинальная энергоёмкость 14 568 кВт·ч при номинальной мощности 3,642 МВт. Система имеет жидкостное охлаждение, степень защиты IP66 и рассчитана на работу при температуре от -30°C до +55°C, причём при температуре выше 45°C предусмотрено снижение характеристик.

Эти цифры интересны прежде всего потому, что заставляют изменить единицу измерения эффективности. Раньше внимание в основном уделялось характеристикам отдельной ячейки, теперь всё чаще обсуждается, сколько энергии можно разместить в стандартном контейнерном объёме.

Для заказчика это вполне практический вопрос. Допустим, необходимо построить BESS на несколько сотен мегаватт-часов. Если один контейнер содержит меньше энергии, понадобится больше контейнеров, а это означает:

- больше потребной площади;
- больше кабелей;
- больше коммутационного оборудования;
- больше систем охлаждения;
- больше противопожарной инфраструктуры;
- больше монтажных операций;
- больше потенциальных точек обслуживания.

Поэтому повышение энергии на единицу объёма способно дать эко-



Рис. 3. Контейнер как самостоятельная единица

номический эффект далеко за пределами самой батареи. Но только при условии, что безопасность, ремонтно-пригодность и надёжность остаются на приемлемом уровне.

PCS: между батареями и сетью

Даже самая большая батарея не подключается непосредственно к электрической сети. Аккумулятор хранит энергию в форме постоянного тока, тогда как сеть (в подавляющем большинстве случаев) работает с переменным. Между ними находится PCS – Power Conversion System, или система преобразования электроэнергии.

PCS обеспечивает двунаправленное преобразование энергии и становится одним из ключевых элементов управления накопителем. От её характеристик зависит, насколько быстро батарея сможет принимать и отдавать мощность. Современная PCS должна не просто преобразовывать постоянное напряжение в переменное. Она должна управлять параметрами взаимодействия с сетью:

- поддерживать напряжение;
- участвовать в регулировании частоты;
- реагировать на переходные процессы;
- выполнять команды верхнего уровня;
- обеспечивать защитные режимы.

В некоторых архитектурах BESS система PCS должна обладать функциями grid-forming – участвовать в формировании параметров электрической сети, а не только следовать уже существующим сетевым напряжению и частоте. Это особенно важно по мере роста доли инверторной генерации.

Поэтому аккумуляторная индустрия постепенно становится неотделимой от индустрии силовой электроники.

BYD развивает для этого направления платформу GC Flux PCS с мощностью до 10 МВт. В материалах компании указываются пиковый КПД до 99,35%, кратковременная перегрузка до трёхкратного значения в течение 10 секунд и высокая удельная мощность.

Здесь принципиально важно различать мощность батареи и мощность PCS. Если аккумулятор имеет энергоёмкость, например, 10 МВт·ч – это запас энергии. Если PCS имеет мощность 10 МВт, он определяет максимальную скорость обмена этой энер-

гией с сетью при соответствующей конфигурации системы.

Это разные параметры, которые должны быть согласованы.

Поэтому развитие BESS идёт одновременно по нескольким направлениям:

- больше энергии на ячейку;
- больше энергии на контейнер;
- выше мощность и КПД PCS;
- эффективнее управление;
- точнее диагностика.

Нельзя бесконечно улучшать только один параметр. Если батарея может хранить огромный объём энергии, а PCS не способен быстро его отдавать, высокая энергоёмкость не решает задачу регулирования мощности. Если PCS очень мощный, но батарея быстро деградирует, экономическая эффективность системы будет низкой. Если батарея и PCS работают хорошо, но EMS неправильно выбирает режимы эксплуатации, потенциальная ценность накопителя также останется нереализованной. BESS – это задача оптимизации всей системы.

EMS: мозг энергетической системы

Если BMS следит за состоянием батареи, то EMS управляет энергетическим поведением всей станции. Это значительно более сложная задача. EMS должна учитывать состояние заряда батарей, доступную мощность, ограничения PCS, температуру, прогноз генерации, прогноз нагрузки, состояние сети и, в зависимости от конкретного рынка, стоимость электроэнергии.

Например, солнечная электростанция днём может производить избыток энергии. На первый взгляд, решение очевидно: зарядить батарею. Но если прогноз показывает ещё более высокую генерацию через час, а цена электроэнергии вечером будет значительно выше, оптимальная стратегия может быть другой. Накопитель должен не просто заряжаться при разряде, а выбирать для этого лучший момент. То же относится к разряду. Если батарея будет полностью разряжена днём для компенсации небольшой нагрузки, она окажется бесполезной вечером, когда потребление возрастёт до критического уровня.

Поэтому экономическая ценность BESS определяется не только количеством мегаватт-часов. Она определяется тем, насколько разумно система

распоряжается этими мегаватт-часами. И здесь накопитель начинает напоминать промышленный автоматизированный объект, содержащий измерительные системы, локальные контроллеры, исполнительные механизмы, силовые преобразователи, системы связи, верхний уровень оптимизации и связь с внешней диспетчерской инфраструктурой.

Только вместо управления роботами, насосами, клапанами, компрессорами и печами система управляет потоком электрической энергии.

ИИ: не вместо защиты, а вместе с ней

На верхнем уровне управления естественным образом появляется искусственный интеллект (куда же сегодня без него). Но его роль часто представляют слишком широко. В BESS ИИ, как и в любой АСУ ТП, не должен заменять аппаратную защиту. Если температура ячейки выходит за допустимый диапазон, безопасность не может зависеть от того, правильно ли нейросеть классифицировала ситуацию. ИИ гораздо полезнее там, где необходимо анализировать большие массивы данных и находить слабые признаки изменений.

Алгоритмы машинного обучения могут:

- сравнивать поведение отдельных ячеек;
- анализировать температурные профили;
- на основе статистики выявлять аномалии;
- отслеживать изменение диагностических параметров;
- сопоставлять деградацию с историей циклов;
- прогнозировать остаточный ресурс;
- выявлять признаки потенциальных неисправностей.

Это уже классическая задача predictive maintenance – предиктивного обслуживания. Оператор физически не способен вручную анализировать десятки тысяч параметров и замечать слабое отклонение в поведении одной группы ячеек, но алгоритм может выполнять такую работу непрерывно. Поэтому правильная архитектура выглядит не как «ИИ безраздельно властвует над батареями».

Она выглядит иначе:

ИИ анализирует и прогнозирует. BMS контролирует состояние батареи.

Аппаратная защита ограничивает опасные режимы.

PCS управляет силовой частью.

EMS оптимизирует режим станции.

Оператор или диспетчерская система задаёт внешние цели.

Это значительно ближе к архитектуре современной промышленной автоматизации, где безопасность и предсказуемость процессов имеют приоритет перед интеллектуальностью алгоритма.

Больше энергии – больше контроля

Итак, высокая энергетическая плотность выглядит исключительно положительно: больше энергии в том же объёме – меньше контейнеров. Но для инженера по безопасности это одновременно означает больше энергии в одном физическом пространстве. LFP считается более термически стабильной химией по сравнению с рядом никельсодержащих литий-ионных систем, но это не означает, что LFP невозможно «загнать» в опасный режим. В батарее запасено большое количество энергии и содержится весьма горючий электролит, в состав которого обычно входят органические растворители и соли лития. При серьёзном повреждении или неблагоприятном сочетании факторов (например, при внутреннем КЗ в ячейке вследствие производственного дефекта) может возникнуть тепловой разгон с выделением газов и воспламенением. Поэтому крупная BESS должна проектироваться как многоуровневая система безопасности.

На уровне ячейки важны качество производства и конструктивные меры: на уровне модуля – контроль температуры и напряжения; на уровне батарейного блока – локализация неисправностей и безопасное отключение; на уровне контейнера – обнаружение аварийных процессов, вентилирование и пожарная защита; на уровне всей площадки – продуманные расстояния между объектами, зоны безопасности, организация доступа и взаимодействие с аварийными службами.

Поэтому «безопасность эксплуатации LFP» – не свойство, которое можно выразить одним словом. Это результат работы всей архитектуры.

Ремонтопригодность во главе архитектуры

Есть ещё одна проблема, которая редко выглядит эффектно на выста-

вочном стенде, – ремонтпригодность. Сделать максимально компактный контейнер относительно легко, если преследовать только высокую плотность энергии. Но реальная станция должна работать годами. Что произойдёт, если один батарейный блок потребует замены? Можно ли безопасно его отключить? Есть ли к нему физический доступ? Можно ли заменить оборудование без демонтажа соседних систем? Как проверить новый блок перед включением? Как синхронизировать его с остальными? Чем выше степень интеграции, тем важнее ответить на эти вопросы ещё на этапе проектирования.

Поэтому хорошая BESS должна быть одновременно компактной и управляемо-модульной. Но это снова кажется противоречием: инженеры-разработчики стремятся уменьшить количество компонентов и упаковать их плотнее, а сервисные службы хотят иметь возможность быстро заменить неисправный узел. В результате оптимальная архитектура должна сокращать ненужную сложность, но сохранять возможность локального ремонта и обслуживания.

BESS как промышленная система

Если описать современную BESS простой схемой, она будет выглядеть примерно так:

ячейка → модуль → батарейный блок → контейнер → PCS → трансформатор → сеть

Но между этими уровнями проходит ещё один поток – данные. Ячейка передаёт данные системе управления, BMS взаимодействует с контроллерами контейнера, контейнер взаимодействует с PCS, PCS передаёт состояние EMS, EMS принимает решения, диспетчерская система передаёт внешние команды.

Получаются два параллельных потока: энергия идёт по силовой цепи, данные идут по информационной. Именно взаимодействие этих двух потоков превращает набор батарей в интеллектуальную энергетическую систему.

С этой точки зрения современная BESS всё больше напоминает объект АСУ ТП: на нижнем уровне работают измерительные устройства, они получают данные о напряжении, токе, температуре и состоянии оборудования, далее находятся локаль-

ные контроллеры, выше – управление батарейными блоками, затем PCS, затем EMS, наконец, диспетчерский уровень.

Это практически знакомая архитектура промышленного предприятия.

Поэтому развитие BESS создаёт пересечение сразу нескольких инженерных областей:

- электрохимии;
- силовой электроники;
- автоматизации;
- телеметрии;
- промышленного программного обеспечения;
- кибербезопасности;
- аналитики данных.

Именно поэтому крупные накопители становятся интересными не только производителям аккумуляторов, но и поставщикам промышленной автоматизации, силового оборудования и программных систем управления.

Защита от хакера

У цифровизации есть и обратная сторона. Большая BESS становится сетевым устройством. У неё появляются контроллеры, коммуникационные интерфейсы, удалённый мониторинг, программное обеспечение, системы управления и связь с диспетчерской инфраструктурой. Следовательно, появляется потенциально благодатная почва для кибератак. Если злоумышленник получит доступ к системе управления, возможный ущерб может выражаться не только в краже данных. Теоретически он может попытаться изменить режим заряда, мощность отдачи, вывести часть оборудования из работы или создать нестандартный режим эксплуатации.

Поэтому кибербезопасность для BESS – не дополнительная функция, а часть архитектуры.

Здесь необходимы:

- сегментация IT- и OT-сетей;
- разграничение доступа;
- защищённые каналы связи;
- журналирование событий;
- контроль обновлений;
- управление учётными записями;
- механизмы безопасного восстановления;
- разделение информационного и защитного уровней.

Последний пункт особенно важен: даже если программная система будет скомпрометирована, физические и

независимые защитные механизмы должны продолжать выполнять свою функцию. Это ещё один аргумент в пользу многоуровневой архитектуры.

Большая ячейка – большие токи

Есть ещё один параметр, который помогает понять масштаб задачи, – C-rate. C-rate – это отношение тока заряда или разряда к номинальной ёмкости ячейки. Например, для ячейки 628 А·ч ток 1С соответствует примерно 628 А, а для 1130 А·ч – около 1130 А. Это не означает, что конкретная ячейка обязательно должна работать на таком токе. C-rate лишь задаёт нормированное отношение, тогда как допустимые режимы определяются конструкцией и спецификацией конкретного элемента. Тем не менее масштаб очевиден: уже одна крупноформатная ячейка может работать с токами порядка сотен ампер или выше. Эти токи должны проходить через токосъёмники, шины, коммутационные элементы и кабели. Поэтому рост ёмкости одной ячейки автоматически затрагивает силовую инфраструктуру.

Отсюда снова возникает системная цепочка:

- **ячейка определяет электрохимический потенциал;**
- **шины и коммутация должны пропустить ток;**
- **PCS должен преобразовать энергию;**
- **трансформатор должен работать с соответствующей мощностью;**
- **сеть должна принять или отдать эту мощность;**
- **EMS должен управлять процессом.**

BESS реализуема только тогда, когда все эти уровни работают согласованно.

Кому нужны накопители на сотни мегаватт-часов

Самый очевидный ответ – возобновляемая энергетика. Солнечная электростанция производит энергию преимущественно днём, тогда как потребление продолжается круглосуточно. Ветер тоже не подстраивается под график нагрузки. Возникает временной разрыв между генерацией и потреблением. Батарея позволяет его компенсировать: энергия, полученная в момент высокой генерации, переносится на время, когда генерация снижается.

Но этим функции BESS не ограничиваются.

Накопители могут:

- участвовать в регулировании частоты;
- поддерживать напряжение;
- сглаживать пики нагрузки;
- предоставлять резерв мощности;
- работать в микросетях;
- поддерживать критическую инфраструктуру;
- резервировать отдельные объекты;
- участвовать в формировании сетевых параметров.

Поэтому рынок BESS нельзя сводить к простой формуле «солнечная или ветровая электростанция плюс батарея». Накопитель становится полноценным инструментом управления и балансировки энергосистемы.

Особенно интересной областью становятся дата-центры. Рост искусственного интеллекта приводит к появлению вычислительных кластеров с очень высоким энергопотреблением. Для такого объекта важна не только энергия за сутки. Критически важны мощность и скорость реакции.

Если сетевое питание исчезает даже на короткое время, вычислительная инфраструктура должна пережить переход без потери критических процессов. Традиционно эту задачу решает комбинация ИБП, аккумуляторов и резервных генераторов. Но по мере роста мощности дата-центров энергетическая архитектура становится всё сложнее. Крупная BESS может выполнять сразу несколько функций. В нормальном режиме она способна сглаживать пики нагрузки. В определённых условиях – уменьшать потребление из сети. При аварии – поддерживать нагрузку. При наличии солнечной или другой локальной генерации – координировать её работу.

В результате аккумулятор становится частью энергетической инфраструктуры дата-центра, а не просто резервным источником питания. Это ещё один пример превращения батареи из пассивного объекта в управляемый элемент энергетической системы.

Дешевле ячейка – не дешевле накопитель

Предположим, производитель предлагает две ячейки. Одна дешевле на 10%. Вторая дороже, но служит дольше, имеет лучшие тепловые характеристики и позволяет построить более компактный контейнер. Какая

выгоднее? Однозначного ответа нет. Именно поэтому для оценки систем хранения применяется показатель LCOS – Levelized Cost of Storage, или приведённая стоимость хранения энергии.

В расчёт могут входить:

- стоимость батарей;
- PCS;
- контейнеров;
- охлаждения;
- пожарной защиты;
- строительства;
- подключения к сети;
- эксплуатации;
- технического обслуживания;
- деградации;
- замены или расширения батарей;
- стоимость электроэнергии для зарядки;
- потери энергии при цикле.

В результате самая дешёвая ячейка не обязательно определяет самую дешёвую BESS. И это одна из главных причин, почему увеличение размера ячейки стало настолько интересным. Если более крупный элемент позволяет уменьшить количество сопутствующих компонентов и объём инфраструктуры, он способен снизить стоимость хранения энергии на протяжении жизненного цикла. Но только в том случае, если дополнительные расходы на охлаждение, безопасность, диагностику и обслуживание не съедят полученную экономию.

Почему нельзя просто сделать ячейку в десять раз больше

На этом месте возникает естественный вопрос: если большая ячейка лучше маленькой, почему бы не сделать её ещё больше?

Почему 628 А·ч, а не 5000? Почему 1130 А·ч, а не 10 000?

Ответ связан с физикой и электрохимией. Увеличение размеров элемента означает изменение расстояний, на которых должны эффективно происходить перенос ионов, движение электронов и отвод тепла. Необходимо сохранять равномерность распределения тока, контролировать температуру, обеспечивать механическую стабильность электродов, учитывать изменение объёма материалов во время циклирования, выдерживать внутренние механические нагрузки и обеспечивать надёжную герметизацию.

Иными словами, нельзя просто масштабировать ячейку геометрически. Если увеличить все размеры в несколько раз, характеристики не обязательно увеличатся пропорционально.

Поэтому переход от 300 к 600 А·ч – не просто «ячейка в два раза больше». Это новая инженерная конструкция. То же самое относится к переходу от 600 к 1000 А·ч и далее.

Именно поэтому дальнейший рост ёмкости будет, вероятно, сопровождаться всё более сложной оптимизацией материалов и конструкции.

Батарея Эдисона возвращается

В контексте разговора о разновидностях аккумуляторов любопытно вспомнить технологию, которая старше большинства современных батарейных систем. Это никель-железная батарея. В начале XX века её активно развивал Томас Эдисон. Как ни странно сейчас это звучит, в 1900 году электромобили занимали заметное место на американском рынке, а никель-железная химия рассматривалась как возможная основа более долговечных аккумуляторов.

Однако ранние электрические автомобили сталкивались с высокой стоимостью батарей, ограниченным запасом хода и отсутствием удобной инфраструктуры. Тем временем двигатель внутреннего сгорания быстро развивался, а вместе с ним – топливная инфраструктура и массовое производство автомобилей. Эта история интересна не только сама по себе. Она показывает, что технология может проиграть не потому, что физически бесперспективна. Иногда она проигрывает экосистеме.

Но сегодня ситуация изменилась. Электрические сети существуют практически повсеместно. Возобновляемая генерация стремительно развивается, а цифровые системы способны управлять огромным количеством распределённых устройств. Поэтому некоторые старые электрохимические идеи снова становятся предметом исследований.

В феврале 2026 года международная исследовательская группа при участии UCLA сообщила о новой никель-железной батарее, вдохновлённой исторической технологией Эдисона.

Здесь необходимо сделать важное уточнение: это не новый вари-

ант LFP, не усовершенствованная 628 А·ч-ячейка и не промышленный конкурент Mr.Giant. Это отдельная электрохимическая архитектура, находящаяся на стадии исследовательского прототипа. Исследователи использовали белковые структуры для формирования очень мелких кластеров никеля и железа, после чего интегрировали их с ультратонким углеродным материалом для создания электродов. По данным UCLA, получившийся прототип мог заряжаться за секунды и продолжал работать после более чем 12 000 циклов зарядки и разрядки. Авторы рассматривают такую архитектуру как потенциально интересную для хранения энергии от возобновляемых источников.

Почему это интересно? Потому что здесь исследователи пытаются решить задачу не за счёт масштабирования ячейки, а за счёт изменения структуры активного материала. Малые металлические кластеры увеличивают доступную для электрохимической реакции поверхность, ультратонкий проводящий материал может уменьшать ограничения, связанные с транспортом заряда. Получается совершенно другой путь развития.

Поэтому смешение этих технологий создало бы неправильное впечатление. LFP – зрелая литий-ионная химия, уже используемая в крупных серийных BESS. Никель-железная батарея, о которой сообщила группа UCLA, – исследовательская технология. У них разные материалы электродов, электрохимические процессы, эксплуатационные характеристики и уровни технологической готовности. Поэтому сравнивать их как «две версии одной батареи» некорректно. Гораздо правильнее рассматривать их как два разных направления развития накопителей.

И именно такое разделение, вероятно, будет характерно для будущей энергетики: не одна универсальная батарея, а несколько технологий, оптимизированных для разных режимов эксплуатации.

Для автомобильной батареи быстрая зарядка является почти универсальной ценностью, но для сетевого накопителя всё сложнее. Если BESS установлена рядом с солнечной электростанцией и должна переносить дневную генерацию на вечер, ей может быть совершенно не нужно заряжаться за

несколько минут. Она может получать энергию несколько часов.

Для регулирования частоты важна скорость реакции, для резервирования электроснабжения дата-центра она ещё важнее, для некоторых промышленных процессов критична возможность многократных быстрых циклов отдачи высокой мощности, для long-duration storage на первый план выходит длительность отдачи энергии. Поэтому абсолютное понятие «лучшей батареи» постепенно теряет смысл. Правильнее говорить о батарее, оптимальной для конкретного режима эксплуатации.

Климат, старение и конец жизненного цикла

Аккумуляторная химия чувствительна к температуре. При низких температурах меняется кинетика электрохимических процессов, возрастает внутреннее сопротивление и могут возникать ограничения на заряд. При высоких температурах ускоряется деградация и увеличивается нагрузка на систему охлаждения. Поэтому BESS в северном регионе и BESS в пустынном климате требуют разных инженерных решений. Для одного объекта главным вопросом станет обогрев, для другого – охлаждение. Но в обоих случаях система должна поддерживать приемлемый температурный диапазон. Это ещё один аргумент в пользу комплексного сравнения BESS: две батареи с одинаковой паспортной энергоёмкостью могут иметь совершенно разные эксплуатационные характеристики в реальном климате.

Есть и другой аспект. Сегодня рынок в основном сосредоточен на строительстве и вводе в эксплуатацию новых накопителей. Но батареи имеют конечный срок эксплуатации. Когда крупная BESS отработает проектный ресурс, потребуется решить, что делать с её батарейной частью.

Возможны разные сценарии:

- восстановление отдельных блоков;
- использование части оборудования в менее требовательных приложениях;
- извлечение ценных материалов;
- переработка батарей.

LFP не содержит никеля и кобальта в катодном материале, что может быть преимуществом с точки зрения стоимости и сырьевой структуры. Но это не означает, что батарею можно



Рис. 4. Принцип временной электростанции

считать экологически нейтральной: в ней остаются литий, графит, медь, алюминий, электролит и другие материалы. По мере роста рынка BESS экономика утилизации будет становиться всё важнее. Особенно если через несколько лет одновременно выйдет из эксплуатации большое количество крупноформатных систем.

Иногда предлагается простой сценарий: батарея потеряла часть ёмкости в BESS – значит, её можно установить в менее требовательную систему. Но это не всегда экономически выгодно. Для second-life необходимо демонтировать батарейный блок, проверить его состояние, отсортировать элементы, оценить остаточный ресурс, собрать новую систему и снова обеспечить её безопасность. Иногда стоимость этих операций оказывается выше экономической выгоды. Поэтому повторное использование будет развиваться там, где оно действительно оправдано технически и экономически. В других случаях предпочтительным вариантом может оказаться переработка материалов.

Жизненный цикл BESS нельзя заканчивать моментом подключения станции к сети.

Логистика большой ячейки

Есть ещё один аспект, о котором редко вспоминают: большая батарея тяжелее. Если в одном контейнере находится несколько мегаватт-часов энергии, его необходимо транспортировать, разгружать и устанавливать с учётом требований безопасности. Международные поставки добавляют собственные ограничения. Требуются соответствующая упаковка, маркировка, сертификация и процедуры обращения с литий-ионными аккумуляторами. В результате крупноформатная ячейка влияет даже на логистическую архитектуру отрасли. Это уже не просто вопрос производства. Производитель должен думать о том, как его продукт будет перемещаться между заводом и энергетическим объектом, иногда через несколько стран и климатических зон.

Где оптимум?

Теперь можно сформулировать главный инженерный конфликт. Чем больше ячейка, тем меньше элементов необходимо. Меньше элементов – меньше соединений. Меньше соединений – проще сборка. Проще сборка – потенциально ниже стои-

мость. Меньше компонентов – потенциально меньше точек отказа.

Но одновременно: чем больше ячейка, тем больше энергии находится в одном элементе; чем больше энергии, тем выше потенциальные последствия отказа; чем больше физический масштаб, тем сложнее управление тепловыми режимами; чем сложнее тепловой режим, тем сложнее система охлаждения; чем выше плотность энергии, тем выше требования к безопасности; чем выше интеграция, тем важнее диагностика и ремонтпригодность.

Таким образом, крупная ячейка не устраняет сложность, она перераспределяет её. Раньше значительная часть сложности находилась в огромном количестве элементов, соединений и монтажных операций. Теперь она перемещается в тепловую инженерию, диагностику, защиту, производственный контроль и программное управление. И это, пожалуй, самое важное следствие нынешней гонки за ёмкостью.

Но, скорее всего, идеального размера нет. Он зависит от режима эксплуатации. Для солнечной BESS оптимум будет одним, для дата-центра – другим,

для частотного регулирования – третьим, для long-duration storage – четвёртым. Поэтому отрасль, вероятно, не придёт к одной гигантской ячейке, которая вытеснит все остальные.

Будут существовать разные классы элементов, оптимизированные под:

- низкую стоимость;
- высокую плотность;
- длительный ресурс;
- высокую мощность;
- быстрый отклик;
- конкретные климатические условия.

Именно поэтому показатель А·ч сам по себе постепенно теряет статус главного критерия.

Возвращаясь к 628 А·ч-ячейке EVE, важно правильно оценить её значение. Она не является абсолютным пределом и не является единственной крупной ячейкой на рынке, не создаёт формальный отраслевой стандарт. Но она показывает другое: крупноформатная ячейка такого масштаба может быть массово произведена, интегрирована в 5 МВт·ч DC-систему и использована в сетевом объекте на сотни мегаватт-часов. EVE сообщила о более чем 1 млн произведённых крупных ячеек, а Mr.Giant вышел на международные рынки. Это уже не концепт, но это и не безусловное доказательство того, что максимальное увеличение размера автоматически является лучшим решением. Скорее это доказательство жизнеспособности самой архитектурной идеи.

Есть ли идеальная химия?

На этом фоне LFP выглядит не как временный компромисс, а как одна из наиболее практичных химических систем для массового стационарного хранения. Она сочетает относительно невысокую стоимость, хорошую циклическую долговечность и благоприятные характеристики с точки зрения термической стабильности. И главное – эта химия уже получила огромную производственную базу. Это крайне важное преимущество.

Но LFP не обязательно станет единственной батареей будущего. Исследования вроде работы группы UCLA показывают, что поиск новых решений продолжается. Другие литий-ионные химии сохраняют отдельные ниши. Никель-железные и другие альтернативные системы могут получить коммерческий шанс, если под-

твердят свои свойства при масштабировании.

Кроме того, механические, тепловые и другие способы хранения будут конкурировать с батареями там, где окажутся экономически выгоднее. В результате будущая энергосистема, скорее всего, будет представлять собой не один огромный аккумулятор, а набор технологий, каждая из которых оптимизирована под свой режим эксплуатации.

Вместо заключения. «Временная электростанция»

Есть интересная точка зрения на BESS. Обычная электростанция превращает первичную энергию в электрическую, солнечная станция преобразует солнечное излучение, ветряная – энергию движения воздуха, газовая – химическую энергию топлива. Батарея же не производит ничего. Она лишь перемещает энергию во времени (рис. 4). Энергия, полученная сегодня днём, может быть отдана вечером. Энергия, накопленная ночью, может использоваться утром. Мощность, сохранённая заранее, может быть предоставлена сети в момент аварии. В этом смысле BESS действительно можно назвать «временной электростанцией». Она не увеличивает количество произведённой энергии. Она меняет момент, в который эта энергия становится доступной. Именно это свойство становится особенно ценным в современных энергосистемах с высокой долей солнечной и ветровой генерации.

Но следующий этап развития BESS, вероятно, будет определяться уже не вопросом о том, насколько большой может быть аккумуляторная ячейка. Главный вопрос будет другим: насколько большой должна быть ячейка, чтобы дополнительная ёмкость улучшала систему, а не переносила сложность туда, где она «съедает» полученную выгоду?

Именно на поиске этого оптимума – между энергоёмкостью, стоимостью, ресурсом, безопасностью, тепловым режимом и управляемостью – сегодня и строится следующий этап развития накопителей энергии.

Литература

1. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy

Transitions. Paris: IEA, 2024.

URL: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>.

2. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions: Executive Summary. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary>.
3. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions: Status of Battery Demand and Supply. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/status-of-battery-demand-and-supply>.
4. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions: Outlook for Battery Demand and Supply. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/outlook-for-battery-demand-and-supply>.
5. EVE Energy. Setting New Trends: EVE Energy Unveils Impressive Mr. Flagship Series at EESA Expo 2024. 2024. — Материалы компании о ячейке Mr. Big 628 Ah и системе Mr. Giant 5 MWh. URL: <https://www.evebattery.com/en/news-1855>.
6. EVE Energy. EVE Energy's World's First 628Ah Ultra-Large Battery Energy Storage Station Connected to Grid, Secures Major 10GWh Order. 2026. – Данные о подключении к сети системы мощностью 400 MWh с 80 системами Mr. Giant. URL: <https://www.evebattery.com/en/news-1894>.
7. HiTHIUM. MIC 1130Ah: Long-Duration Energy Storage Battery. 2024. – Материалы производителя о 1130-Ah ячейке, плотности энергии и заявленном ресурсе до 15 000 циклов. URL: <https://hithium.com/newsroom/activities/details/56.html>.
8. Walker H. Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems. 3rd ed. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2018. NREL/TP-7A40-73822. DOI: 10.2172/1489002. URL: <https://research-hub.nrl.gov/en/publications/best-practices-for-operation-and-maintenance-of-photovoltaic-and-/>.

