

Дисциплина: Современная электроэнергетика**Лекция № 14****Тема: Современные накопители электрической энергии****Лектор: Сарсенбаев Е.А.**

«Энергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры

E-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Основные виды накопителей электрической энергии;
2. Аккумуляторные батареи;
3. Суперконденсаторы;
4. Сверхпроводящий индуктивный накопитель;
5. Маховиковые накопители;
6. Гидро- и воздушно-аккумулирующие накопители;
7. Контрольные вопросы.

1. Основные виды накопителей электрической энергии

1. Аккумуляторные батареи – широко распространенное средство накопления энергии. Кроме традиционных кислотных все шире применяются усовершенствованные аккумуляторы на основе сульфида натрия и никель-кадмийевые, с лучшими характеристиками и большим сроком службы, чем кислотные. Внедряются особо компактные ионно-литиевые аккумуляторы. Цикл накопления энергии — суточный.

Родственны по реакциям химическим аккумуляторам регенеративные топливные элементы на основе электролитов: бромид цинка, бромид ванадия или бромид натрия. Разделение электролита в них осуществляется с помощью ионообменных мембран.

2. Суперконденсаторы – усовершенствованные конденсаторы, работающие на постоянном напряжении и имеющие очень высокую плотность заряда благодаря выбору конструкции и обработке материала электродов. Емкость таких конденсаторов может достигать нескольких фарад. Компания Eestor (США) считает возможным разработать материал для суперконденсаторов с удельной энергией 280 Вт*ч/кг, для литий-ионных батарей эта величина составляет только 120 Вт*ч/кг, а для кислотных аккумуляторов – только 32 Вт*ч/кг. Разработанная в университете Arizona технология DESDs (Digitated Energy Storage Devices) с использованием нано пор в диэлектрике, позволяет получить в 10 000 раз большую плотность заряда, чем в обычных конденсаторах. Срок службы суперконденсаторов, как правило, выше, чем обычных. Применяются суперконденсаторы главным образом на электротранспорте, как накопитель для пусковых токов, разгружающий от них аккумулятор, но есть перспективы использования их и в энергетике.

3. Сверхпроводниковые накопители (СПИН) запасают энергию в магнитном поле индуктивной катушки из сверхпроводника, образуемом протеканием постоянного тока. Их главное преимущество – высокий КПД преобразования (больше 95 %) и возможность выдавать мощность практически мгновенно. Сверхпроводящие накопители выдерживают тысячи циклов «заряд-разряд» без каких-либо последствий для них.

4. Маховиковые накопители запасают кинетическую энергию при разгоне ротора, чтобы далее отдать ее в нужный момент в виде электроэнергии. В качестве разгонного двигателя и средства отбора электроэнергии используется обычно вертикальный двигатель-генератор. Цикл накопления энергии – минуты.

Высокоскоростные маховики изготавливаются из совершенных композитных материалов с низкой массой и большой прочностью к центробежным силам. Они более компактны по сравнению с низкоскоростными, маховик которых выполняется из металла. Недостатком кинетических накопителей является большая потребность в уходе, чем для химических аккумуляторов.

5. Гидроаккумулирующие и воздушно-аккумулирующие накопители, лежащие в основе электрических станций и установок, использующих законы воды и сжатого воздуха.

1. Основные виды накопителей электрической энергии

Накопители обеспечивают:

- управление режимами нагрузки — разряд накопителя во время пика нагрузки и зарядка в ночное время (выравнивание дневного и ночного графиков нагрузки);
- управление потоками мощности — питание местных нагрузок, когда с этим не справляется общая сеть;
- резерв — возможность быстрого замещения вышедшего из работы крупнейшего генератора в энергосистеме;
- помочь установкам, использующим возобновляемые источники энергии — выравнивание графика подачи мощности;
- повышение возможности передачи электроэнергии — участие в управлении устойчивостью, регулировании напряжения, частоты и реактивной мощности, повышающие стабильность работы электрических сетей;
- выравнивание графика нагрузки в электрических сетях со значительной долей распределенных источников электрической энергии;
- повышение качества электроэнергии — поддержание стабильности напряжения установкой накопителей, как на питающих линиях, так и непосредственно у потребителей, особенно при резко переменном характере нагрузки. Источник мощности для непрерывного электроснабжения;
- поддержку работы потребителей с режимами частого торможения и пуска, особенно, в режимах рекуперативного торможения.

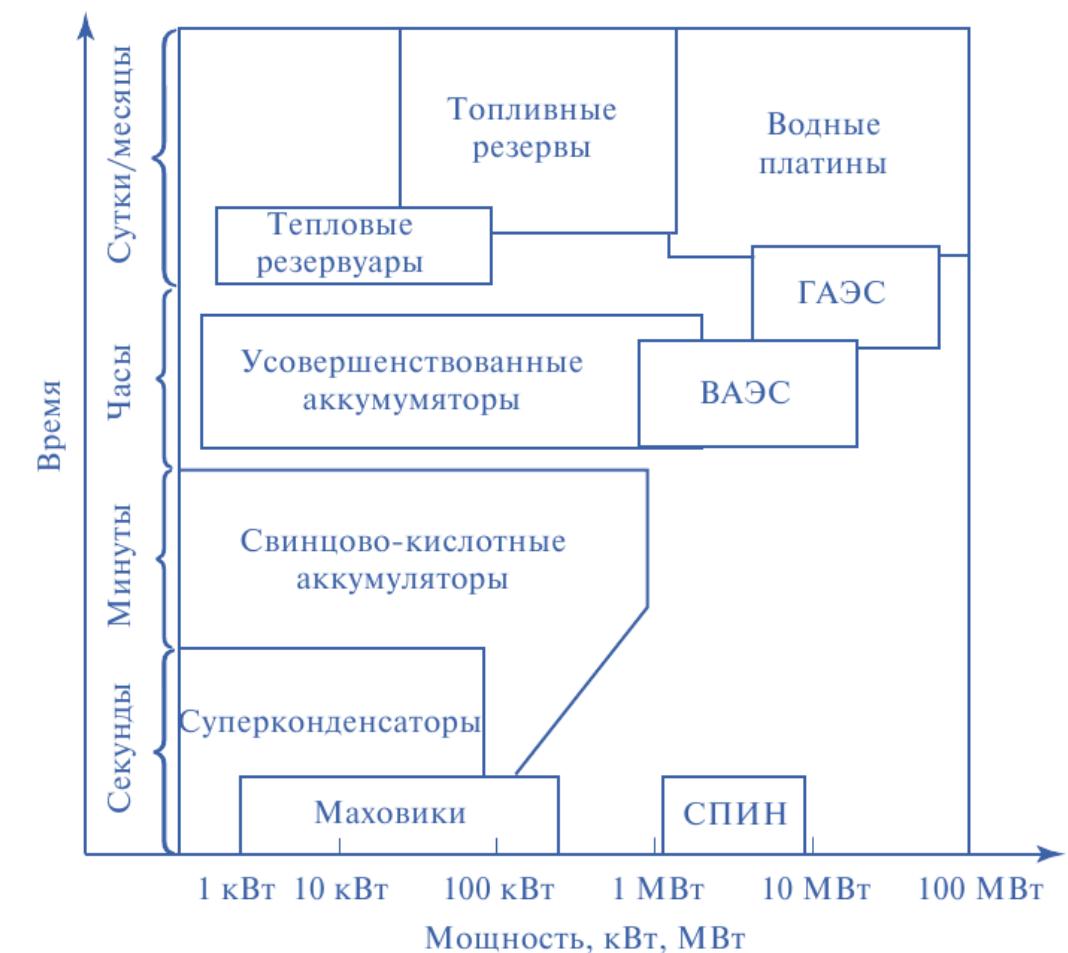


Диаграмма областей применения различных видов накопителей в зависимости от их мощности и времени разряда накопленной энергии

2. Аккумуляторные батареи

Свинцово-кислотные аккумуляторы

В свинцово-кислотных аккумуляторных батареях (СКА) электролитом является раствор серной кислоты, активным веществом положительных пластин — диоксид свинца PbO , отрицательных пластин — свинец Pb . В процессе заряда и разряда аккумулятора на электродах происходят электрохимические окислительно-восстановительные реакции, а электролит является средой для транспорта ионов между электродами.

СКА батареи используются в самых различных областях, за исключением портативных — там серьезным препятствием является их низкая удельная энергоемкость. Различают стартерные, тяговые и буферные СКА.

Никель-кадмиеевые аккумуляторы

Принцип действия основан на формировании гидроокиси кадмия на аноде и гидрооксида никеля — на катоде. Их энергоемкость почти в 2 раза выше, чем СКА, они работоспособны при низких температурах, при этом допустимые токи заряда и разряда также существенно выше. В то же время никель-кадмиеевым аккумуляторам присущ такой недостаток как эффект памяти — энергоемкость резко падает при неполном разряде или заряде, для ее восстановления требуются специальные алгоритмы заряда. Таким образом, длительное хранение никель-кадмиеевых аккумуляторов возможно только в полностью заряженном состоянии.

Литий-ионные аккумуляторы

Принцип действия данной электрохимической системы основан на интеркаляции ионов лития в различные соединения при разных электрохимических потенциалах. Для данного типа аккумуляторов характерны высокая энергоемкость, глубокие циклы заряда-разряда (70—80 %), отсутствие эффекта памяти. В то же время ресурс и стоимость таких аккумуляторов зависят от типа электрохимических систем, применяемых на катоде и аноде, а также от температуры и режимов эксплуатации. Повышение температуры при эксплуатации или даже хранении существенно снижает ресурс и увеличивает скорость саморазряда.

Применение в качестве анодного материала нано структурированного титаната лития ($LiTiO$) позволяет, увеличить ресурс до 12 000 циклов, но со снижением энергоемкости до 70—80 Вт*ч/кг.

Натрий серные аккумуляторы

Данный тип аккумуляторов является аналогом литий-ионных — в разряженном состоянии натрий образует с серой химическое соединение (полисульфид натрия), в заряженном — сера и натрий представлены в виде чистых веществ, разделенных керамической мембраной. Есть ряд существенных отличий — электролит в данной системе керамический, что обуславливает высокую рабочую температуру аккумулятора (290—360 °C). Теоретическая энергоемкость данной системы может достигать 925 Вт*ч/кг, однако в реальности достигнуты гораздо меньшие цифры — 150—100 Вт*ч/кг.

2. Аккумуляторные батареи

Свинцово-кислотные аккумуляторы

Типичный КПД кислотных аккумуляторов 80—85 %, главное применение — накопление и выдача энергии, а не выдача мощности: продолжительность разряда обычно 1 ч и более, работа в режиме разряда быстрее, чем 15 мин возможна, но нецелесообразна. Мощность накопителя существенно падает с ростом тока разряда. Срок службы кислотных аккумуляторов сравнительно невелик, до 10 лет, они допускают несколько тысяч циклов «заряд-разряд», срок службы зависит от глубины разряда. В работе имеется значительное число установок мощностью 10—50 МВт.

Никель-кадмиеевые аккумуляторы

Эффективный накопитель энергии NiCd- батареи, обладает высокими характеристиками заряда при температурах от -20 до -40 $^{\circ}\text{C}$. Мощные NiCd-батареи применяются наравне с кислотными аккумуляторами. Удельная стоимость их по емкости существенно выше, чем у кислотных аккумуляторов, однако часто решает преимущество длительного срока службы — более 10 000 циклов при глубине разряда до 80 %. Недостаток — применение вредного кадмия, требующее специальных мер безопасности при изготовлении. КПД NiCd-батарей 79 %, что определяется низким номинальным напряжением элементарных ячеек батареи.

Литий-ионные аккумуляторы

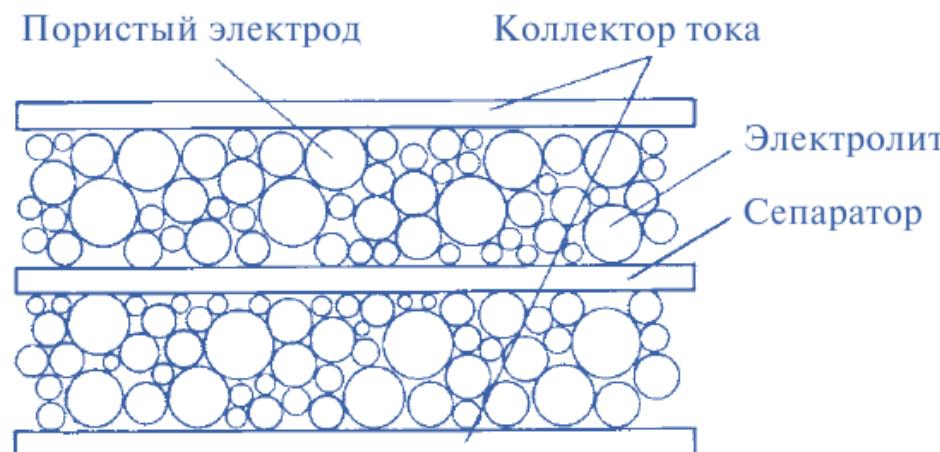
Важнейшая накопительная техника для портативных устройств — мобильники, ноутбуки, благодаря очень высокой удельной плотности заряда по массе. Возможно и применение в стационарных установках. Время разряда допустимо 15 мин и менее, КПД 90—95 %, емкость — 1 кВт*ч и больше.

Натрий серные аккумуляторы (батареи Zebra)

NaS-батареи и натрий-никель-хлоридные (NaNiCl — Zebra) являются высокоэффективными батареями с жидким электролитом. Для поддержания жидкого состояния электролит подогрет до 270 — 350 $^{\circ}\text{C}$. В холодном состоянии заряд и разряд батарей невозможен из-за возникновения механических усилий, разрушающих керамику. Батареи рассчитаны на суточный режим работы. Удельная плотность заряда у NaS-батарей в 3 раза выше, чем у кислотных аккумуляторов. Zebra-батареи применяются в электроавтомобилях, КПД высокотемпературных батарей 70—80 %.

3. Суперконденсаторы

Принцип действия



Детали конструкции двухслойного суперконденсатора

Суперконденсаторы могут выдерживать большое число циклов «заряд-разряд» без разрушения, надежны и долговечны, они имеют наивысшую плотность заряда из всех типов конденсаторов и соответственно, самую низкую удельную стоимость на единицу емкости. При одних и тех же габаритах, сравнение обычного типичного электролитического и суперконденсатора одних габаритов следующие: первый имеет емкость 0,1 Ф при напряжении 16 В и накапливает энергию 12,8 Дж, суперконденсатор — 800 Ф на 2,5 В и 2500 Дж.

Конденсаторы выполнены в виде двухслойных конструкций, состоящих из двух электродов, выполненных из материала, содержащего углерод и электропроводящие полимерные пленки. Пространство между электродами заполнено электролитом и разделено пористой мембраной. Диаметр пор мембраны соответствует размерам ионов электролита, вследствие чего они могут проникать от одного электрода к другому. По существу мембранны позволяют получить эффект микро расстояния между электродами и существенно повысить емкость конденсатора. В результате в конденсаторе при приложении к электродам напряжения на их границах создается двойной электрический слой, который можно рассматривать как конденсатор с двумя обкладками. Так как расстояние между обкладками очень мало и измеряется ангстремами, емкость образованного двойного слоя велика и энергия, запасенная ими, достигает больших величин. Их удельная емкость составляет более 100 Ф/г. Упрощенная электрическая схема представляет собой два последовательно соединенных конденсатора, через электрически проводящий электролит, каждый из которых соответствует отдельному конденсатору с двойным электрическим слоем на поверхности каждого электрода. В зависимости от вида электролита удельная емкость в этих конденсаторах может изменяться от 40 Ф/г до 175 Ф/г, а напряжение на одном элементе соответствует примерно 1 В для конденсаторов с жидким электролитом, 3—3,5 В с органическими.

3. Суперконденсаторы

Функции суперконденсаторов в системах электроснабжения

Функции накопителя	Мощность	Энергия
Демпфирование колебаний мощности в системе (разряд менее 5 с)	100 МВт	500 МДж
Поддержка при перерывах питания до старта резервного дизеля	20—100 МВт	300—1500 МДж
Регулирование частоты в системе (поглощение или выдача энергии)	100—1000 МВт	0,4—40 МДж
Обеспечение качества электроэнергии в составе динамического стабилизатора напряжения DVR	1—5 Вт	10—50 МДж

4. Сверхпроводящий индуктивный накопитель

Принцип действия

Энергия E , запасаемая в электромагнитной катушке, определяется соотношением $E = 1/2 L I^2$.

Сверхпроводниковые устройства разделяют на две группы: низкотемпературные (НТСП) и высокотемпературные (ВТСП). Первая группа работает при температуре 4 К, создаваемой жидким гелием, в вторая — при температуре 77 К, создаваемой жидким азотом. Основным материалом для НТСП являются сплавы Bd—Ti. Сплавы для ВТСП более разнообразны и охлаждаются жидким азотом.

В результате применения такого преобразователя для связи СПИН и трехфазной сети можно обеспечить следующие функции работы системы:

- разряд СПИН (инвертирование);
- заряд СПИН (выпрямление);
- регулирование активной мощности в обоих направлениях от сети к СПИН и наоборот;
- компенсацию реактивной мощности в сети и потребителях;
- компенсацию кратковременных, глубоких провалов и исчезновения напряжения сети;
- активную фильтрацию высших гармоник тока в низкочастотной части его спектра;
- обеспечить быстродействующую защиту СПИН.

Важным свойством СПИН, подключенного к сети, является его способность обеспечивать динамическую устойчивость системы после больших возмущений, например, возникновения КЗ. До возникновения аварии СПИН может работать в режиме выдачи энергии. После ее возникновения он переводится в режим потребления энергии, создавая дополнительную нагрузку на генераторы электростанции, так как в системе возникает избыток энергии из-за отключенной нагрузки. Как только угловая скорость ротора генератора начинает увеличиваться СПИН отключается или переводится в режим работы с отдачей электроэнергии. Энергоемкость СПИН должна обеспечить три цикла автоматического повторного включения.

4. Сверхпроводящий индуктивный накопитель

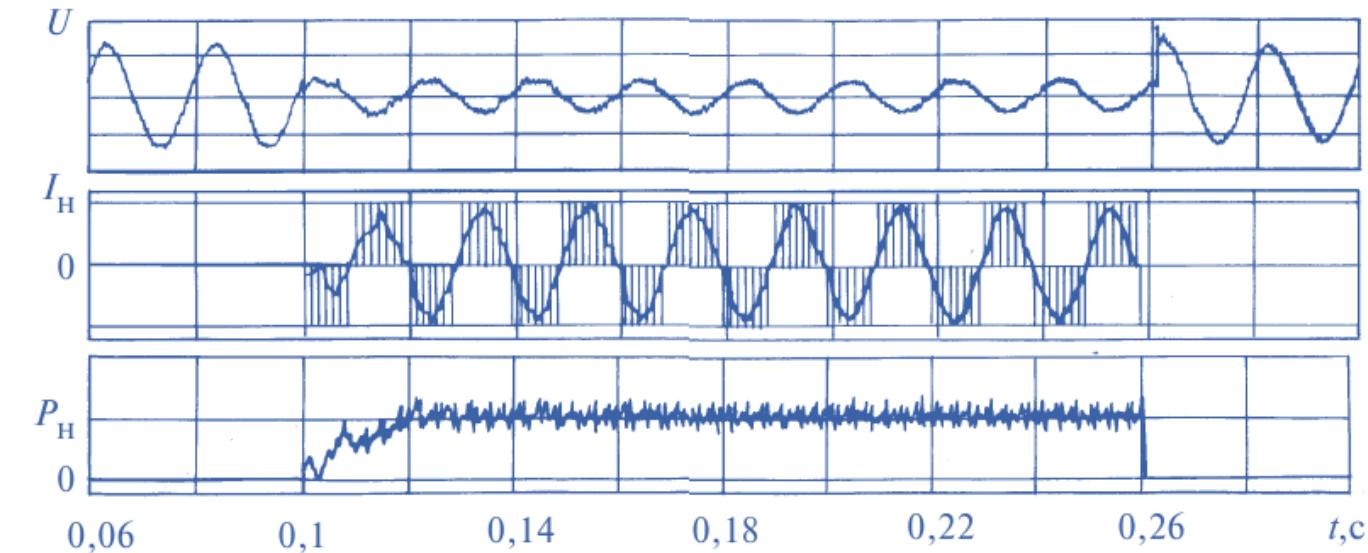
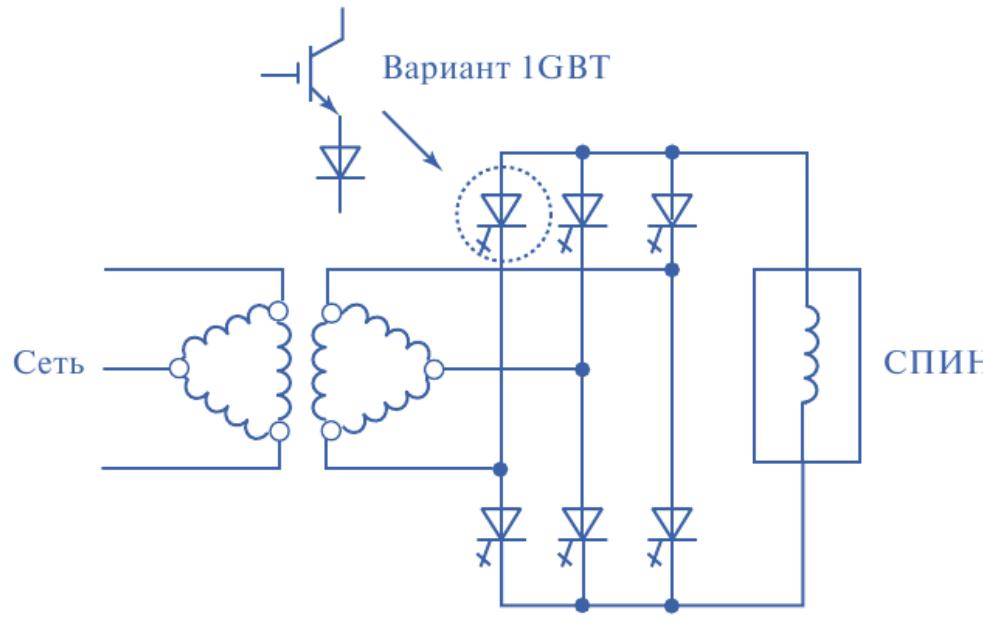


Схема регулятора для СПИН и диаграммы его работы в режиме потребления активной мощности

P_h — мощность нагрузки; I_h — ток нагрузки; U — напряжение сети

Сверхпроводниковые индукционные накопители энергии без потерь запасают и отдают электроэнергию с высокой скоростью и при неограниченном числе циклов «заряд-разряд».

Корпорация ASC выпускает накопители для повышения качества электроэнергии типа PQ-SMES с 1990 г. Их мощность 3—10 МВт, с помощью параллельного включения преобразователей на IGBT-транзисторах можно стыковать по несколько катушек, получая необходимую мощность. Установлено шесть накопителей, поддерживающих напряжение в сети. Катушка накопителя — на ниобий-титановом СП-накопителе, охлаждаемая жидким гелием до 4,2 К, токоподводы — на ВТСП. Мощность, выдаваемая каждым СПИН — 2 МВт, в течение 1 с выдается реактивная мощность 2,8 МВ*А. Требования к СПИН — поддержание напряжения 90 % в течение 0,5 с и 95 % — в течение 5 с.

5. Маховиковые накопители

Принцип действия

В основе маховикового накопителя лежит накопление в теле распределенной массы $\rho(x)$, вращающейся с угловой скоростью ω вокруг оси, энергии W :

$$W = \frac{1}{2} J \omega^2,$$

где J — момент инерции, определяемый в виде $J = \int \rho(x) r^2 dx$;

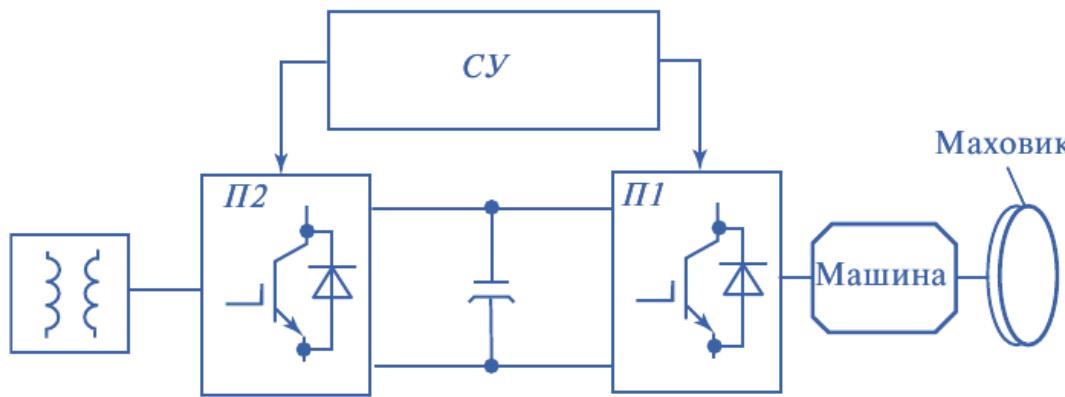
r — радиус вращения, определяющий расстояние от оси каждой точки распределённой массы

Формы маховиков

Тип маховика	Форма
Постоянное сечение	
Диск с постоянным напряжением	
Близкое к постоянному сечение	
Диск конического сечения	
Плоский диск без отверстий	
Тонкое кольцо (обод)	
Стержень или округлая щетка	
Плоский диск с отверстиями	

5. Маховиковые накопители

Значительное увеличение количества выводимой энергии стало возможным благодаря достижениям силовой электроники. Трудность решения этой задачи заключалась в уменьшении скорости ротора по мере отдачи энергии и, следовательно, снижение частоты выходного напряжения относительно сетевого. Эффективно ее решить стало возможным с использованием полностью управляемых электронных ключей и применения методов импульсной модуляции токов и напряжений на повышенной частоте. На этом принципе преобразование энергии выполняется преобразователями переменного/постоянного тока, выполненным по следующей структуре:



Структурная схема связи маховикового накопителя с сетью



Диаграмма сравнения маховиковых накопителей, конденсаторов и аккумуляторных батарей

Компания Caterpillar совместно с институтом EPRI разработала серию источников бесперывного питания на маховиках типа CAT UPS. Мощность установок 250—900 кВт, КПД — 97 %. Компания уже реализовала до сотни установок, применяемых в центрах обработки данных, в производстве полупроводников и на других производствах, где перерывы питания недопустимы, вместо аккумуляторных батарей.

Поставщик маховиков компания Active Powers (Техас) предпочитает сравнительно низкую частоту вращения, 7700 об/мин. Ротор маховика — из стали. Потери установки мощностью 480 кВт составляют 3,5 кВт — ее КПД выше, чем у аккумуляторных батарей.

Успешным примером применения маховиковой системы как средства воздействия на режим сети является накопительная установка ROTES, разработанная компанией Toshiba. Система представляет собой вертикальный асинхронизированный двигатель-генератор мощностью 26,5МВжА с маховиком на валу. Маховой момент системы — 710 т*м.

6. Гидро- и воздушно-аккумулирующие накопители

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) — наиболее освоенные накопители в виде гидроэлектростанций с насосо-турбинами и двигатель-генераторами. Закачиваемая в верхний резервуар вода с потреблением энергии по низкой цене выдает свою энергию в периоды пика потребления. Цикл накопления энергии — суточно-сезонный.

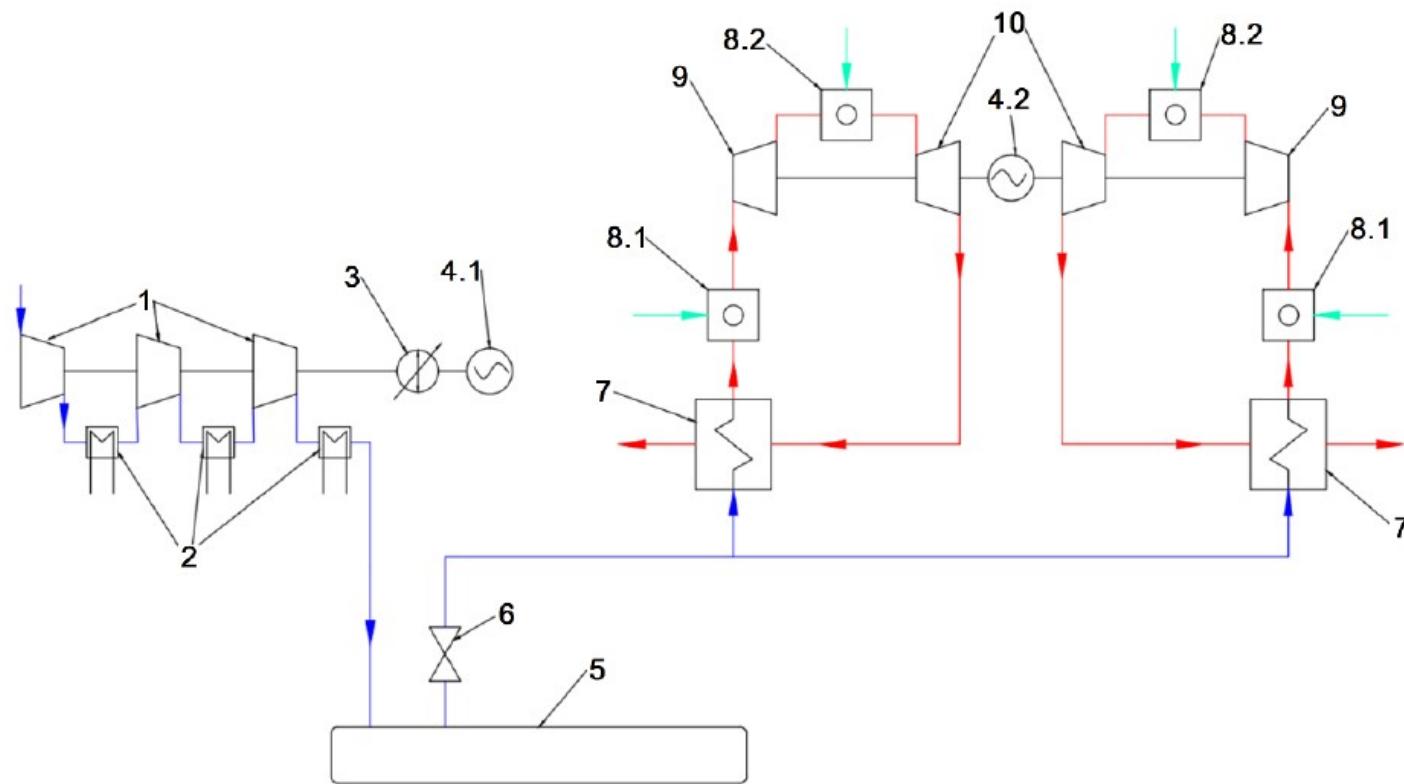
Основные виды применения ГАЭС — быстрый резерв, срезание пиков нагрузки, и резерв мощности для пуска других электростанций. Типичный КПД 65—80 %, сильно зависящий от выбора места ГАЭС. Современные двигатель-генераторы с регулированием частоты вращения дают возможность регулировать частоту в системе и при работе в насосном режиме. Высокая маневренность агрегатов ГАЭС (переход из одного режима в другой производится за 15 с и менее) позволяет широко использовать их для регулирования и резерва быстрого ввода в энергосистемах.

В зависимости от места ГАЭС, продолжительность выдачи электроэнергии составляет несколько часов. Мощность ГАЭС — от 10 до 1000 МВт, время набора полной мощности — около 90 с.

Воздушно-аккумулирующие установки (ВАЭС) используют ту же концепцию, что и ГАЭС, но носителем запасаемой энергии является воздух. В периоды минимума нагрузки воздух закачивается в подземные резервуары. В период дневного максимума сжатый воздух приводит в действие турбоагрегат. В дополнение к воздушной турбине на валу агрегата может иметься и газовая турбина. Цикл накопления энергии — суточно-недельный.

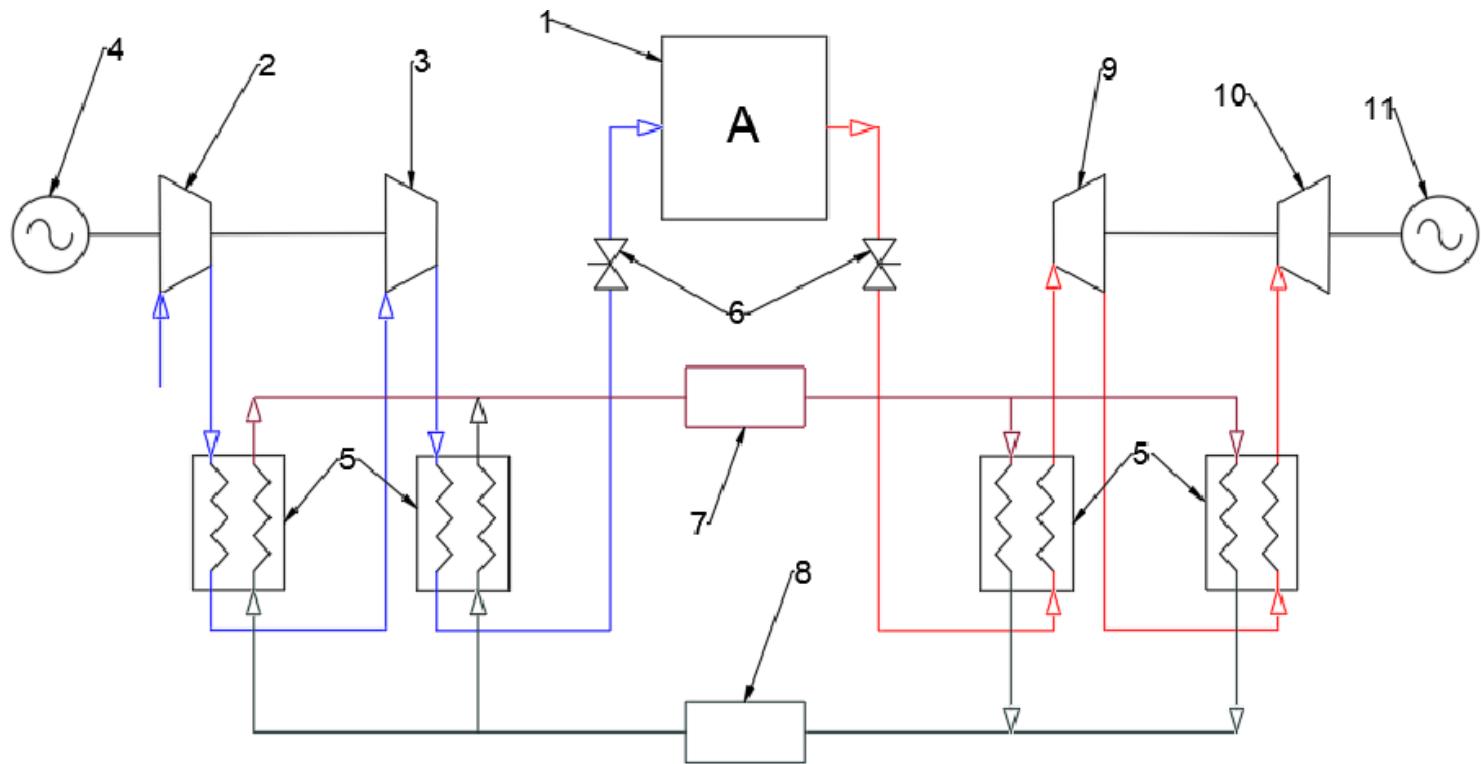
ВАЭС подразделяются на диабатические (Д-ВАЭС), адиабатические (А-ВАЭС) и изотермические станции (И-ВАЭС). В диабатическом цикле, тепловая энергия, образующаяся в результате сжатия воздуха, отводится в окружающую среду, в то время как в контуре разрядки нередко осуществляется сжигание топлива для повышения энталпии рабочего тела на входе в турбину. В адиабатических установках тепловая энергия сжатия, как правило, сохраняется в накопителях тепловой энергии на базе материалов с фазовым переходом. Это тепловая энергия используется при расширении, тем самым исключив потребность во внешних источниках в период разрядки воздушного аккумулятора. В отличии от Д-ВАЭС и А-ВАЭС, в И-ВАЭС образование тепловой энергии при сжатии должно быть сведено к минимуму либо отсутствовать.

6. Гидро- и воздушно-аккумулирующие накопители



Технологическая схема Д-ВАЭС: 1 – компрессор, 2 – охладитель воздуха, 3 – регулируемая гидромуфта, 4.1 – электродвигатель, 4.2 – электрогенератор, 5 – хранилище сжатого воздуха, 6 – дроссель, 7 – рекуператор, 8.1 – камера сгорания высокого давления, 8.2 – камера сгорания низкого давления, 9 – турбина высокого давления, 10 – турбина низкого давления

6. Гидро- и воздушно-аккумулирующие накопители



Технологическая схема А-ВАЭС: 1 – хранилище сжатого воздуха, 2 – компрессор высокого давления, 3 – компрессор низкого давления, 4 – электродвигатель, 5 – рекуператор, 6 – дроссель, 7 – бак горячего теплоносителя, 8 – бак холодного теплоносителя, 9 – турбина высокого давления, 10 – турбина низкого давления, 11 – электрогенератор

5. Контрольные вопросы

Ответьте на следующие вопросы:

1. Какие функции выполняют в ЭЭС накопители электроэнергии?
2. Перечислите основные виды накопителей с указанием областей их рационального использования.
3. Какие типы АБ используются в ЭЭС? Дайте их характеристику.
4. Как изменится накопленная энергия в маховиковом накопителе при повышении скорости его вращения в 2 раза?
5. Поясните принцип действия суперконденсаторов и их характеристики.
6. В каких областях целесообразно использование СПИН?
7. Как осуществляется связь СПИН с сетью?
8. Поясните принцип действия ГАЭС.
9. Приведите примеры использования накопителей в электроэнергетике.
10. Приведите структурную схему АБП с использованием АБ.