

Про запас...

(о развитии систем накопления энергии)

А.МИНЕЕВ

В 2019 ГОДУ НОБЕЛЕВСКУЮ ПРЕМИЮ по химии получили Джон Гуденаф, Стэнли Уиттингем и Акира Ёсино за разработку литий-ионных аккумуляторов – одного из видов накопителей энергии, получивших в настоящее время широкое распространение. Подобные Нобелевские премии в области естественных наук вручаются нечасто. Эта премия присуждена за *революционное изобретение*, приносящее наибольшую пользу человечеству, а не за выдающееся *научное исследование* (как правило, присуждают именно за это).

Эта статья познакомит читателей с глобальными процессами, происходящими в области развития систем накопления энергии.

Производство электроэнергии и ее потребление всегда нуждались в устройствах, накапливающих излишки и затем, по мере надобности, отдающих энергию обратно. Хорошо известны колебания потребления электроэнергии в течение дня (утренний и вечерний пики), а также от сезона к сезону (зима – лето), которые желательно сглаживать накопителями энергии. С самых давних времен нам знакомы примеры использования преобразования предварительно накопленной потенциальной энергии в кинетическую – скажем, стрелы при стрельбе из лука или при перемещении по циферблату стрелок напольных часов (в них потенциальная энергия запасается при ручном поднятии гирек).

Происходящий в настоящее время поворот к все большему использованию возобновляемых источников энергии – ВИЭ (главным образом, энергии ветра и солн-

ца) сталкивается с проблемой принципиальной непредсказуемости их генерации во времени. В результате многократно увеличивается запрос на все более мощные системы накопления энергии. Это приводит к своеобразной мирной гонке в создании накопителей энергии, которые должны заполнить ниши в проблеме генерация-потребление: в быту, на транспорте, в промышленности и в целом по энергосистеме. О некоторых деталях этой увлекательной гонки и будет рассказано в статье. Но вначале прикинем – о какой суммарной энергии накопителей может идти речь в случае перехода на ВИЭ?

Нынешняя суммарная величина мощности, потребляемой человечеством, составляет 20 ТВт, прогноз на вторую половину 21 века оценивается в 30 ТВт. За год ($3 \cdot 10^7$ с) потребуется выработка энергии порядка 10^{21} Дж. Для суммарной требуемой мощности накопителей примем в качестве оценки значение 5–10 ТВт. Тогда для покрытия дневных колебаний потребления (1–3 часа) суммарная запасенная в накопителях энергия составит $(0,2 - 1) \cdot 10^{17}$ Дж. Если же потребуется запастись энергией на существенно больший срок (скажем, на месяц, ближе к сезонным колебаниям), то суммарная требуемая энергия накопителей может вырасти до $2 \cdot 10^{19}$ Дж.

Однако возможен ли полный переход электроэнергетики мира только на систему ВИЭ + накопители? Скорее всего, нет. По нашему мнению, она нуждается в «подушке» более традиционной энергетики – генерации на атомных электростанциях (АЭС) и на тепловых (ТЭС) при использовании энергии газа, нефти и каменного угля. К подобной подушке можно отнести

и использование гидроэлектростанций (ГЭС), хотя формально они относятся к возобновляемым источникам энергии. Очень важно, что современные тепловые электростанции, особенно использующие природный газ, обладают высокой маневренностью и способны быстро компенсировать дисбаланс между генерацией и потреблением энергии.

Прогнозный анализ оптимального соотношения между различными источниками энергии, проведенный российскими исследователями в 2014 году, привел к следующей оценке на конец 21 века: 40% – АЭС, 40% – ВИЭ (солнце, ветер, приливные электростанции), 20% – нефть, уголь, газ, гидроэнергетика. К похожим выводам в 2019 году пришли и эксперты из международного агентства по ядерной энергии. Они анализировали оптимальное соотношение между различными источниками энергии при наличии ограничений: на выброс парниковых газов (главным образом, углекислого газа) и на рост средней глобальной температуры на Земле (не более 2 °С). В выпущенном ими обзоре на конец 21 века приведена следующая ожидаемая структура энергетики: 30–40 % – доля использования ветровой и солнечной генерации, 40–60 % – доля АЭС и маневренных тепловых и гидроэлектростанций.

Присмотримся к динамике развития различных систем накопления энергии. Начнем с тех, с которыми все мы сталкиваемся в обычной жизни и которые «на слуху». Отметим, что, запасая энергию и затем отдавая ее обратно, накопитель суммарно все же является потребителем энергии. Поэтому очень важно добиваться высокого КПД накопителя, т.е. отдавать обратно почти столько же, сколько получено.

Литий-ионные накопители энергии

Как и в большинстве электрохимических накопителей энергии, набор элементов, из которых состоит литий-ионный (Li-ion) аккумулятор, стандартный: катод и анод, которые разделены сепаратором, пропитанным электролитом. Сложность заключается в подборе материалов катода, анода и типа ионов, перемещающихся от



Образцы зарубежных и российских литий-ионных накопителей

катода к аноду и обратно, с целью увеличения ресурса, безопасности и энергоемкости накопителя (последнее позволяет сделать накопитель более легким и удобным потребителям). Поиск нужных материалов, оптимально сочетающихся друг с другом, занял без малого 50 лет. В результате самому возрастному из лауреатов 2019 года, Д.Гуденафу, к моменту вручения премии исполнилось 97 лет, но он все же дождался и стал старейшим лауреатом в истории Нобелевских премий!

В современных конструкциях Li-ion аккумуляторов анод представляет собой пористый углерод (графит) на фольге из меди, катод – окись лития на фольге из алюминия, пористый сепаратор выполнен из полипропилена и пропитан электролитом. При заряде аккумулятора ионы Li^+ отделяются от молекул окиси лития и переходят на катод из углерода, а при разряде процесс идет в обратную сторону. Поясним масштаб произошедшей революции в использовании таких аккумуляторов на нескольких примерах.

- В 1991 году емкость всех Li-ion накопителей энергии была менее 130 кВт·ч (470 МДж), а через 30 лет их суммарная накопленная емкость превысила 500 ГВт·ч ($1,8 \cdot 10^{15}$ Дж) – рост в 4 миллиона раз (!).

- Первые Li-ion аккумуляторы применялись только в небольших приборах (сотовые телефоны, цифровые фотоаппараты и видеокамеры, ноутбуки). Постепенно область их использования расширилась и включила электротранспорт (скутеры,

электрокары, электромобили). Их общая емкость в электромобилях достигла 300 ГВт·ч и уже превысила емкость аккумуляторов бытовой электроники. В последнее время сборки из множества отдельных Li-ion аккумуляторов вышли на уровень промышленной энергетики. Так, в Австралии компания Tesla уже построила большую Li-ion аккумуляторную батарею (476 блоков, в каждом 16 аккумуляторов) суммарной емкостью 100 МВт·ч ($3,6 \cdot 10^{11}$ Дж) и официально подключила ее к энергосети. Компания Tesla проработала технологию создания гигафабрик систем хранения энергии в Li-ion аккумуляторах, расположенных рядом с электростанциями на основе солнечных панелей. В настоящее время такие гигафабрики сооружаются в США, Китае и Германии. В России к созданию первой очереди подобной Li-ion гигафабрики в Калининграде на мощность 4 ГВт·ч в год приступил «Росатом».

- По сравнению с обычно используемыми в автомобилях свинцово-кислотными аккумуляторами литий-ионные обладают существенно большим удельным запасом энергии (40 Вт·ч/кг у свинцово-кислотных против 250 Вт·ч/кг у литий-ионных). Это делает их значительно более легкими и компактными.

- Ресурс литий-ионных аккумуляторов существенно больше, чем у свинцово-кислотных ($(5-10) \cdot 10^3$ против $(1-1,5) \cdot 10^3$).

- КПД литий-ионных аккумуляторов довольно высок – до 95–97%.

Несмотря на то, что стоимость Li-ion аккумуляторов пока превышает свинцовые, по совокупности (с учетом ресурса, КПД, компактности и других характеристик) переход на литий уже в настоящее время оказывается предпочтительнее.

Казалось бы, большинство проблем с производством литиевых аккумуляторов решено, а запасы лития в земной коре и в океанах достаточно велики. Однако экологические риски, относящиеся к добыче лития и производству литий-ионных аккумуляторов, могут со временем все более ограничивать даль-

нейшее развитие этой технологии. Отметим в этой связи несколько проблем.

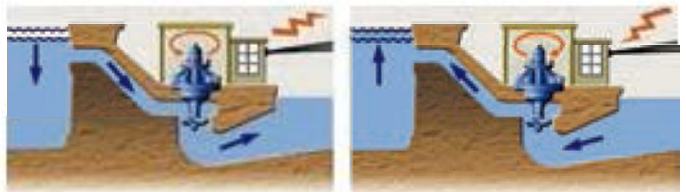
- Для получения одной тонны этого металла требуется переработать 50 тонн породы сподумен или 750 тонн солевого раствора, содержащего литий. Очистка их от примесей возможна только химическим путем. Порода или раствор после извлечения лития больше не используют, выливая тонны отработанного химического рассола на землю.

- Емкость аккумуляторов современных электромобилей приближается к 100 кВт·ч. При производстве 1 кВт·ч мощности Li-ion батареи в атмосферу выделяется порядка 150–200 кг углекислого газа. В результате оказывается, что новенький электромобиль (еще без пробега!) уже на стадии изготовления загрязнил атмосферу 15–20 тоннами CO₂. А ведь при работе обычного автомобиля с бензиновым двигателем такое же количество углекислого газа выделяется при пробеге в 100 тысяч километров.

В последнее время активно исследуются натрий-ионные аккумуляторы, которые пока уступают более отработанным литий-ионным, но в перспективе имеют преимущества (натрий по стоимости на два порядка дешевле лития и не так химически активен).

Гидроаккумулирующие электростанции – ГАЭС

Для ГАЭС необходимы два резервуара воды: верхний и нижний. Принцип действия гидроаккумулирующих электростанций при выдаче энергии в сеть близок к работе гидроэлектростанций (ГЭС): вода из верхнего резервуара вращает турбину и вырабатывается электроэнергия. В то же время



Принцип работы ГАЭС. Слева – в качестве генератора энергии (турбинный режим), справа – накопителя энергии (насосный режим)

ГАЭС может работать и в обратную сторону (как накопитель энергии), при этом двигатель закачивает воду из нижнего резервуара наверх. Потенциальная энергия поднятой наверх воды $W = mgh$ (h – высота верхнего резервуара относительно нижнего) затем снова вращает турбину и т.д.

В мире развитие ГАЭС в целом практически вышло на стационар (исключение – Китай и Россия, потенциал развития ГАЭС в которых еще не исчерпан). Во многом это связано с конкуренцией за место для строительства новых станций, большим сроком строительства и влиянием «зеркала» водохранилища на экологию. В результате можно сказать, что наиболее удачные решения по выбору мест и строительству ГАЭС уже были приняты в прошлом и подходящих территорий для сооружения новых все меньше.

Однако, с гидроаккумулирующими станциями ситуация иная. В случае ГАЭС нет необходимости перекрывать плотиной русла рек и можно сделать существенно более компактной систему замкнутого цикла, включающую верхний и нижний резервуары, двигатели и турбины. В 2019 году

опубликован атлас возможных мест расположения ГАЭС в мире (их оказалось более пятисот) и было оценено, что суммарная запасаемая энергия таких потенциальных ГАЭС превышает 20 миллионов ГВт·ч (!). Это означает, что если удастся освоить хотя бы небольшую часть от указанной суммарной потенциальной энергии, то ГАЭС могут обеспечить мировые потребности в накопителях. Однако, реальные темпы строительства новых ГАЭС пока довольно низки и сильно отстают от темпов развития ВИЭ.

Для того чтобы дать представление о проблемах, связанных с созданием ГАЭС, приведем пару примеров таких гидроаккумулирующих станций – Голдисталь в Тюрингии (Германия) и Загорской в Подмоскowie. На приведенном (на с. 6) рисунке видны верхний и нижний резервуары воды, а также шлюзы, их соединяющие. Важно, что обе станции удачно вписаны в природный ландшафт. Некоторые параметры этих станций приведены в таблице.

По сравнению с Li-ion аккумуляторами у ГАЭС запасаемая энергия и мощность гораздо выше, больше ресурс, но ниже

	ГАЭС Голдисталь	Загорская ГАЭС
Верхний резервуар		
Запас воды, млн м ³	12	22
Площадь «зеркала воды», гектар	55	260
Глубина воды в резервуаре, м	20	9
Нижний резервуар		
Запас воды, млн м ³	19	34
Энергетические характеристики		
Разница высот до турбин, м	340	100
Потенциальный запас энергий, ГВт·ч	10	6
КПД	85%	75%
Выработка электроэнергии, ГВт·ч	8,5	4,5
Время сброса воды, ч	8	4



ГАЭС Голдисталь, Тюрингия, Германия



Загорская ГАЭС, Московская область, Россия

КПД (порядка 75 – 85%). К настоящему времени построены ГАЭС с очень высокой мощностью (наиболее крупные: Фэннин, 3600 МВт, 40 ГВт · ч, Китай; Бас Каунти, 3000 МВт, 24 ГВт · ч, США). Общее количество ГАЭС в мире около 500, их суммарная мощность более 300 ГВт. Строят надземные (такие, как упомянутые выше Голдисталь и Загорская), полуподземные (Бас Каунти) и подземные (Динорвик, 1800 МВт, 9 ГВт · ч, Великобритания; Фэннин, Китай). Запас энергии $W = mgh$ в ГАЭС происходит в основном за счет подъема массы воды (m). Тем не менее, строятся и станции с очень высоким напором, $h = 380$ м (Бас Каунти) и даже $h = 750$ м (Лаго Делио, 1040 МВт, Италия).

Главное достоинство ГАЭС – возможность быстрого реагирования на изменение потребления энергии. Указанное в таблице значение времени сброса всей воды из верхнего резервуара составляет часы, но на полную мощность они могут выходить за минуты или десятки минут. Характерный режим работы крупных ГАЭС:

накопление энергии ночью (в период минимального потребления энергии), генерация – днем.

Основные недостатки ГАЭС связаны с отчуждением больших площадей, длительным периодом сооружения и дороговизной. При этом необходимы особые площадки с большим перепадом высот и местом для водохранилищ. На территории ГАЭС меняется ландшафт и уровень грунтовых вод, происходит большое испарение воды... В результате выбор площадки для строительства каждой новой ГАЭС является сложным компромиссом между мнением населения территории и нуждами региона и страны в целом.

Гравитационные накопители энергии

Простейший пример гравитационного накопителя – часы с гирями. Энергия, запасенная при поднятии гирь, расходуется, приводя в движение часовой механизм. В отличие от метода гидроаккумуляции, использующем течение воды, гравитационный накопитель может экономнее использовать отведенную площадь, наименьшую – в случае, когда грузы поднимаются и



Настенные часы с гирями

опускаются вертикально, как в лифте. Сами грузы могут быть изготовлены из подручных материалов – почвы, строительных блоков и т.п. При подъеме груза происходит запасание энергии $W = mgh$, при опускании – выработка электроэнергии.

Месторасположение гравитационных накопителей может быть довольно неожиданным – например, внешние подвески на небоскребах или вертикальные подземные лифты шахт. Отмечается, что КПД таких систем довольно высок (более 80%). Конструкции, как правило, простые, надежные, срок службы накопителя может составить десятки лет. Время хранения запасенной энергии ограничено долговечностью используемых материалов, а время высвобождения энергии, естественно, должно быть больше времени свободного падения (при высоте 100 метров это около 5 секунд).

В настоящее время эта технология тестируется в ряде стран, однако пока не освоена промышленностью. Имеются проекты создания таких систем мощностью в несколько мегаватт и запасом энергии в десятки МВт·ч.

От маховиков к супермаховикам

В этой статье о накопителях не раз будет употребляться приставка *супер*. Она будет означать какой-то прорыв, выход за обычные границы. Термин «супермаховики» тоже означает некую революцию развития систем накопления энергии на основе быстрого вращения твердых тел (маховиков).

За примерами маховиковых накопителей далеко идти не надо, они под рукой – скажем, детские игрушки волчок и юла

или велосипед. У них уже есть кое-что общее с промышленными накопителями на основе маховиков:

- устройство раскручивания или двигатель (однократное придание вращательного движения рукой (у волчка), постепенное многократное раскручивание (у юлы и велосипеда));

- возможность сохранения вращения в течение некоторого времени, определяемого потерями энергии на трение об окружающий воздух и в месте контакта с поверхностью;

- устройство превращения энергии маховика в другой вид энергии, в случае велосипеда – вращения колес, приводящего к поступательному движению, в тепло при нажатии на тормоз.

Энергия, запасаемая в маховике, равна

$$W_{\max} = k_m \frac{mv_{\varphi}^2}{2},$$

где m – масса маховика, v_{φ} – скорость вращения, k_m – коэффициент формы маховика. Для маховика, имеющего вид тонкого диска (типа колеса велосипеда), $k_m = 1$ (при этом $v_{\varphi} = \omega R$, R – радиус диска, ω – угловая скорость); для сплошного диска постоянной толщины $k_m = 0,5$. Максимальная скорость вращения маховика ограничивается сверху прочностью материала.

Центробежная сила $F = \frac{mv_{\varphi}^2}{R}$ создает механические напряжения σ в материале, равное

$$\sigma = \rho \frac{R}{h} = \frac{F}{2\pi R \Delta} \frac{R}{h} = \rho v_{\varphi}^2,$$

где h – толщина диска, Δ – его ширина, ρ – плотность материала, $m = \rho \cdot 2\pi R h \Delta$ – мас-



Волчок, юла, велосипед

са диска. В результате маховики из легких, но прочных материалов оказываются более предпочтительными, а маховики из прочных сталей проигрывают легким композитам типа углепластиков.

В процессе перехода от маховиков к супермаховикам произошел целый ряд революционных изменений. Идеологом этого направления накопителей энергии стал советский и российский инженер Нурбей Владимирович Гулиа. Ему принадлежат само название «супермаховик», авторские права на конструкцию, полученные еще в 1964 году, и множество идей, впоследствии реализованных.

Перечислим главные особенности перехода от маховиков к супермаховикам.

- Замена тяжелых материалов маховика на более легкие прочные композиты.

- Замена однородного материала маховика на ленту из композитных материалов типа углепластика, органопластика или борного волокна. Это решает одну из важных проблем, связанных с возможным разрушением материала маховика. В маховике из сплошного однородного материала разрушение приводит к катастрофическим и не всегда предсказуемым последствиям. В маховике из намотанной ленты ее разрыв сопровождается разматыванием ленты и более плавным гашением энергии в прочном корпусе.

- Создание вакуума внутри корпуса маховика для радикального снижения потерь на трение и увеличения длительности сохранения накопленной энергии вращения.

- Переход от обычных подшипников к магнитной подвеске маховика (магнитная левитация).

- Развитие алгоритмов управления, с помощью которых маховик удается стабилизировать при любых скоростях вращения, а также избежать контакта маховика с другими элементами конструкции.

В результате КПД при учете всех оставшихся потерь оказывается больше 85%. А максимальная на сегодняшний день энергоемкость супермаховиков достигает 300 Вт·ч/кг (с возможностью дальнейшего роста). Фактически это тот же уро-

вень, что и для литий-ионных аккумуляторов. Другие достоинства супермаховиков: экологическая чистота и высокий ресурс работы. В оставшихся в арсенале обычных маховиках даже при использовании современных прочных сталей не удается увеличить энергоемкость выше 15 Вт·ч/кг.

По сравнению с литий-ионными аккумуляторами время зарядки (раскручивания) супермаховиков существенно короче (минуты по сравнению с часами зарядки в аккумуляторах). Выше также плотность запасаемой энергии и долговечность. Подсчитано, что если супермаховик из органопластика массой 130 кг и энергоемкостью 30 кВт·ч раскрутить в течение пяти минут мощным внешним двигателем, то легкой автомобиль на такой тяге может проехать около 300 км на скорости 100 км/ч. Заметим, что в электромобилях при такой же энергоемкости масса литий-ионных аккумуляторов почти на порядок выше (около тонны).

Казалось бы, все это открывает радужные перспективы использования супермаховиков в автомобилях. Но маховик, раскрученный до большой скорости, фактически является большим гироскопом, который стремится сохранить направление вращения. Это затрудняет маневренность, а использование гибкого подвеса (типа карданного вала) усложняет конструкцию. Проведено сопоставление возможностей использования литий-ионных аккумуляторов и супермаховиков в рамках развития спортивных гоночных машин, которое показало некоторое преимущество у аккумуляторов. Супермаховики пока не могут запасать много энергии (в ходе движения запасается только та энергия, которую дает торможение), в отличие от аккумуляторов. Тем не менее, супермаховики нашли применение на транспорте (разгон и торможение в электропоездах на железной дороге и в метро), в источниках бесперебойного питания.

Приведем примеры параметров современных супермаховиков. Для хранения больших запасов энергии (мегаватты) сооружают целые «фермы». Например, в Нью-Йорке действует такая ферма супер-

маховиков суммарной емкостью 5 МВт · ч, способная вырабатывать мощность 20 МВт в течение 15 мин (фирма Veason Power). Емкость каждого из двухсот супермаховиков фермы 25 кВт · ч, мощность 100 кВт, частота вращения 16000 об/мин. В Германии разработан супермаховик с запасом энергии 20 МДж (5,5 кВт · ч), мощностью 250 кВт и временем вывода мощности 80 с (компания ATZ). Другие параметры этого накопителя: размеры около 1,5 м, маховик сделан из углеродного волокна с магнитным подвесом на основе высокотемпературной керамики. В России под научным руководством Н.В.Гулия компания KEST создала несколько поколений накопителей кинетической энергии на базе супермаховиков из высокопрочной стальной ленты. Запас энергии в таком супермаховике 20 кВт · ч, мощность 1 МВт, время вывода энергии около минуты. Отмечено, что кластер из нескольких таких накопителей способен обеспечивать выравнивание суточной неоднородности электрической нагрузки целого региона.

От конденсаторов к суперконденсаторам

Конденсаторы представляют собой системы накопления электрических зарядов и в простейшем случае состоят из двух противоположно заряженных пластин электродов, разделенных диэлектриком. Запасаемая энергия равна

$$W_{\text{к}} = \frac{CU^2}{2},$$

где C – емкость конденсатора, U – напряжение на его обкладках. Емкость конденсатора растет при увеличении площади пластин S и уменьшении расстояния d между ними:

$$C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d},$$

где $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, ϵ – относительная проницаемость материала диэлектрика.



Характерный вид и основные параметры высоковольтных конденсаторов: напряжение – киловольты, емкость – доли или единицы микрофарад

Как увеличить запас энергии в конденсаторе? Первое, что напрашивается, – за счет роста напряжения на электродах. По этому пути в течение долгого времени происходило развитие конденсаторной энергетики.

Энергия, которую можно запасти в изолированных на рисунке единичных конденсаторах, сравнительно небольшая и составляет 24 Дж (левый) и 6,5 Дж (правый). А система из многих конденсаторов может иметь значительную энергию. Чемпионом является батарея из 4000 конденсаторов для крупнейшей установки лазерного синтеза (NIF) в США, суммарный запас энергии в конденсаторах составил около 400 МДж. С помощью нескольких ступеней обострения мощности можно получить короткий импульс с суммарной энергией около 2 МДж и сфокусировать 192 лазерных луча на термоядерной мишени. В 2022 году в ходе обжата и нагрева мишени удалось получить 3 МДж термоядерной энергии! Но в высоковольтных конденсаторах имеется ограничение на напряжение, связанное с пробоем диэлектрика. Для лучших типов диэлектриков напряженность электрического поля не превышает 100 кВ/см. Это означает, что при рабочем напряжении конденсатора, например, 10 кВ толщина диэлектрика должна быть не меньше 1 мм. Такие большие толщины приводят к тому, что характерное значение емкости высоковольтных конденсаторов измеряется в миллионных долях фарады (т.е. в микрофарадах).

В суперконденсаторах, иначе называемых ионисторами или ультраконденсаторами, используется другой набор идей:

– очень низкие напряжения U (2–3 вольта),

– предельно малое расстояние между электродами d (масштаба атомных),

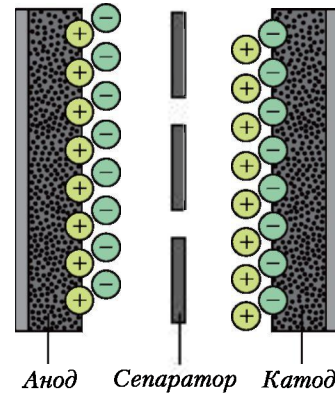
– очень большая площадь пластин S .

Две последние идеи в принципе позволяют увеличить емкость конденсаторов в миллионы раз. В результате в суперконденсаторе сделан акцент на низком напряжении и огромной емкости. А насколько можно увеличить поверхность пластин и уменьшить расстояние между электродами? При одинаковых габаритах конденсатора можно увеличить площадь пластин, сделав их пористыми (используя, например, пористый графит). За счет пор эффективная площадь многократно увеличивается (достигнута удельная площадь пористого графита до 1000 квадратных метров на грамм массы, а в предельном случае использования графена удельная двусторонняя поверхность может превысить $2500 \text{ м}^2/\text{г}$).

В суперконденсаторах при подаче напряжения на границе электрод – электролит образуется двойной электрический слой (у анода и у катода). Такие заряженные слои образуют своеобразные обкладки конденсатора, а граница раздела между электродом и электролитом толщиной порядка 1 нанометр (и даже меньше) служит диэлектриком. В результате в суперконденсаторах удается увеличить удельную емкость до огромной величины (до 500–1000 $\text{Ф}/\text{г}$) при небольшом времени заряда и разряда (секунды) и возможности сохранения заряженного состояния в течение сотен часов. При необходимости нарастить напряжение (скажем, до сотен вольт) можно набирать из элементарных ячеек суперконденсаторов большие сборки путем их последовательно-параллельного соединения. Далее сборка помещается в герметичный корпус.

КПД суперконденсаторов доходит до 95%. Вес существенно меньше, чем у обычных конденсаторов, довольно большой ресурс циклов заряда-разряда (миллионы). Все это выделяет их в отдельную нишу, между обычными конденсаторами и аккумуляторами (типа литий-ионных). К

Электролит



Двойной электрический слой в суперконденсаторе

недостаткам суперконденсаторов относят низкую плотность запасаемой энергии (десятки $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$) и высокую стоимость. Их основное применение – на транспорте (автомобильном, железнодорожном), для запуска двигателей, в портативной электронике и т.д.

Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии – СПИН

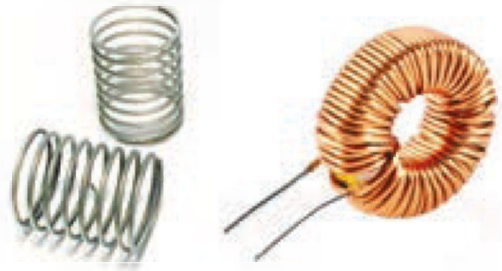
Для запасаания энергии можно использовать не только электрическое поле (как в конденсаторах), но и магнитное. Энергия, запасаемая в индуктивности L при пропускании по ней тока I , составляет

$$W_x = \frac{LI^2}{2}.$$

При использовании обычных проводников ток без внешней подпитки постепенно затухает из-за потерь энергии на сопротивлении (нагрев проводника). Не так в материалах, сопротивление которых при низких температурах обращается в ноль, т.е. в сверхпроводниках. В этом идеальном случае запасенная энергия может храниться очень долго, а при подключении внешней нагрузки высвободиться на ней. В результате переход от обычных проводников к сверхпроводникам является еще одним примером того, что раньше обозначалась приставкой «супер».

Переход материалов в сверхпроводящее состояние происходит при очень низких температурах. На уровне охлаждения жидким гелием (несколько градусов Кельвина, т.е. около -270°C , так называемая низкотемпературная сверхпроводимость (НТСП)) наибольшее распространение получили сверхпроводники на основе NbTi и Nb₃Sn. В последние десятилетия произошел прорыв в области высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) и обнаружены материалы, переходящие в сверхпроводящее состояние при температуре жидкого азота (порядка 77 градусов Кельвина или -196°C). Бурное развитие этого направления привело к созданию нескольких поколений таких материалов и конструкций и их внедрению в энергетику. Первое поколение (ВТСП-1) изготавливалось по технологии «порошок в трубе» и имело вид серебряной матрицы с микроканалами, в которых находится сверхпроводящая керамика, обычно Bi–Sr–Ca–Cu–O. Технология сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2) иная – «лента с покрытием»: микронные керамические покрытия из Y–Ba–Cu–O на подложку. Это направление оказалось наиболее перспективным.

Индуктивные накопители запасают энергию при пропускании тока по проводнику, как правило, цилиндрической (соленоид) или тороидальной геометрии. Казалось бы, цилиндрические индуктивные накопители проще изготовить, легче решается проблема с прочностью конструкции, они дешевле, магнитное поле более однородно. В то же время в тороидальных индуктивных накопителях меньше паразитных магнитных полей (магнитная конфигурация лучше «спрятана» внутри тора). Оба направления развиваются параллельно. На основе соленоидальных СПИН с использованием НТСП и ВТСП-1 в прошлом был создан ряд реальных накопителей. При переходе к более перспективным сверхпроводникам ВТСП-2 чаще используют тороидальную геометрию СПИН. Однако, соленоидальные накопители «не сдаются», что приводит к появлению проектов с усложненной соленоидальной геометрией (типа «соленоид



Примеры геометрии индуктивных накопителей: слева – соленоидальная, справа – тороидальная

в соленоиде»), близкой к тороидальной, но все же более простой.

У сверхпроводниковых индуктивных накопителей имеется ряд важных достоинств: высокий КПД (до 95–98 %); компактность, связанная с высокой удельной энергоемкостью (до 100 МДж/м³ в накопителях с большим запасом энергии); высокие значения мощности и быстродействия; фактически неограниченное число циклов «заряд-разряд»; возможность очень быстрого перехода из режима накопления энергии в режим ее выдачи. Потенциальный уровень запаса энергии с помощью СПИН – до тысяч МВт · ч. Основная причина, сдерживающая их широкое распространение, – относительно высокая удельная стоимость и сложность изготовления оборудования.

Первый опыт использования такого типа накопителя энергии для нужд энергетики



Сверхпроводниковый (ВТСП-2) тороидальный индуктивный накопитель с запасом энергии 1 МДж и мощностью 1 МВт (Россия)

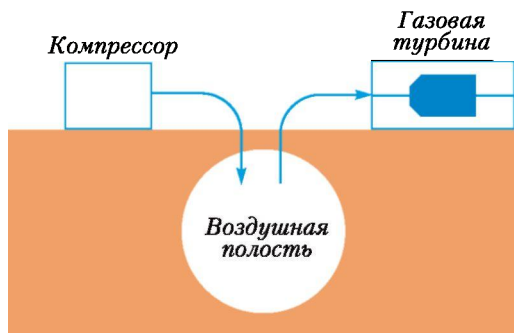
начался в США. В 1983 году на подстанции Такома был введен в эксплуатацию СПИН с энергозапасом 30 МДж, разработанный Лос-Аламосской лабораторией, и использовался для стабилизации работы магистральной линии электропередач. Параметры этого СПИН на основе низкотемпературной сверхпроводимости: максимальная выдаваемая мощность 10 МВт, масса 127 кг, максимальное магнитное поле 4 Тл, рабочая температура 4,5 К. Из наиболее крупных реализованных к настоящему времени разработок отметим СПИН в Анкоридже (США) на энергоемкость 1800 МДж с максимально выдаваемой мощностью 40 МВт, используемый для демпфирования колебаний мощности и поддержания уровня частоты.

Имеется много хорошо проработанных проектов СПИН на энергию от десятков до нескольких тысяч МДж. Работы по таким накопителям ведутся в большинстве развитых странах мира с учетом новейших достижений естественных наук и материаловедения. Области их применения – бесперебойное питание важных объектов, железнодорожный транспорт, сглаживание колебаний энергии в крупных энергетических системах и др.

Воздушно-аккумулирующие электростанции – ВАЭС

Использование энергии сжатого воздуха – один из наиболее простых методов накопления и хранения энергии. Для этого в принципе годятся любые естественные полости внутри Земли (соляные пещеры, отработанные месторождения природного газа, бывшие нефтяные скважины и т.д.), а также искусственные емкости. При небольшой мощности воздушных накопителей (менее 100 кВт) более целесообразны искусственные наземные системы хранения сжатого воздуха, при большой – более экономичны подземные хранилища сжатого воздуха.

Принцип работы заключается в закачке воздуха в емкость специальными компрессорами высокого давления (накопление энергии) и затем, по мере надобности, выпуск сжатого воздуха через газовую



Принцип устройства воздушного накопителя

турбину для выработки энергии. Уровень давлений сжатого воздуха – десятки и даже сотни атмосфер. Наиболее крупная установка на энергии сжатого воздуха имеет мощность 290 МВт (Германия). Время вывода мощности 4–10 ч.

Плюсы воздушных накопителей: возможность сохранять запасенную энергию в течение продолжительного времени, относительная простота и низкая стоимость. Плата за это – очень низкий КПД (в среднем 30–40%), что связано с тепловыми потерями, сопровождающими процесс сжатия и расширения воздуха: при сжатии воздух нагревается, при расширении – охлаждается. Для увеличения КПД при сжатии воздуха максимально отводят тепло, а при расширении, наоборот, подводят тепло. По такой, но более сложной схеме в лучших установках доводят КПД до 60–70%.

Приведем параметры нескольких крупных воздушных накопителей.

В накопителе, построенном в Алабаме (США), в качестве полости использована естественная подземная соляная пещера объемом около 0,5 кубических километров. Компрессором в пещеру закачивается воздух до давления 77 атмосфер. При отдаче накопленной энергии станция может выдавать 110 МВт мощности в течение 26 часов. При этом давление в пещере снижается с 77 до 46 атмосфер. КПД накопителя 54%.

В Германии работает накопитель, рассчитанный на выдачу 290 МВт мощности в течение 4 часов и использующийся для сглаживания пиков выработки ветряных электростанций. Он расположен в двух

подземных соляных пещерах. Максимальное давление воздуха в пещере 70 атмосфер, минимальное – 50 атмосфер. КПД накопителя 42%.

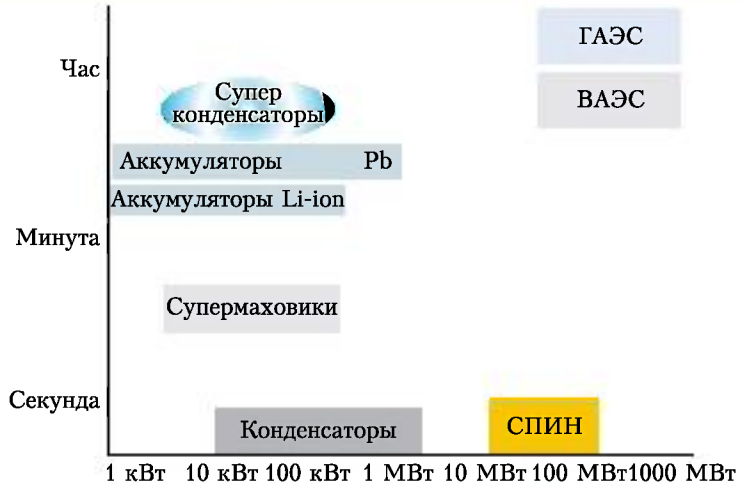
Китай быстро развивает направление накопителей энергии на сжатом воздухе. Уже работают девять накопителей общей мощностью около 700 МВт (из них семь хранят сжатый воздух в специальных контейнерах на поверхности Земли, а два – в соляных пещерах). Приняты амбициозные планы по развитию накопителей на основе сжатого воздуха суммарной мощностью около 7 ГВт к 2025 году и более 40 ГВт к 2030 году. Ожидается, что к 2025 году на сжатый воздух будет приходиться 10% всей хранящейся в китайских накопителях энергии, а к 2030 году – 23 %. В новых воздушных накопителях при выпуске сжатого воздуха не применяется подогрев. Вместо этого утверждается, что сохраняется и повторно используется тепло, которые выделялось на этапе сжатия воздуха, это позволяет увеличить КПД накопителя до 70%.

Воздушно-аккумулирующие электростанции, как правило, имеют мощность в диапазоне от 30 до 300 МВт. Это делает их пригодными для регулирования частоты и выравнивания графиков нагрузок.

Области применения накопителей энергии

Упомянутые выше современные методы накопления энергии (ГАЭС, ВАЭС, СПИН, электрохимические накопители (литий-ионные, свинцово-кислотные...), супермаховики, конденсаторы, суперконденсаторы) отличаются по запасу энергии, мощности, времени выдачи запасенной энергии, удельным показателям. Это позволяет предварительно сопоставить такие методы и оценить область их использования.

Наиболее мощными, с большим временем регулирования мощности являются накопи-



Сопоставление методов накопления энергии в координатах время разряда – мощность

тели на основе гидроаккумуляции и использования сжатого воздуха (ГАЭС и ВАЭС). Несколько меньше мощность у сверхпроводниковых накопителей энергии (СПИН). Для кратковременного регулирования больше подходят аккумуляторы (свинцовые и литий-ионные) и супермаховики. Еще меньше время разряда накопителя у высоковольтных конденсаторов и СПИН.

На выбор решения о создании тех или иных систем накопления, особенно большой мощности, влияет также множество других факторов: экономические, экологические, общественное мнение, сложность изготовления и эксплуатации. При этом существенную роль часто играет не только энергия или мощность накопителя, а и его масштабируемость – от малых к большим значениям, которая позволяет заполнить большее число ниш использования систем накопления энергии.

В целом в мире происходит поворот к сбору и хранению энергии. В настоящее время лидируют гидроаккумулирующие станции и электрохимические накопители. При этом стоимость ГАЭС практически вышла на стационар, в то время как, например, Li-ion аккумуляторы постепенно дешевеют. Есть надежда, что быстрое развитие одного или нескольких других методов накопления энергии позволит им также войти в число лидеров.