



Сравнительный анализ различных технологий аккумулярования электроэнергии

Попель О.С¹., Тарасенко А.Б^{1,2}.

1-Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

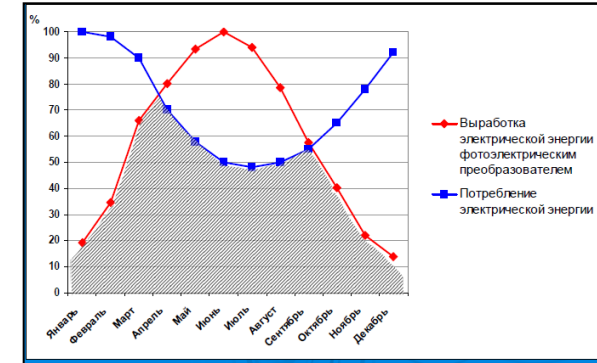
2- Общество с ограниченной ответственностью «Товарищество энергетических и электромобильных проектов»



Задачи и технологии

Задачи, стоящие перед применением накопителей:

- Нивелирование стохастической генерации первичных источников
- Покрытие неравномерностей потребления
- Резервирование энергопитания ответственных потребителей и собственных нужд энергоустановки



Рассматриваемые технологии:

- Электрохимические аккумуляторы (Pb-Acid, Li-ion, NiCd)
- Суперконденсаторы
- Резервирование энергопитания ответственных потребителей и собственных нужд энергоустановки



Ключевая задача – оценка применимости и обоснование выбора типа накопителя

- 1. Сравнение использования накопителя с конкурирующими технологиями**
- 2. Сравнение накопителей различных типов между собой**

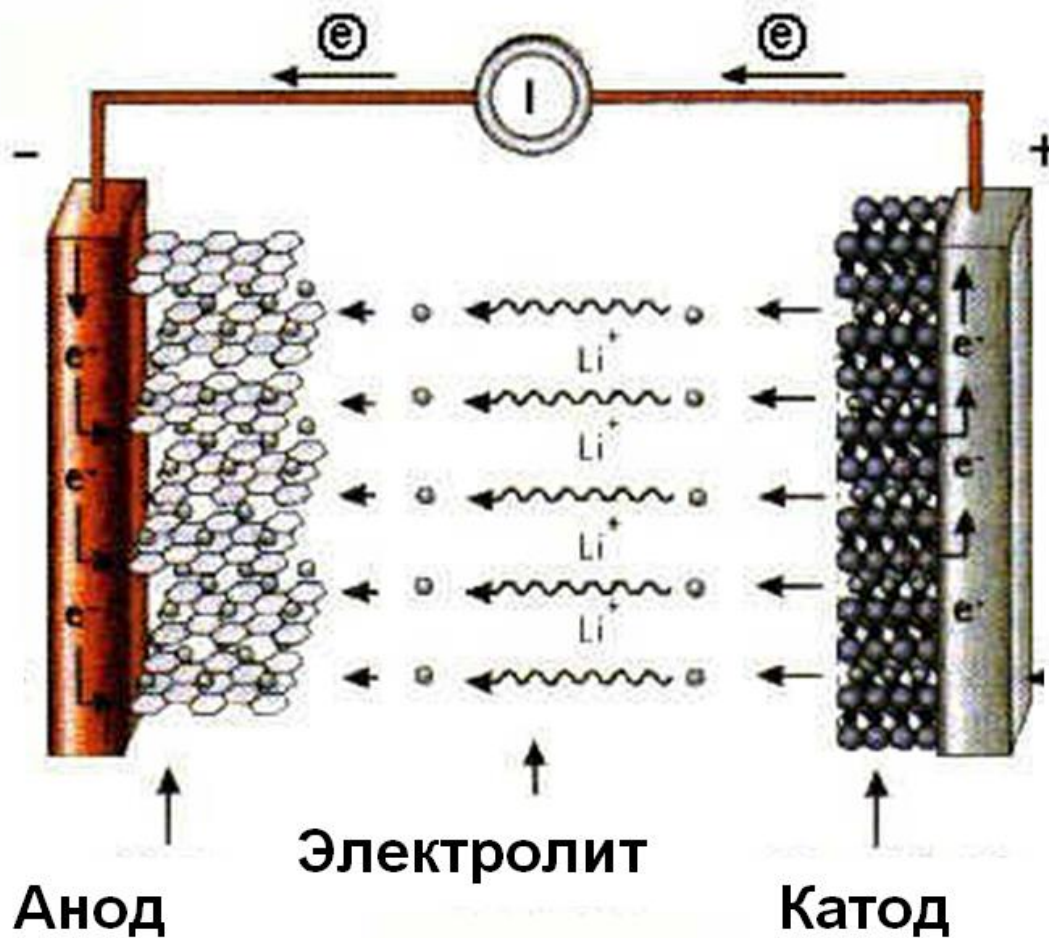
Основной критерий выбора – использование оптимального способа аккумуляирования энергии должно обеспечивать меньшую совокупную стоимость владения системы, чем конкурирующие технологии и другие типы накопителей

Совокупная стоимость владения включает в себя капитальные затраты (в том числе и сопутствующее оборудование), затраты по замене и обслуживанию оборудования, затраты электроэнергии и расходных материалов за время эксплуатации

Дополнительные критерии могут быть обусловлены спецификой ниш применения накопителей!



Принцип действия электрохимического аккумулятора (на примере Li-ion)





Электрохимические аккумуляторы – Pb-Acid

1. Заливные
2. Герметизированные
3. Гелевые
4. Панцирные



Хорошо освоенная технология, обладающая минимальной стоимостью

Срок службы до 10 лет (в большинстве случаев 2-3 года)

Ресурс при циклировании сильно зависит от типа аккумулятора и режима использования. Типичные значения – до 2000 циклов @50% DOD; 300 циклов @100% DOD

Обычно неустойчивы к низким температурам.

Стоимость в диапазоне 0.1-0.5 USD/Втч

Некоторые разновидности герметизированных и заливных аккумуляторов допускают токи перегрузки 7-13 C. В основном – 0.1-0.3 C. (C – энергоемкость аккумулятора в Ач)



Электрохимические аккумуляторы – Ni-Cd

1. Заливные
2. Герметизированные



Наиболее стойкие к низким температурам аккумуляторы

Срок службы до 10 лет

Ресурс при циклировании во многом зависит от режима использования. Типичные значения – до 2000 циклов @80%

Некоторые разновидности подвержены эффекту памяти

Стоимость в диапазоне 0.4-1.0 USD/Втч

Токи 1-5 C. (C – энергоемкость аккумулятора в Ач)



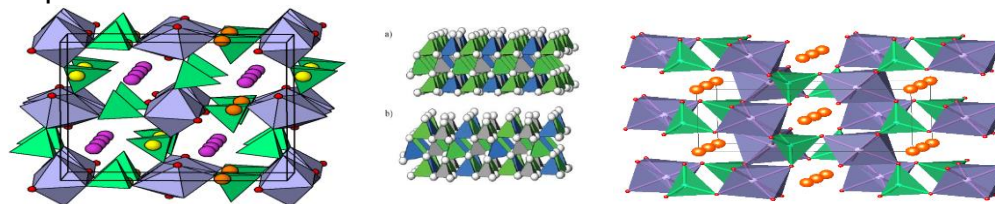
Электрохимические аккумуляторы – Li-ion

Наиболее «молодая» технология, активно проникающая во все сферы применения

Практически все параметры существенно зависят от выбора катодного и анодного материала. В таблице представлены данные по различным катодным материалам в случае графитового анода [P. Birke et al., Electric Battery: Actual and Future Technology Trends, Business Unit Hybrid Electric Vehicles Division Powertrain, Continental AG, presentation at ElectricMotion, Prague, May 6th, 2010.]

Использование $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ в качестве анодного материала увеличивает ресурс, допустимые токи и толерантность к низким температурам, а также цену и массогабаритные характеристики.

Стоимость в диапазоне 0.7-4.0 USD/Втч



Катод	LCO	LNO	NCA	NMC	LMO	LFP
Материал	LiCoO_2	LiNiO_2	$\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$	LiMn_2O_4	LiFePO_4
Средний потенциал отн. Li^+/Li , В	3.7	3.6	3.65	3.9	4.0	3.5
Удельная емкость, мАч/г	~150	~180	~190	~170	~110	~150
Удельная энергия, Втч/кг	~550	~650	~690	~660	~440	~500



Суперконденсаторы

1. С водным электролитом
2. Со щелочным электролитом

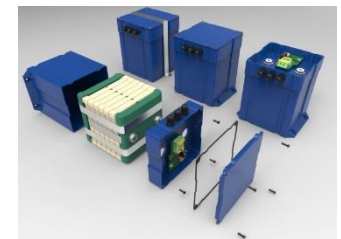
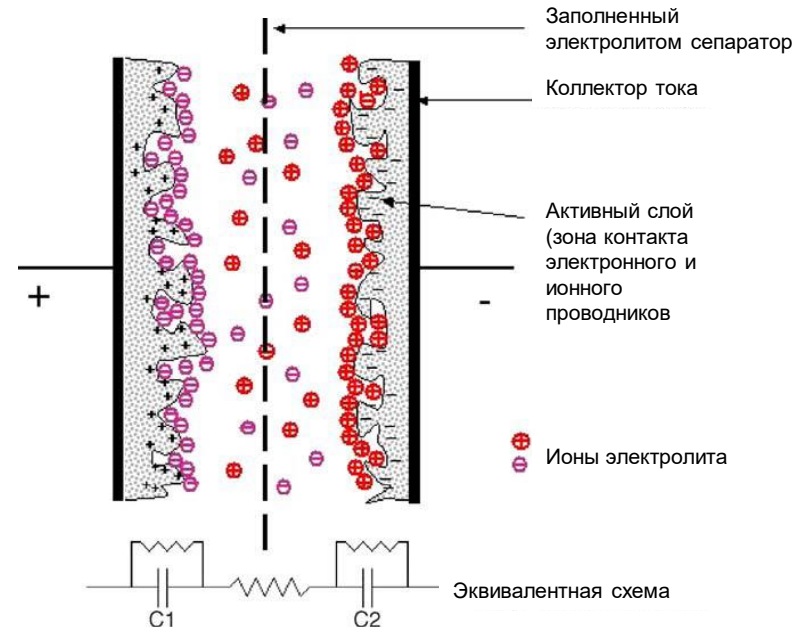
Источник мощности на основе аккумулялирования энергии в двойном электрическом слое

Срок службы до 20 лет (до 1 млн. циклов)

Удельная энергоемкость в пределах 2-5 Втч/кг при удельной мощности до 5-10 кВт/кг (токи в сотни С по аналогии с аккумуляторами)

Работоспособны при низких температурах.

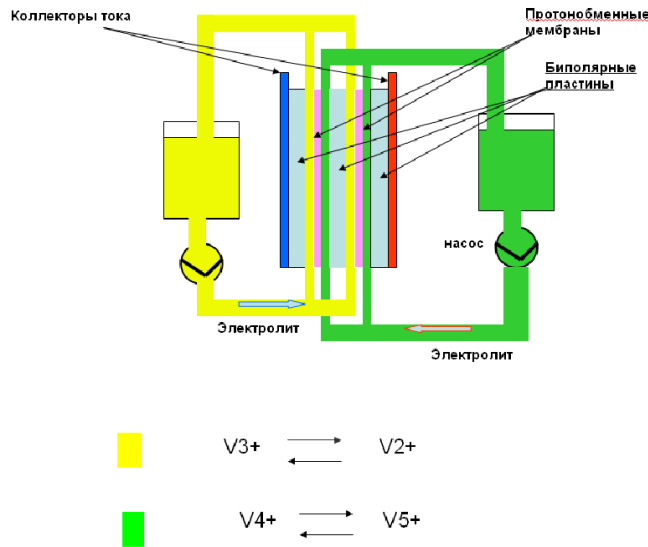
Стоимость в диапазоне 16-25 USD/Втч





Проточные батареи

1. Zn-Br
2. V-V



Технология известна с 1970-ых годов.

Срок службы до 20 лет, до 20000 циклов заряда-разряда (100%)

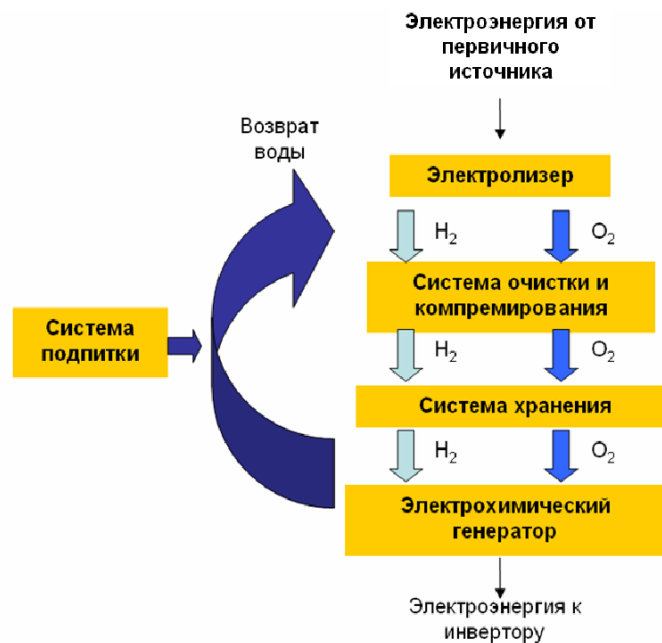
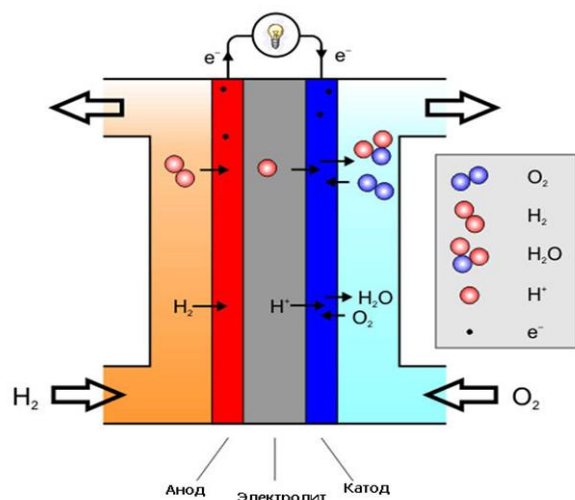
Удельная энергоемкость в 20-40 Втч/кг, большие мощности нежелательны (характерные токи до 200 мА/см²)

Стоимость в диапазоне 400-700 USD/кВтч и 3000-5000 USD/кВт





Водородный цикл



Прямое (для накопления энергии) и обратное (для генерации энергии) преобразование электрической энергии в химическую энергию водорода и кислорода.

Срок службы лимитируется сроком службы топливного элемента или водородного двигателя (8-10 тыс. часов)

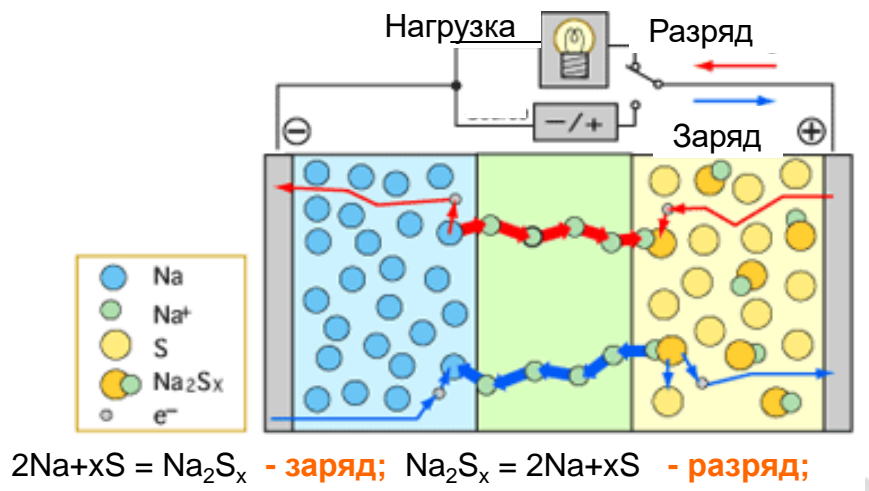
При высоких давлениях водорода (до 700 атм.) возможно достичь удельной энергоёмкости в 200-250 Втч/кг

Высокая стоимость мощности (около 10 тыс. USD/кВт) и малый КПД (20-30%).

Наличие системы водоподготовки и компремирования водорода



Серно-натриевые батареи



Принцип действия

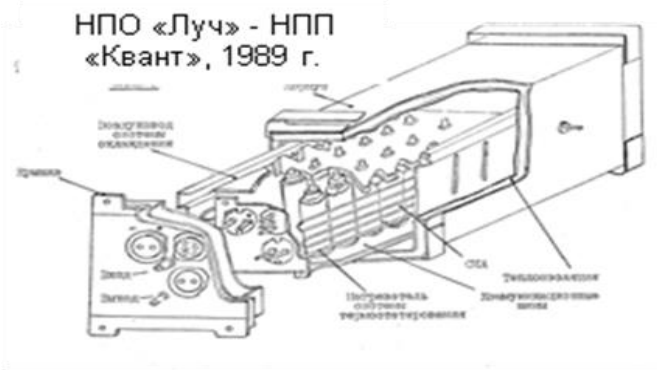


Применение серно-натриевых аккумуляторов для регулирования работы ветроэлектростанции мощностью 51 МВт (вверху, мощность накопителя 34 МВт). Tomamae Wind Farm.

Рабочая температура электролита 250-300 С

Ресурс при циклировании до 4000 циклов @80% DOD

Стоимость менее 1.0 USD/Втч

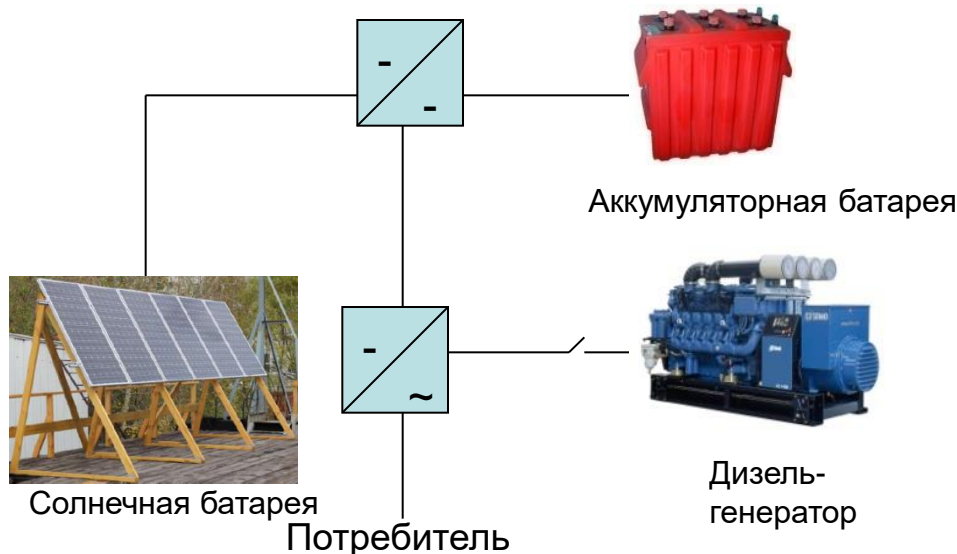


Отечественный экспериментальный образец

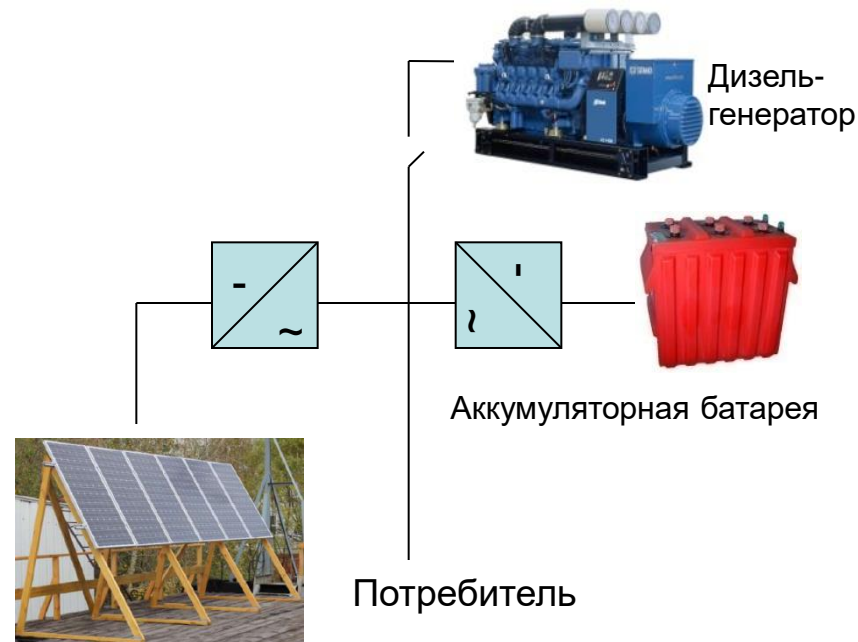


Схемы включения. Преобразователи

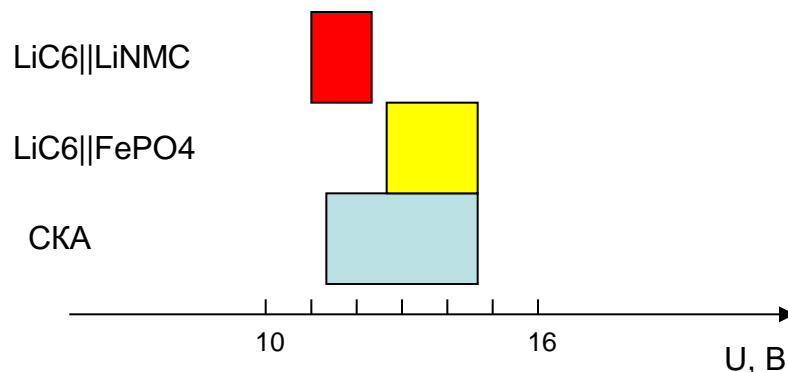
Шина постоянного тока с контроллером заряда и батарейным инвертором



Шина переменного тока с сетевым и батарейным инвертором

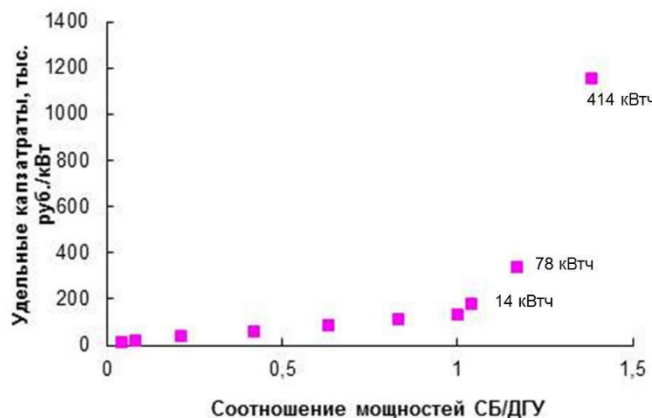


Контроллер заряда и батарейный инвертор характеризуются КПД преобразования энергии, который зависит от режима работы и состояния накопителя. Удельная стоимость этих устройств достигает 30% стоимости энергоустановки. Кроме того, возможности преобразователя по управлению током заряда/разряда в зависимости от напряжения во многом определяют срок службы накопителя. Крайне целесообразно применение систем балансировки напряжений на аккумуляторах в составе батареи – обычно преобразователь не контролирует состояние отдельных элементов

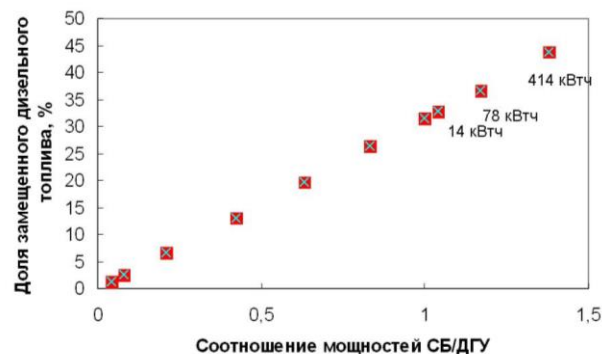




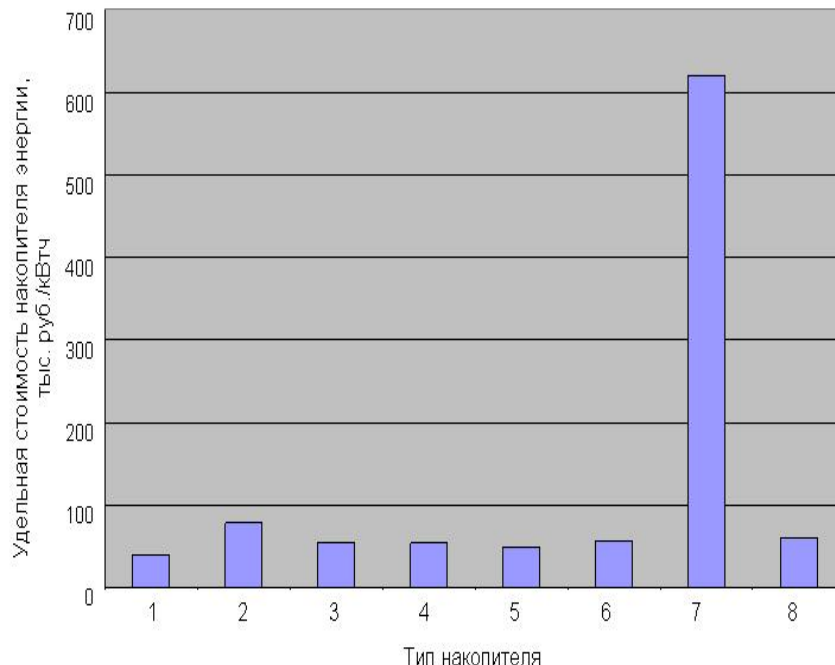
Автономные солнечные и солнечно-дизельные электростанции



А



Б

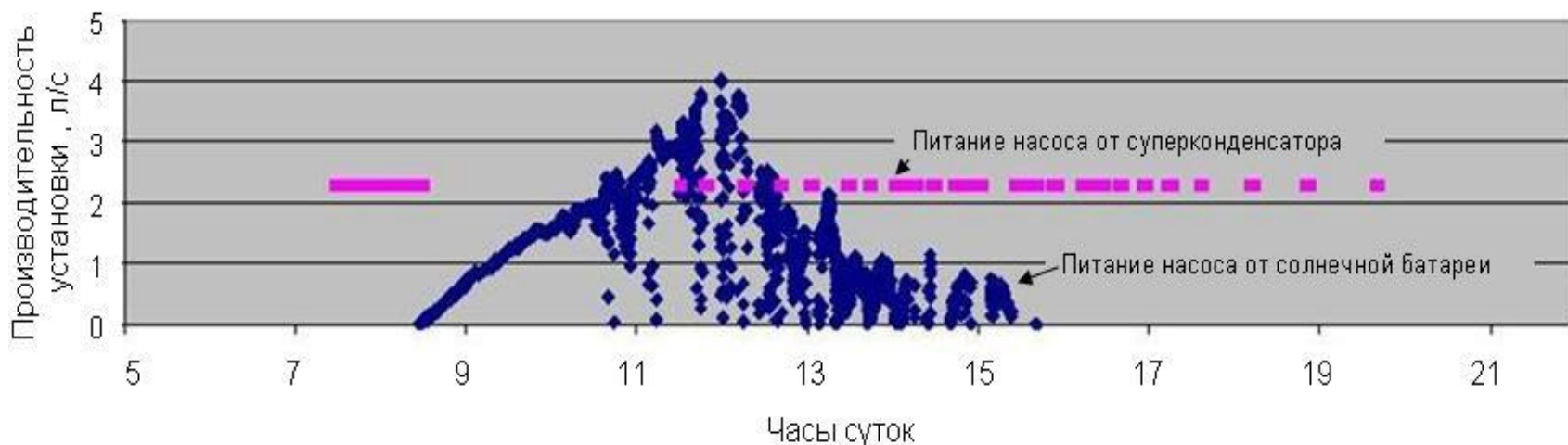


Удельные затраты (в расчет на 1 кВтч емкости) на накопитель энергии мощностью 1 кВт и энергоемкостью 10 кВтч за весь период эксплуатации (20 лет) с учетом нормативного ресурса и требуемых замен. А 1- литированный фосфат железа/углерод, 2 -литированные смешанные оксиды/ углерод, 3 - литированные смешанные оксиды/ нанотитанат лития, 4- гелевые свинцово-кислотные аккумуляторы, 5- панцирные (OPzV) свинцово-кислотные аккумуляторы, 6 – герметизированные (AGM) свинцово-кислотные аккумуляторы, 7 – водородный цикл, 8 – ванадиевая редокс-батарея.

Расчетные зависимости дополнительных удельных капитальных А) затрат на солнечную батарею (СБ) и накопитель энергии и Б) степени замещения дизельного топлива для гибридной солнечно-дизельной установки от соотношения установленной мощности СБ и дизельгенераторной установки (ДГУ) в условиях поселка с населением 120 чел. в климатических условиях юга Республики Саха (Якутия) при установленной мощности ДГУ 60 кВт. (Энергоемкость накопителя в случае его использования указана на рисунке)



Автономные солнечные водоподъемники



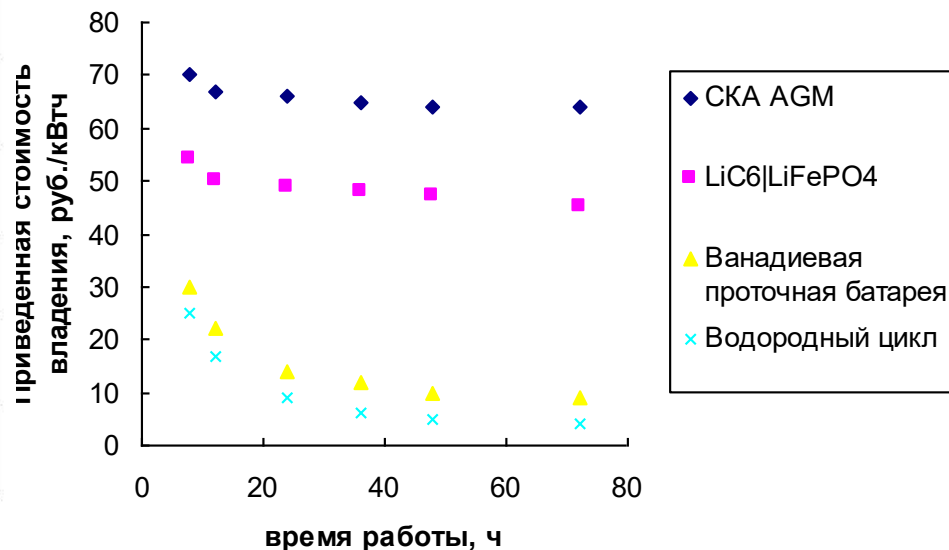
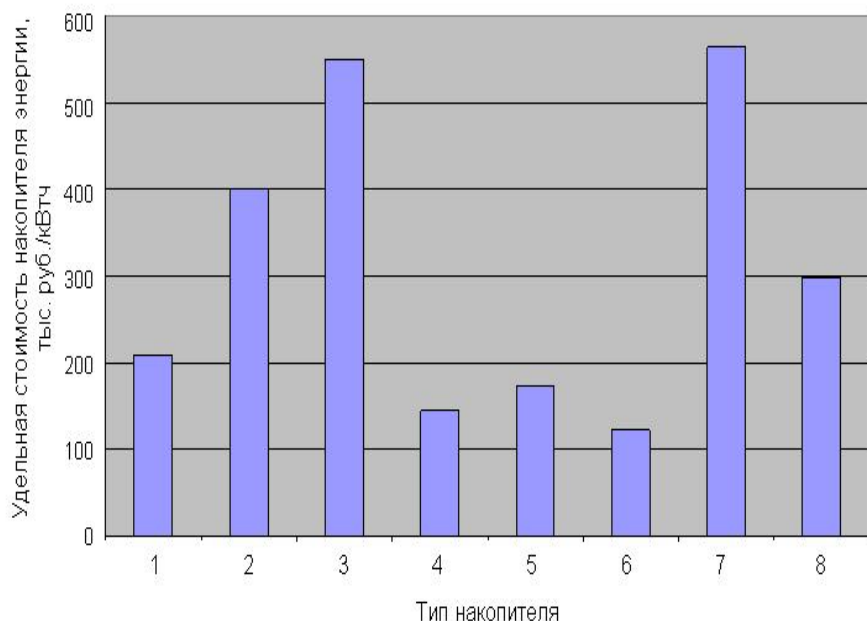
Расчетная зависимость производительности насосной установки от времени.
(номинальная мощность насоса 2,7 л.с., пиковая мощность солнечной батареи 2 кВт, напор 7 м)

Альтернативное решение – увеличение мощности солнечной батареи и накопителя воды (1260 долл. США при увеличении мощности солнечной батареи с контроллером против 840 долл. США при использовании суперконденсаторной батареи)

Конкурентоспособность суперконденсаторной батареи относительно аккумуляторной обеспечивается большим количеством циклов заряда-разряда



Источники аварийного, резервного и бесперебойного питания



Удельные затраты (в расчет на 1 кВтч емкости) на накопитель энергии мощностью 1 кВт и энергоемкостью 10 кВтч за весь период эксплуатации (20 лет) с учетом нормативного ресурса и требуемых замен.

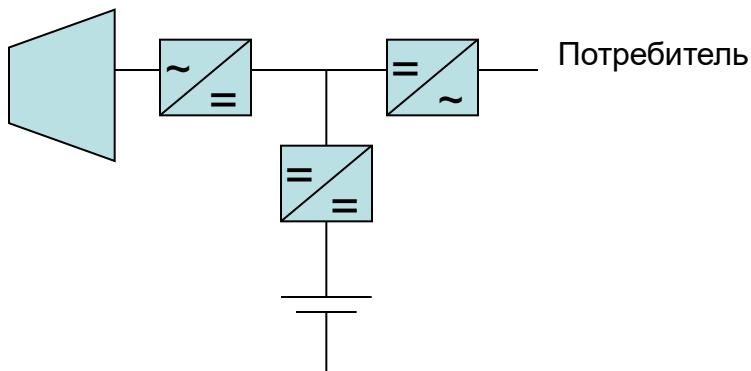
1- литированный фосфат железа/углерод, 2 - литированные смешанные оксиды/ углерод, 3 - литированные смешанные оксиды/ нанотитанат лития, 4- гелевые свинцово-кислотные аккумуляторы, 5- панцирные (OPzV) свинцово-кислотные аккумуляторы, 6 – герметизированные (AGM) свинцово-кислотные аккумуляторы, 7 – водородный цикл, 8 – ванадиевая редокс-батарея.

Зависимость стоимости владения (за 20 лет) от длительности работы источника резервного питания на основе различных типов накопителей электрической энергии

Видно, что с возрастанием требований по длительности автономной работы источника конкурентоспособность проточных батарей и водородного цикла существенно возрастает.

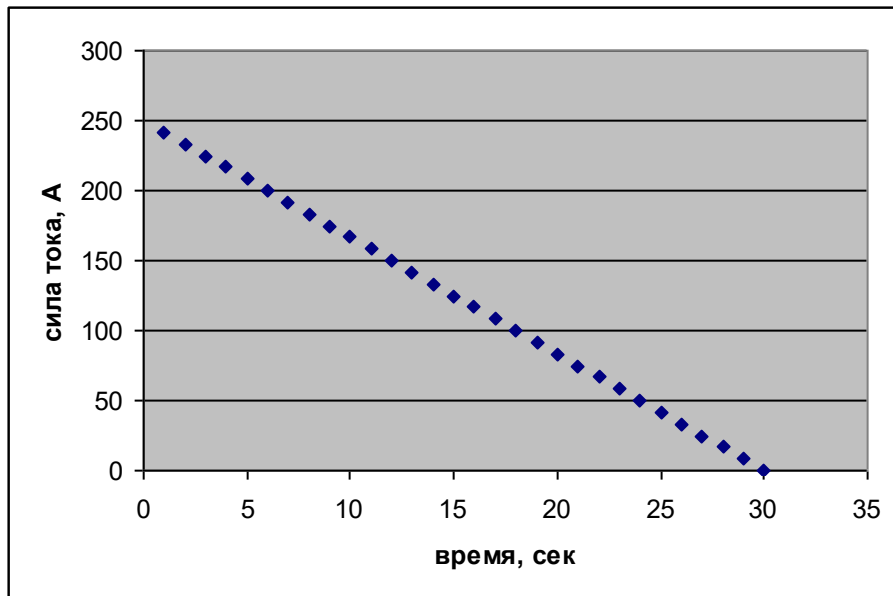


Буферные накопители в составе газовых микротурбинных установок



Задачи накопителя в составе установки Capstone C30:

- Обеспечение собственных нужд во время пуска;
- Энергопитание потребителя во время запуска;
- СКА быстро выходит из строя при пониженных и повышенных температурах;
- СКА переразмерен из-за пусковых токов;
- СКА быстро выходит из строя при глубоком разряде (в процессе транспортировки и ожидания пуска/наладки);



Оценочная зависимость тока аккумуляторной батареи от времени для случая запуска микротурбины Capstone C30



Поиск альтернативы свинцово-кислотным аккумуляторам



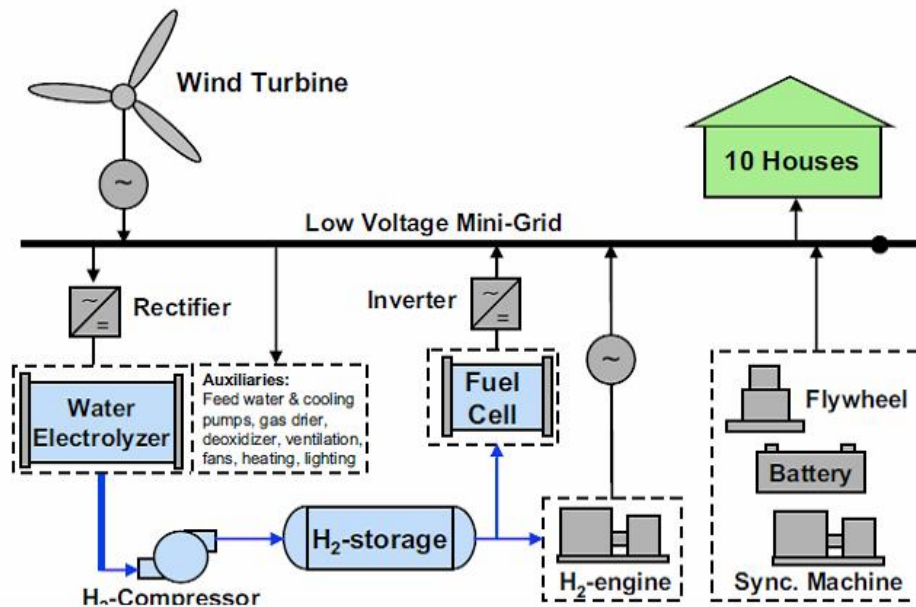
Малая и распределенная энергетика

Технико-экономические показатели батарей на основе различных химических источников тока для микротурбины C30 Capstone (пусковой режим).

Источник тока/параметры	Varta Black 56R C14	Delkor AGM 70 R	XALT 31 HP	ТЭЭМП СТ-1500-220
Система источника тока	Свинцово-кислотный заливной аккумулятор	Свинцово-кислотный герметизированный аккумулятор со стекловолоконным сепаратором	Литий-ионный аккумулятор (LiC ₆ LiNMC)	Суперконденсатор с органическим электролитом
Масса батареи, кг	266	380	114	60
Запасаемая энергия, Втч	7980	4790	5500	200
Стоимость батареи, долл. США	1300	3500	23400	1460
Количество требуемых замен комплектов элементов за 10 лет	5	3	1	1
Стоимость батареи с учетом замен элементов за 10 лет, долл. США	6380	10500	23400	1460



Буферное аккумулирование энергии в составе ветродизельных комплексов



Основные преимущества Ni-Cd:

-Допускает высокие токи заряда/разряда;

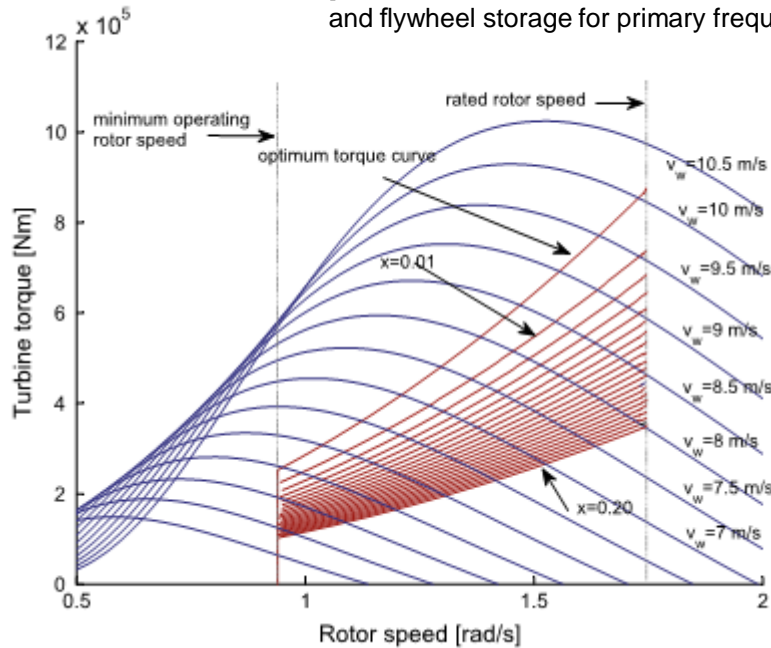
-Работает при низких температурах;

[O.Ulleberg, Torgeir Nakken, Arnaud Ete, The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway-Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy modeling tools// International Journal of Hydrogen Energy, Vol 35 (2010), pp. 1841-1852;]



Участие ветроэлектрогенераторов в регулировании частоты и мощности сети. Повышение качества энергии, вырабатываемой ветровыми станциями

[Francisco Díaz-González, Melanie Hau, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support// Electrical Power and Energy Systems 68 (2015) 313–326;]



Зависимости момента на валу от скорости вращения ветроколеса для 1,5 МВт-ного ветроэлектрогенератора. Синие линии – работа в режиме максимальной аэродинамической эффективности, красные – работа в режиме неполной загрузки (с резервированием мощности для нужд регулирования частоты). Резервирование мощности – до 20%.

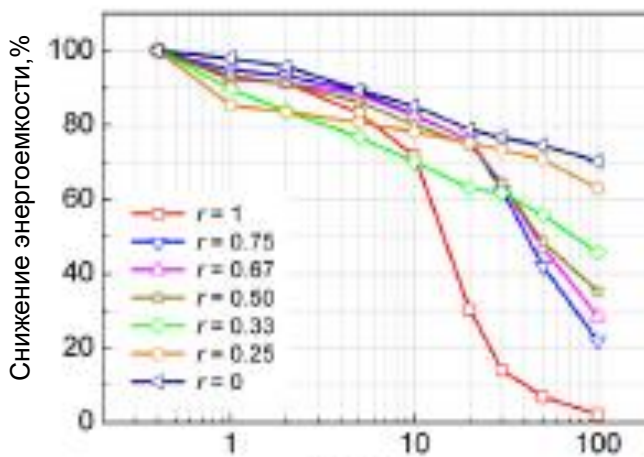
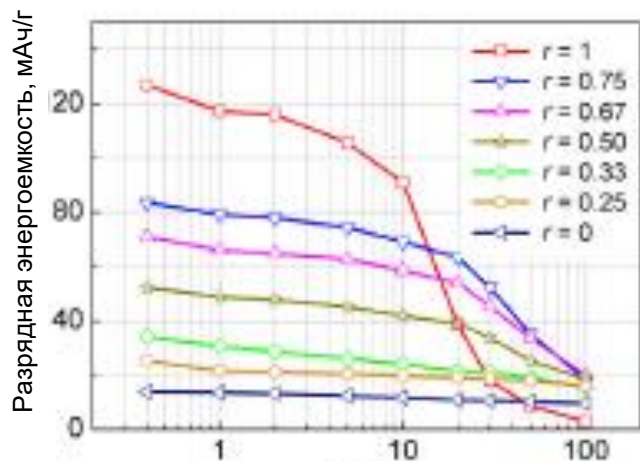
1. Актуаторы угла атаки лопастей питаются от суперконденсаторных батарей (90 В);
2. Суперконденсаторы и маховики рассматриваются как краткосрочный накопитель, позволяющий отказаться от неполной выработки электроэнергии;
3. Суперконденсаторы рассматриваются как элемент ветроэлектрогенераторов с асинхронными генераторами как источник мощности для возбуждения обмоток генератора



Гибридные накопители энергии

Гибридные суперконденсаторы

1. Замена положительного электрода на активированный уголь при сохранении анодного электрода аккумулятора;
2. Подмешивание активированного угля к положительному электроду аккумулятора

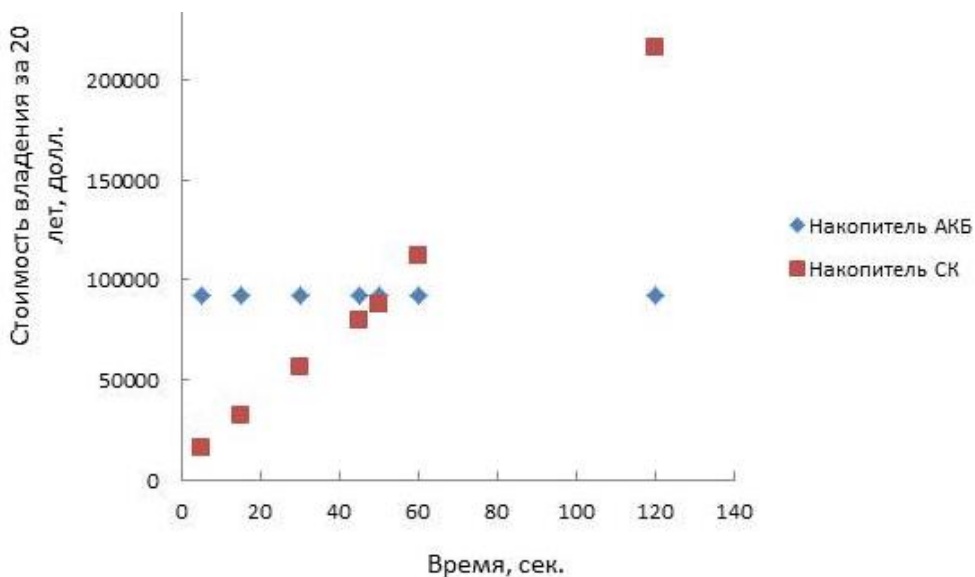
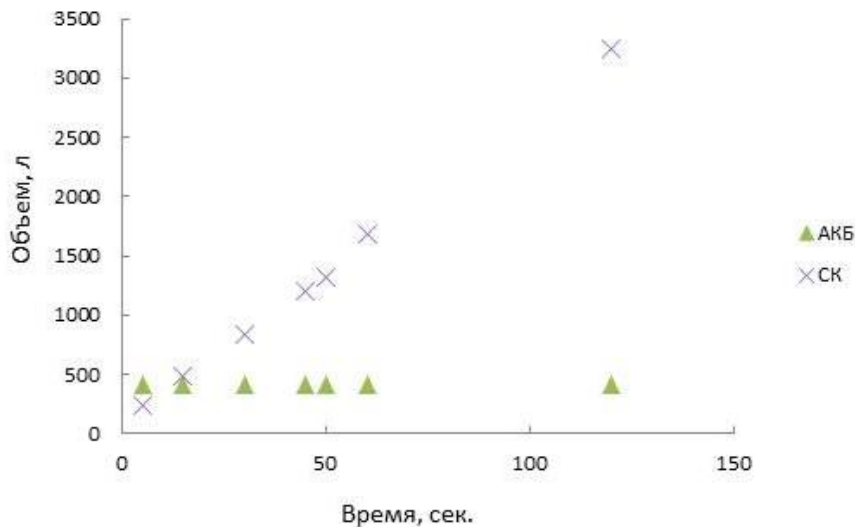


Ток относительно номинальной энергоёмкости для литий-ионного гибридного суперконденсатора (r – доля катодного материала LiNMC, соответственно $1-r$ доля активированного угля)

[Xianzhong Sun, Xiong Zhang, Bo Huang, Haitao Zhang, Dacheng Zhang, Yanwei Ma, (LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O₂ + AC)/graphite hybrid energy storage device with high specific energy and high rate capability//Journal of Power Sources 243 (2013) 361-368;]



Гибридные накопители энергии

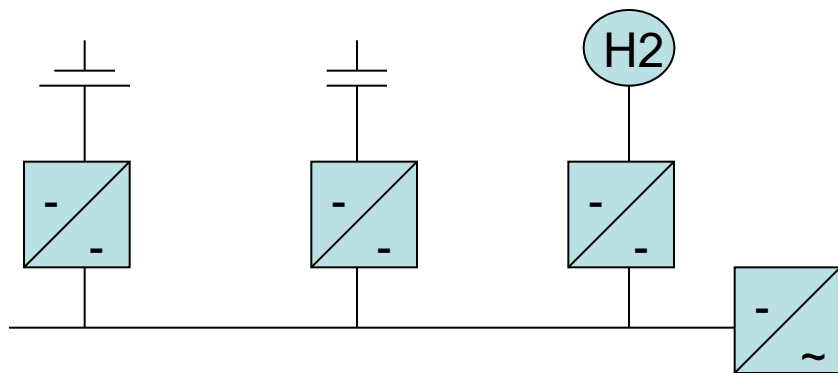


Суперконденсаторный накопитель обладает преимуществами над аккумуляторным по занимаемым объемам на временных интервалах до 10-15 сек, по стоимостным соображениям, с учетом срока службы – до 50-55 сек

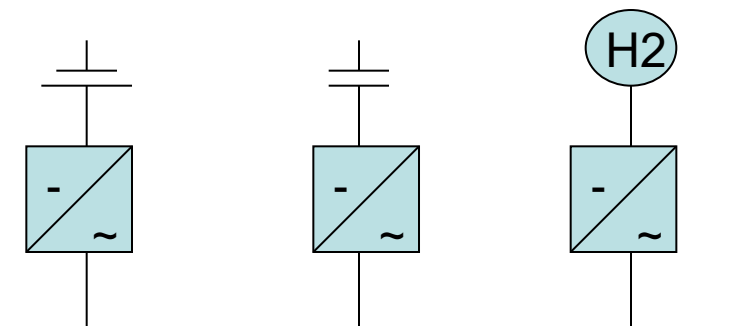


Гибридные накопители энергии

Совокупность нескольких накопителей с общей системой преобразования и управления



Общая шина постоянного тока



Общая шина переменного тока

-Подобные системы формируются для при наличии графиков нагрузки с существенными изменениями мощности;

-Критерием подбора состава являются характерные времена изменения мощности;

-В ряде случаев перекачка энергии между накопителями существенно ухудшает параметры системы, в ряде – наоборот, является основным алгоритмом ее работы;

-Качество работы гибридного накопителя целиком определяется преобразователями и их алгоритмами управления.

