



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Интеллектуальная система управления многоуровневой интеграцией генерирующих станций и потребителей на основе системы накопления энергии

Новиков Николай Леонтьевич

АО «Научно-технический центр ФСК ЕЭС»

Заместитель Научного руководителя

д.т.н., профессор МЭИ,

действительный член Электротехнической Академии наук РФ

Новиков Александр Николаевич

АО «Научно-технический центр ФСК ЕЭС»

Главный специалист

Жораев Тимур Юлдашевич

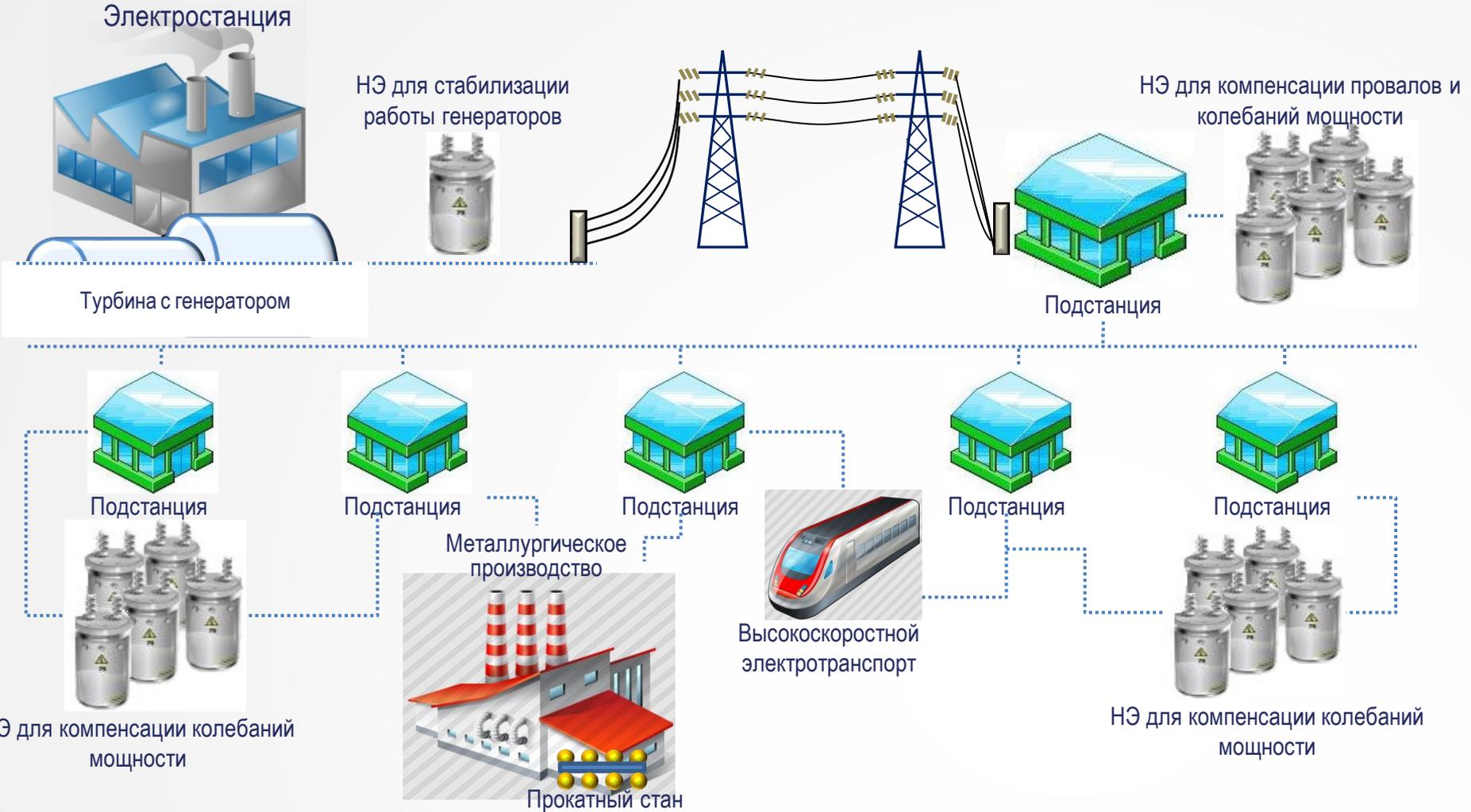
АО «Научно-технический центр ФСК ЕЭС»

Главный специалист

Области применения накопителей энергии (НЭ) в электрических системах



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

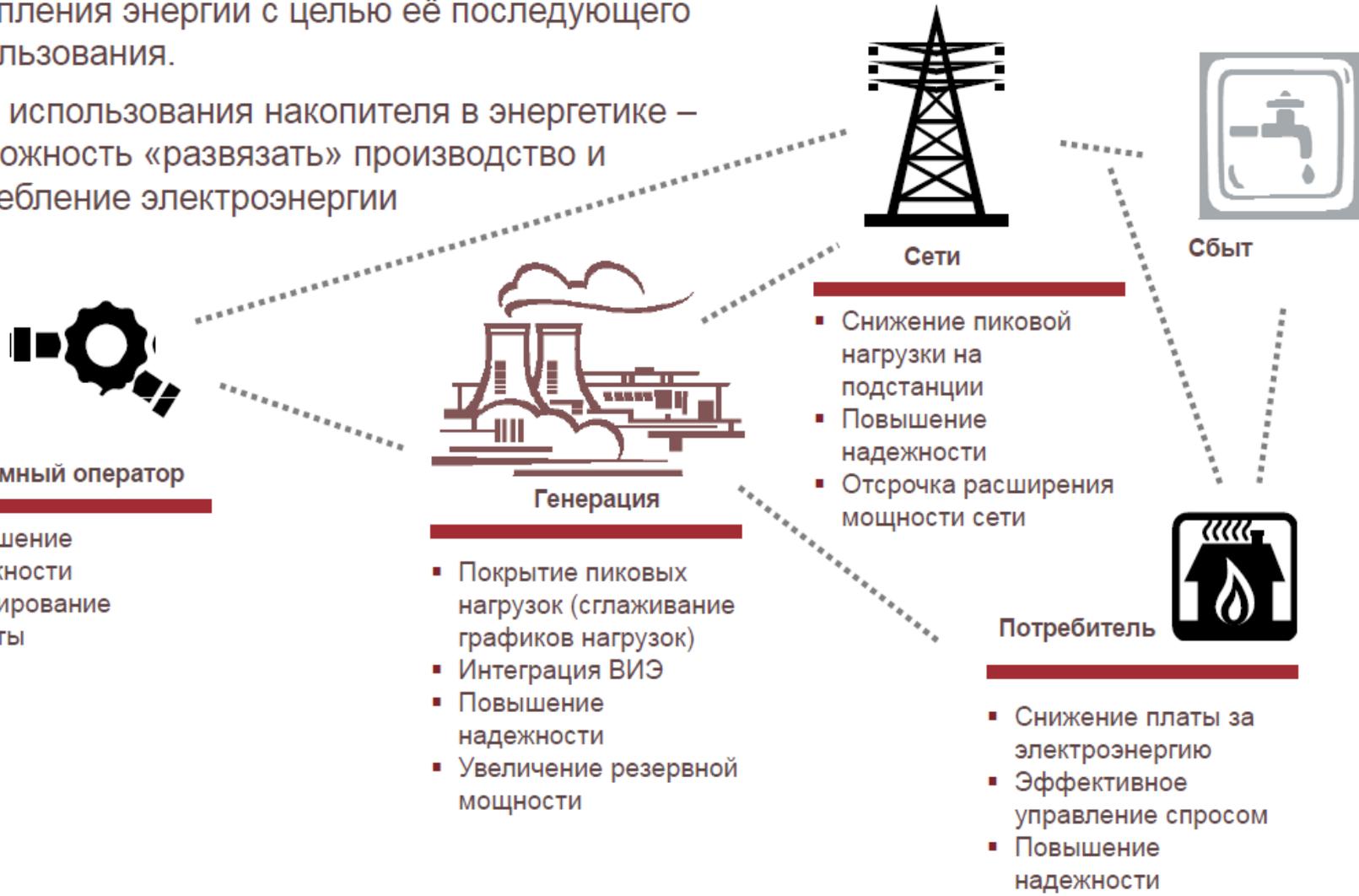




Накопители энергии

Кому могут быть полезны?

- Накопитель (аккумулятор) – устройство для накопления энергии с целью её последующего использования.
- Суть использования накопителя в энергетике – возможность «развязать» производство и потребление электроэнергии





Потенциальные области применения накопителей в России

Сети

Замещение инвестиции

применение: замещение дорогостоящих инвестиций в сети решениями на основе накопителей

Надежность

применение: повышение надежности электроснабжения за счет применения накопителей.

Потенциальные клиенты: МРСК, ФСК

Потребители, Сети и Генерация ЕЭС.

Изолированные системы.

Изолированные системы

применение: интеграция ВИЭ в изолированные узлы, с помощью накопителей. При этом капитализируемым эффектом является экономия дизельного топлива

Потенциальные клиенты: дочерни компании РАО ЭС Востока

Потребители

применение: обеспечение надежного снабжения ЭЭ, снижение затрат на ЭЭ за счет игры на разнице тарифов.

Потенциальные клиенты: начиная от промышленных потребителей заканчивая офисными центрами

Генерация

применение: оптимизация производства ЭЭ, за счет оптимальной загрузки станций.

Потенциальные клиенты: генерация с высокой себестоимостью производства ЭЭ

Регулятор

применение: регулирование частоты с помощью оптимизация производства ЭЭ, за счет оптимальной загрузки станций.

Потенциальные клиенты: В зависимости от выбранной логики: СО ЕЭС, РАО ЭС Востока, ФСК

Интеграция ВИЭ

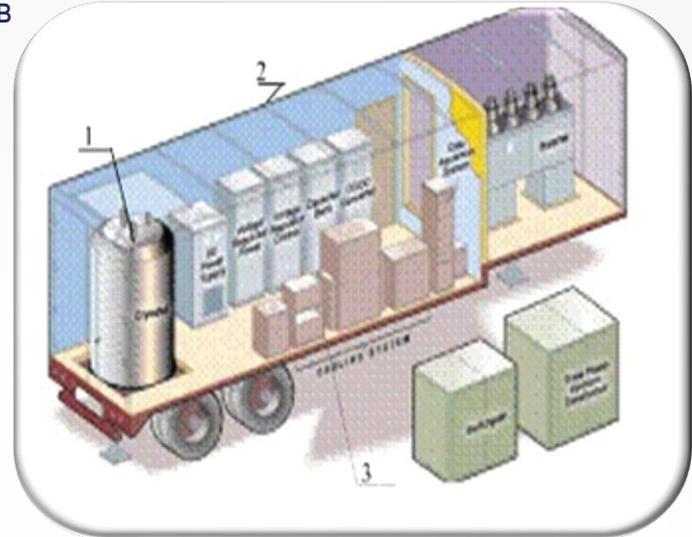
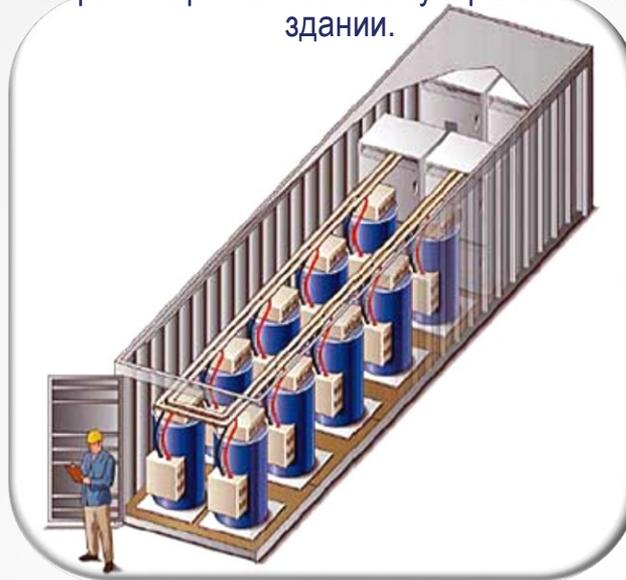
применение: интеграция ВИЭ (ветер и солнце) в узлах где их установленная мощность превышает 10% от общей.

Потенциальные клиенты: РусГидро, РАО ЭС Востока

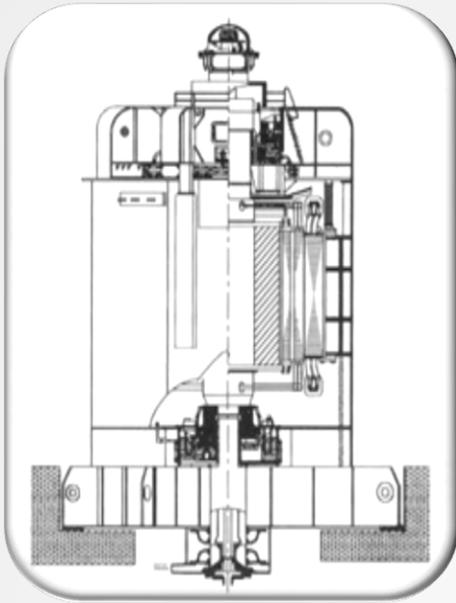


Типы накопителей энергии

Проект «Beacon Power Smart Energy Matrix»
Матричное расположение супермаховиков в здании.



Проект транспортного модуля СПИН на 850 МДж



В России разработан эскизный проект маховикового накопителя на основе асинхронизированной машины вертикального исполнения мощностью 200 МВт.



Аккумуляторные батареи большой энергоёмкости (АББЭ)

Основные характеристики накопителей энергии



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

При сравнении различных технологий накопления энергии с точки зрения их применимости в электроэнергетике используют различные характеристики накопителей, определяемые их физическими свойствами. К таким характеристикам относятся:

- **Мощность** - определяется величиной мощности, которую может поставить в энергосистему накопитель;
- **Энергоемкость** - энергия, которую накопитель может запасти и поставить в энергосистему;
- **Время отклика** - время перехода накопителя из нерабочего состояния (холостого хода, режима зарядки) в состояние поставки энергии с заявленными параметрами;
- **Время разряда** – время, в течение которого мощность и энергия поставляются в энергосистему без подзарядки;
- **Плотность мощности и энергии** определяются величинами мощности и энергии, приходящимися на единицу веса накопителя. Эта характеристика имеет значение при транспортировке накопителей или в случае передвижных накопителей;
- **Суммарная эффективность накопителя** определяется процентным соотношением энергии, полученной при разрядке к энергии, затраченной на накопление энергии.

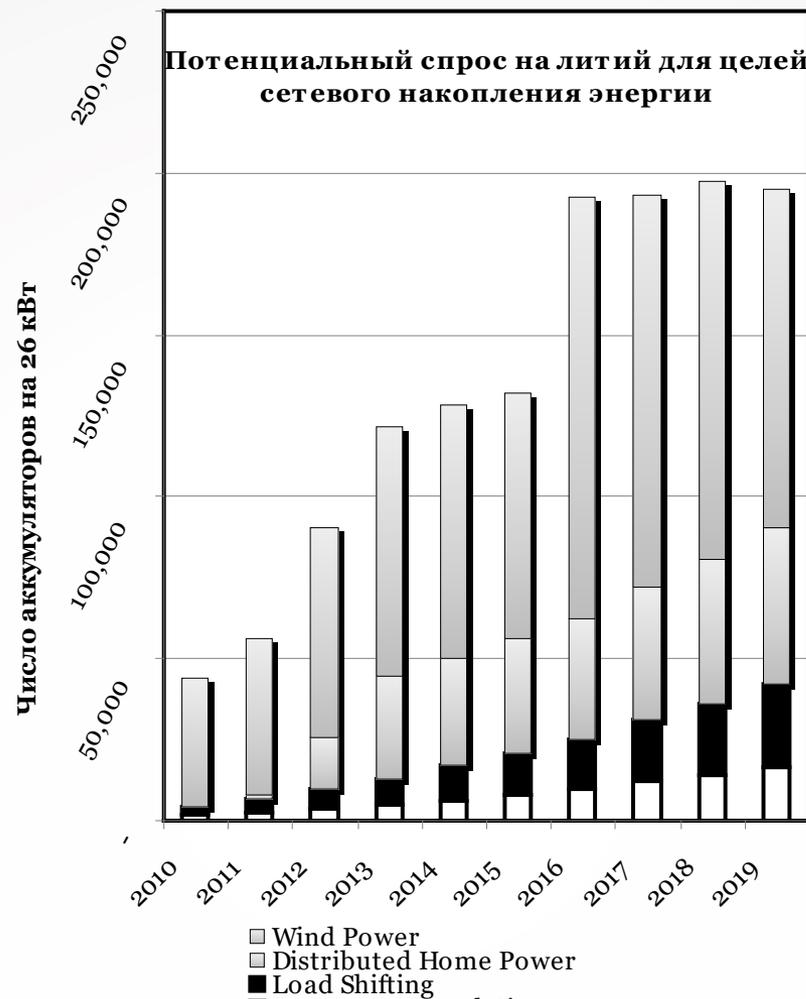
Прогноз развития рынка систем накопления электроэнергии



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

- По данным Lux Research, совокупный рынок накопителей энергии вырастет с 21,4 млрд. долларов в 2010 г. до 44,4 млрд. долларов к 2015 г., при комплексном годовом коэффициенте роста (CAGR) 15,7%
- Из этого объема самое значительное увеличение рынка накопления энергии придется на умные сети, с 5,4 млрд. долларов в 2010 г. до 15,8 млрд. долларов в 2015 г., при комплексном годовом коэффициенте роста 24,0%
- Прогнозируемый значительный рост совокупного рынка аккумуляторов, топливных элементов и суперконденсаторов будет связан не с увеличением спроса на электромобили, а с бурным ростом умных сетей.

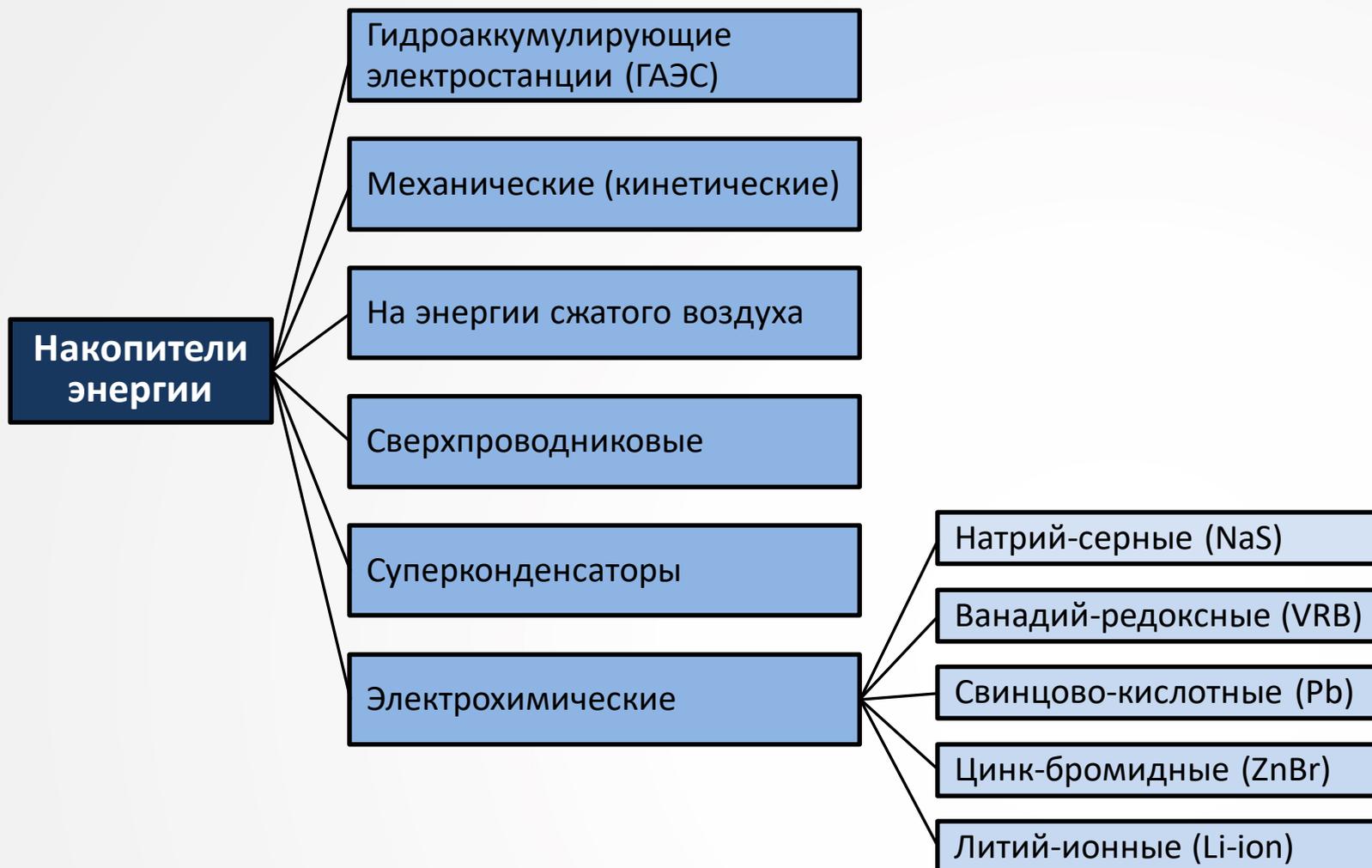
Ожидается, что к 2015 г. мировой рынок сетевых накопителей энергии удвоится



Классификация систем накопления электроэнергии



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»





Некоторые примеры использования электрических накопителей энергии в мире

Производитель накопителя	Эксплуатирующая компания	Применение	Технология / Емкость (Мощность)	Страна
A123 Systems	AES Gener	Регулирование частоты	Li-ion – 12 МВт	Чили
A123 Systems		Регулирование частоты, повышение качества электроэнергии	Li-ion – 2 МВт	США
Altair Nanotechnologies	PJM	Различные применения	Li-ion – 1 МВт / 250 кВт*ч (мобильный модуль)	США
-	-	Регулирование частоты	Li-ion – 1 МВт / 15 мин. (несколько модулей)	США
	RISO	Smart grid	Flow Bat. – 15 кВт / 120 кВт*ч	Дания
NGK	Rokkasho Wind Firm	Интеграция ВИЭ (ветер)	NaS – 34 МВт	Япония
NGK	NEDO (финансирование)	Интеграция ВИЭ (солнце)	NaS – 1,5 МВт	Япония
NGK	-	Интеграция ВИЭ (солнце + ветер)	NaS – 1 МВт + 1 МВт	Германия



Технологии накопления энергии

Сравнение электрических технологий накопления энергии

	Flow Batteries	Lead Acid	NaS	Li-Ion	Ni-Cd	Metal-Air	Capacitor
Стоимость, \$/кВт*ч	140-1800	200-1100	230-950	650-2900	650-2300	25-50	100-250
Стоимость, \$/кВт	700-2800	350-850	1000-2700	1300-3800	650-1400	1000-2200	250-650
Плотность, Вт*ч/кг	20-30	30-60	100-160	120-200	45-80	130-600	3-10
Срок службы в циклах	1600-2800	160-1200	1700-3000	2900-5500	1200-2800	100-200	10000-100000
КПД %	73%	75%	81%	96%	80%	50%	95%
Экологичность	Экологически безопасно	Угроза загрязнения свинцом	Нетоксично	Нетоксичны	Токсичны, требуется экологический контроль	Экологически безопасно	Экологически безопасно
Саморазряд % в мес.		5%	0%	10%	20%		300%

- Наиболее «компактные» (вес, размер) технологии накопления энергии: Li-ion, NaS
- Свинцовые технологии (Lead Acid) характеризуются наименьшими капитальными затратами на кВт*ч
- Наибольший срок службы у Li-ion и конденсаторов (Capacitor)
- Показатель затраты на цикл (заряд-разряд) на 1 кВт*ч наименьшие у NaS и Li-ion



Универсальной технологии нет. Под конкретные нужды подбирается своя оптимальная технология.

Сравнительные характеристики химических накопителей электроэнергии



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Вид		Натрий-серные	Ванадий-редоксные	Свинцово-кислотные	Цинк-бромидные	Литий-ионные
Параметр						
Напряжение разомкнутой цепи (НРЦ)	(В)	2.08	1.4	2.0	1.8	3.4-3.9
Удельная энерго-емкость	Вт ч/кг	350	80	35	-	130
	Вт ч/л		100	40	-	150
КПД (%)		85	80	85	80	90-95
Температура (С ⁰)		280-350	40-80	5-50	20-50	-20 - +45
Электролит		твердый композит (керамика+алюминий)	Раствор оксида ванадия в воде	Серная кислота	Раствор бромида цинка в воде	Не водные (спиртовые) растворы солей лития или полимерные (твердые) электролиты
Вспомогательное оборудование (операции)		Нагрев	Насос	Добавка воды	Насос	не требуется
Опыт установки		> 500МВт > 400 проектов	-	-	10 МВт, 10 проектов	2-10МВт - Проекты «Альтаир-Нано»; Проекты в Китае

сравнительные характеристики различных накопителей электроэнергии



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Тип накопителя	Аккумуляторы			Электрохимические конденсаторы
	Кислотные	Щелочные	Литий-ионные	
Показатели				
Удельная энергия, Втч/кг	20-40	15-80	80-220	2-20
Максимальная удельная мощность, Вт/кг	250	1300	3000	12000
Ресурс, цикл	1500	2000	1500	>1 млн.
Срок службы, лет	2-10	2-15	5-10	> 20
Рабочая температура, °С	-30/+45*	-40/+60*	-30/+60*	-50/+70
КПД	85	80	95	95-100
Обслуживание	Требуется		Нет	Нет
Цена, Евро / кВтч	50	50-200	1000-2000	2000
Цена, Евро / кВт (номинальной мощности)	50-120	75-400	400-670	50-100*

Оценка применимости батарей различных технологий для систем накопления энергии*



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Результаты оценки по 10-и бальной шкале

Требования	NaS	VRB	Pb	ZnBr	Li-ion**
Большая мощность	10	4	10	6	10
Высокая эффективность	10	8	6	7	10
Низкая стоимость утилизации	7	7	10	7	-
4..10 часов работы при номинальной мощности	8	10	6	5	-
Низкая полная стоимость (за МВт*ч)	9	7	10	7	-
Низкая стоимость перемещения	9	4	7	10	-
Коммерческое (серийное) производство	7	3	10	3	6
Количество циклов	10	9	1	6	5
Срок службы	10	6	3	5	5
Низкая стоимость обслуживания	10	5	1	5	-
Малая площадь размещения	10	3	1	6	10
Итого, баллов	108	66	75	68	-

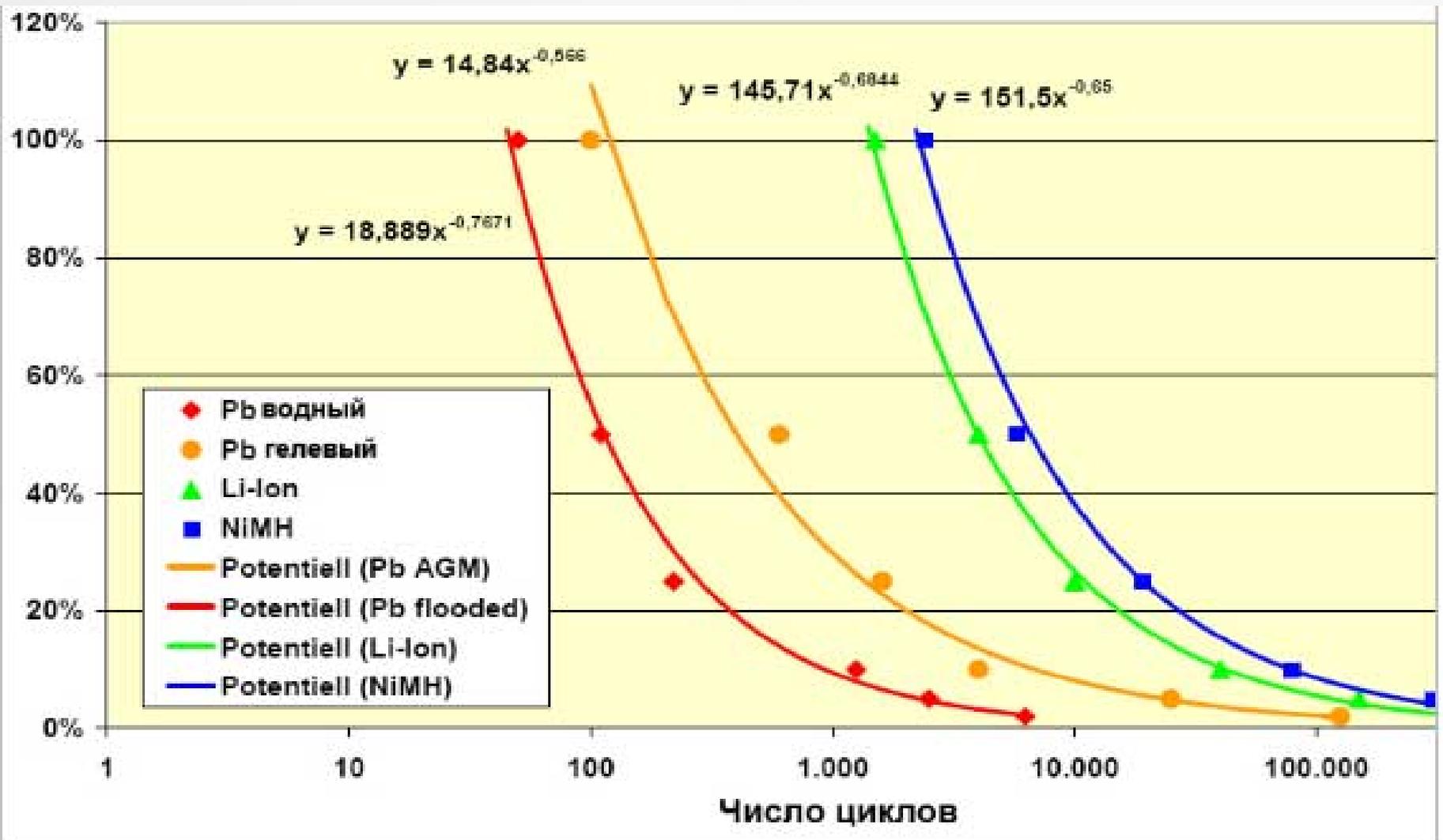
* По данным Sandia National Laboratories, США, 2007 год

** Экспертная оценка

Расчетный циклический ресурс для различных аккумуляторных батарей в зависимости от глубины разряда по данным компании VARTA.



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



Оценка применимости батарей различных технологий для систем накопления энергии*



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Результаты оценки по 10-и бальной шкале

Требования	NaS	VRB	Pb	ZnBr	Li-ion**
Большая мощность	10	4	10	6	10
Высокая эффективность	10	8	6	7	10
Низкая стоимость утилизации	7	7	10	7	-
4..10 часов работы при номинальной мощности	8	10	6	5	-
Низкая полная стоимость (за МВт*ч)	9	7	10	7	-
Низкая стоимость перемещения	9	4	7	10	-
Коммерческое (серийное) производство	7	3	10	3	6
Количество циклов	10	9	1	6	5
Срок службы	10	6	3	5	5
Низкая стоимость обслуживания	10	5	1	5	-
Малая площадь размещения	10	3	1	6	10
Итого, баллов	108	66	75	68	-

* По данным Sandia National Laboratories, США, 2007 год

** Экспертная оценка



Области применения СНЭ на объектах электроэнергетики РФ



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Снятие перегрузок ЛЭП и АТ в режимах наибольших нагрузок электропередачи, повышение статической и динамической устойчивости, аварийный резерв (ЕЭС/ЕНЭС).

Совместно или вместо мобильных газотурбинных электростанции (ГТЭС).

Совместно или вместо дизель-генераторных установок (ДГУ).

На объектах нефтегазовой промышленности.

В регионах России, в которых отсутствует централизованное электроснабжение.

На объектах с возобновляемыми источниками энергии.

Создание СНЭ для работы совместно с мобильными газотурбинными электростанциями



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

- ✓ Повышение пределов динамической устойчивости ГТЭС, имеющих малые значения моментов инерции (многовальные ГТЭС и др.) при авариях в сети (к.з. и др.).
- ✓ Обеспечение стабильной работы системы собственных нужд и системы возбуждения ГТЭС благодаря поддержанию требуемого уровня напряжения на зажимах ГТЭС при существенных колебаниях напряжения в сети при автономной работе ГТЭС.
- ✓ Обеспечение работы ГТЭС с постоянной нагрузкой благодаря покрытию с помощью АББЭ суточных колебаний нагрузки. Результат – экономия топлива, улучшение экологической обстановки.

Создание СНЭ для работы совместно с дизель-генераторными установками



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

- ✓ Обеспечение работы дизель-генераторных установок с постоянной, наиболее экономичной нагрузкой. Результат – снижение затрат топлива, в среднем, на 15-20%, улучшение экологической обстановки.
- ✓ Стабилизация напряжения и частоты при сбросах и набросах нагрузки.
- ✓ Обеспечение надежности параллельной работы дизель-генераторных установок равной и разной мощности в автономных режимах работы.
- ✓ Обеспечение бесперебойного снабжения потребителей при пусках и остановках дизель-генераторных установок.

Проект ФСК – поставка двух СНЭ на ПС 220кВ «Псоу» (г. Сочи) и «Волхов-Северная» (г.Санкт-Петербург) компанией ENER1



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Главные параметры:

Мощность **1500 кВт**

Энергия **2500 кВт-ч**

Тип АБ **LiTi**



Цель испытаний



Проверка общей эксплуатационной надежности СНЭ и ее отдельных компонентов.
Проверка соответствия технических характеристик СНЭ заявленным характеристикам.

Экспериментальная отработка режимов использования СНЭ для перспективных вариантов применения:

- ❖ использование в качестве резервного источника питания;
- ❖ параллельная работа с ДГУ в локальной электрической сети;
- ❖ регулирование частоты в локальной электрической сети, включающей в себя ДГУ;
- ❖ регулирование мощности в локальной электрической сети, включающей в себя ДГУ;
- ❖ сглаживание неравномерности потребления и выработки электроэнергии в электрической сети;
- ❖ источник бесперебойного питания.

Определение эффективности использования СНЭ для различных применений.

Выработка рекомендаций, направленных на улучшение технических и эксплуатационных характеристик СНЭ.

Разработка типовых схем подключения СНЭ.

Эффективность применения:

Выравнивание суточного графика нагрузки



➤ Запуск электростанции «с нуля» после ее внезапного выхода из работы из-за аварии в сети (остановка турбин).



➤ Снятие перегрузок распределительной сети при прохождении максимумов нагрузки .



В производствах, весьма чувствительных не только к длительным нарушениям электроснабжения, но и к кратковременным.



➤ Для предотвращения лавины напряжения в районах с большим сосредоточением синхронной двигательной нагрузки.

Состав гибридной системы накопления энергии

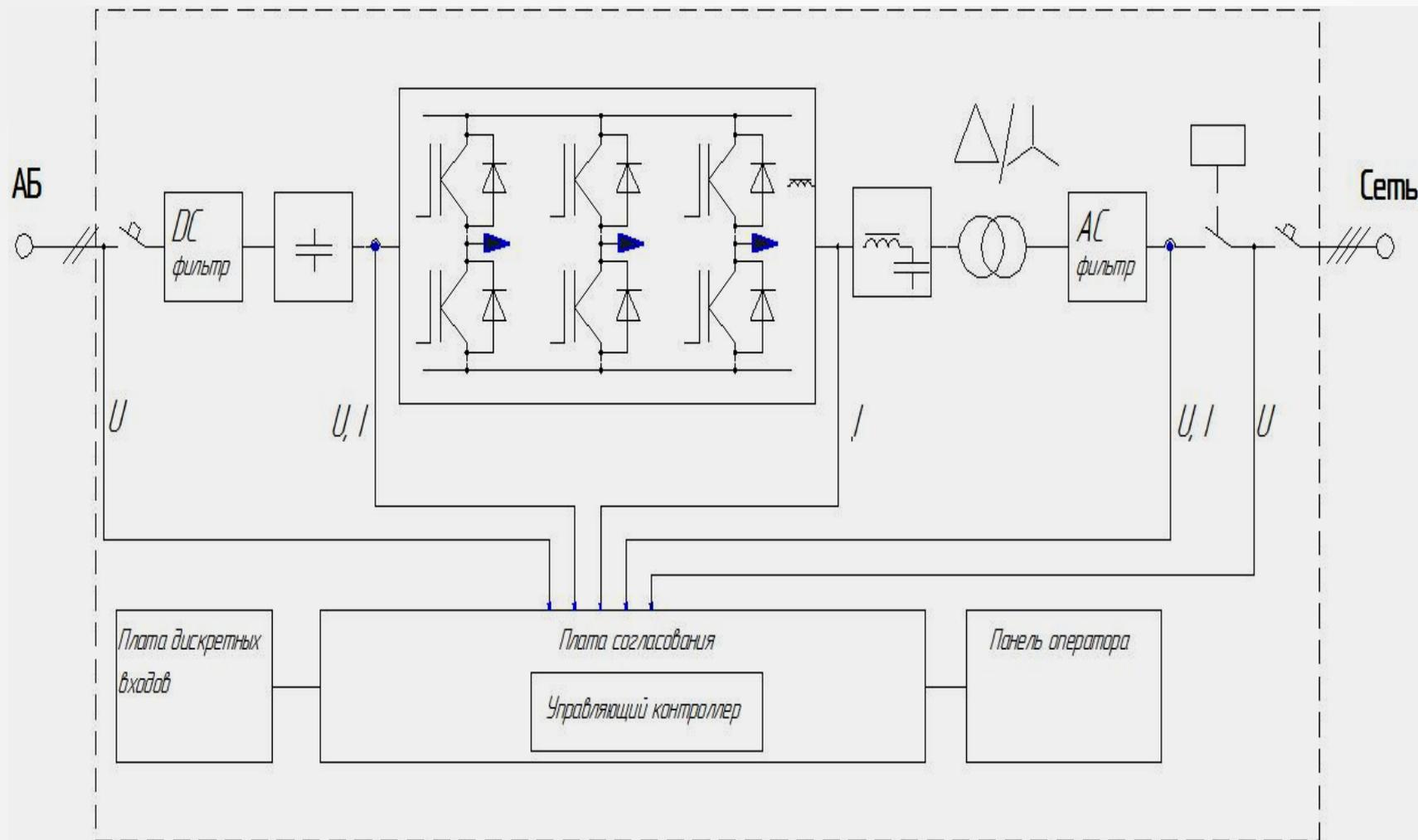


ОАО «HTЦ ФСК ЕЭС»





Схема двунаправленного инвертора





Особенности инвертора

- Используется ШИМ-преобразование с помощью силовых IGBT-транзисторов;
- Мощность инверторов – 15; 150кВт;
- Возможна параллельная работа до восьми инверторов;
- Возможна параллельная работа с ДГУ;
- Накоплен опыт работы со свинцово-кислотными, никель-натрий хлорными, литий ионными аккумуляторными батареями и суперконденсаторами;
- Реализован алгоритм компенсации реактивной мощности ($\cos\phi = 1$) и высших гармоник тока;



Параметры инвертора



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Параметр	значение
Мощность, кВт	150
Напряжение АС, В	3ф 380
Напряжение DC, В	450 – 720
КПД, % при номинальной нагрузке, не хуже	96
К-т гармонических искажений напряжения, %	2
К-т гармонических искажений тока после коррекции, %	2
Компенсация реактивной мощности, %	100
Частота ШИМ, кГц	3

Инвертор 150кВт



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



Процесс сборки.

Силовой модуль

Фильтр ЭМС звена постоянного тока

Дроссель

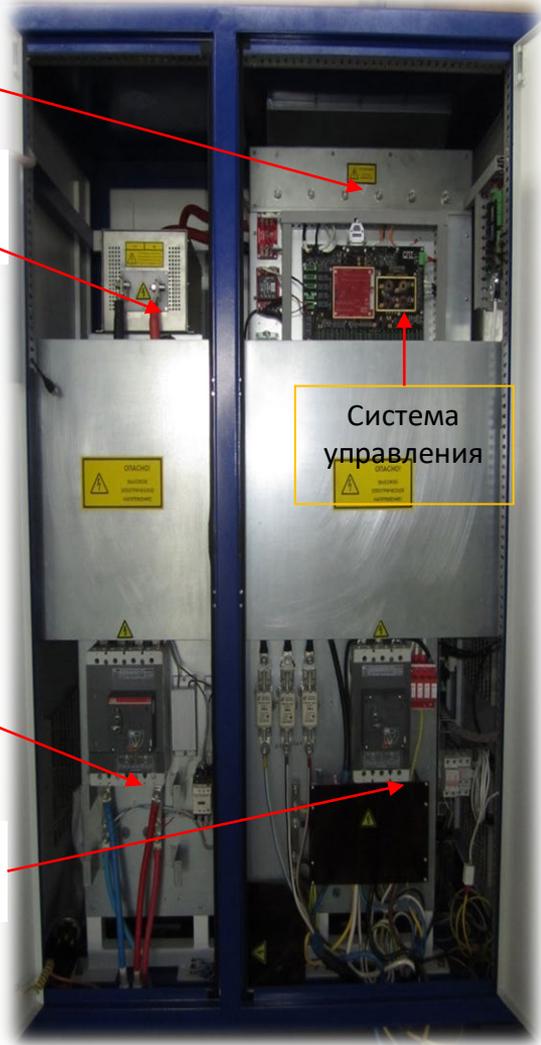
Вентиляторы охлаждения

Фильтр ЭМС звена переменного тока

Автоматический выключатель батарейный

Автоматический выключатель сетевой

Согласующий трансформатор



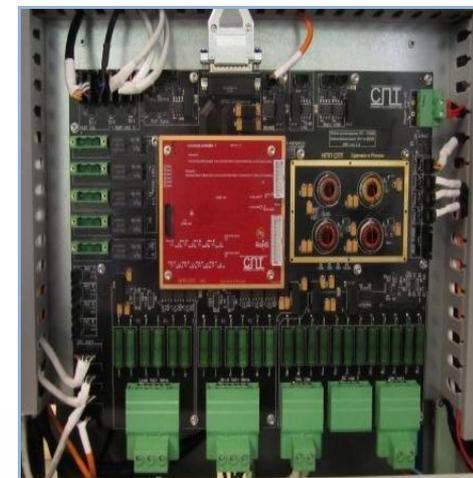
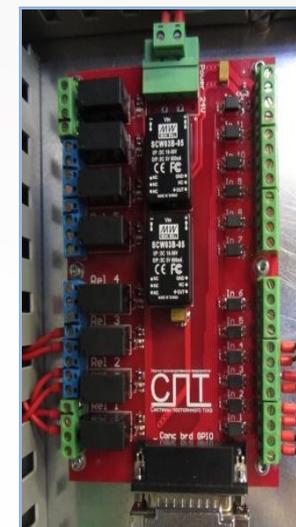
Система управления

Состав системы управления



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

- Универсальный управляющий контроллер ($f = 150\text{МГц}$);
- Плата согласования;
- Модуль ввода-вывода;
- Плата панели оператора;
- Плата программируемых дискретных входов
- Реализованные протоколы Modbus TCP/IP, Modbus RTU;
- Реализованы алгоритмы взаимодействия с различными системами управления аккумуляторных батарей;



Параметры системы управления



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Параметр	значение
Частота ШИМ, кГц	3
Тактовая частота процессора, МГц	150
Количество параллельно подключаемых инверторов	8
Количество программируемых дискретных входов	8
Количество внешних сигналов обратной связи	2
Скорость подстройки фазы напряжения определяемая по ГОСТ 13109-97 , Гц/сек	0.2
Скорость подстройки фазы напряжения определяемая быстроедействием системы управления, мс	10
Просадка напряжения на нагрузке при пропадании напряжения сети	По ГОСТ 13109-97



Особенности системы управления

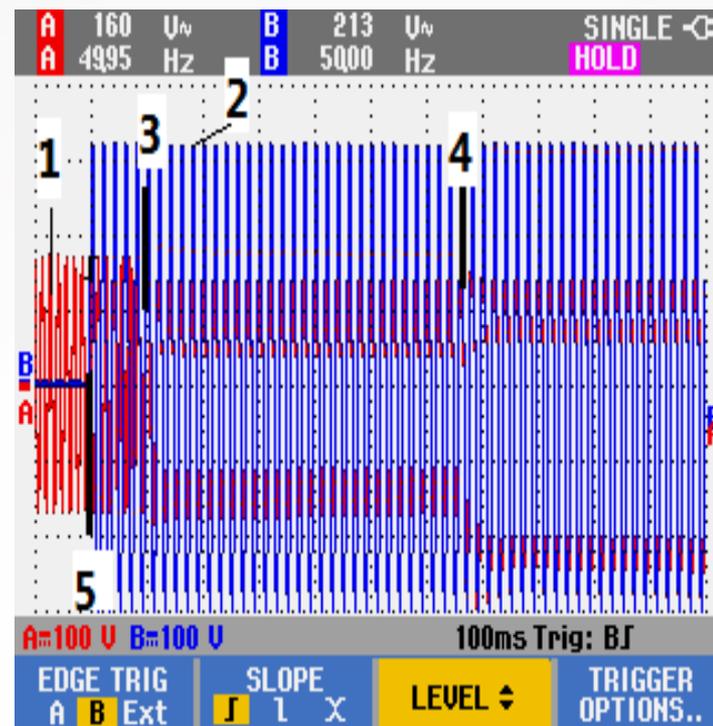
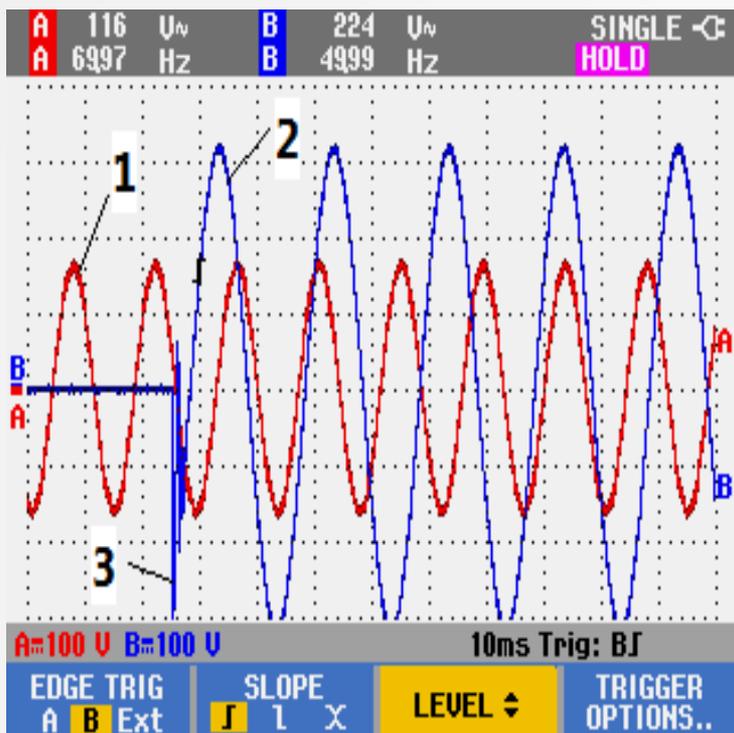
Разработан уникальный алгоритм управления на основе адаптивных цифровых фильтров, который позволяет оптимизировать параметры регуляторов в петле обратной связи в зависимости от измеряемого сигнала. Данный алгоритм позволяет существенно повысить быстродействие системы управления

- Форма сигнала анализируется за несколько периодов ШИМ
- Измерение и управление параметрами сигнала осуществляется по основной и высшим гармоникам;
- Реализован механизм компенсации высших гармоник тока нагрузки;
- Реализована регулировка параметров выходного тока по величине обратной последовательности тока нагрузки;
- Обеспечивается высокая скорость синхронизации при ступенчатом изменении управляющего воздействия – до 5 мсек;

Подана заявка на получение патента на изобретение.



Параметры синхронизации

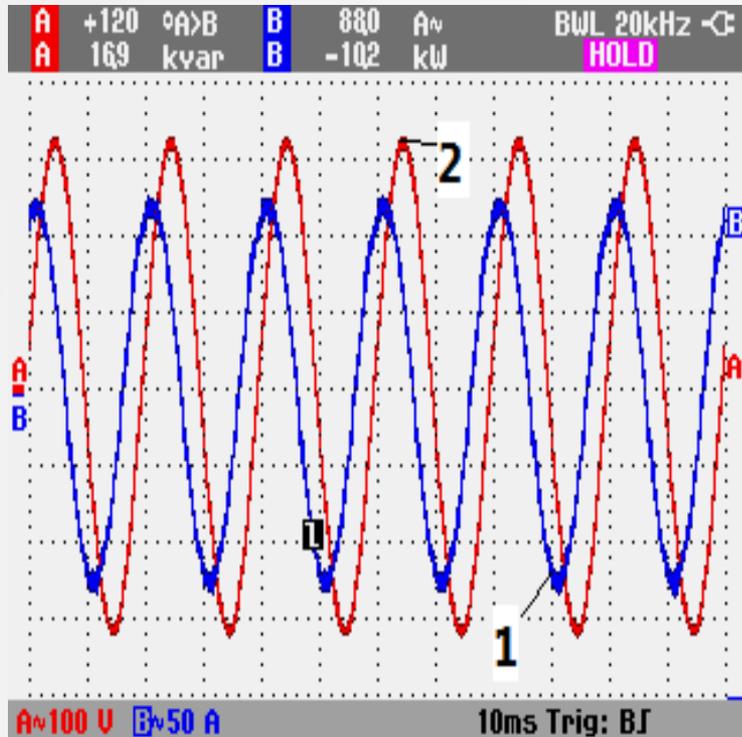


Переход от напряжения 125В/70Гц к напряжению 220В/50Гц

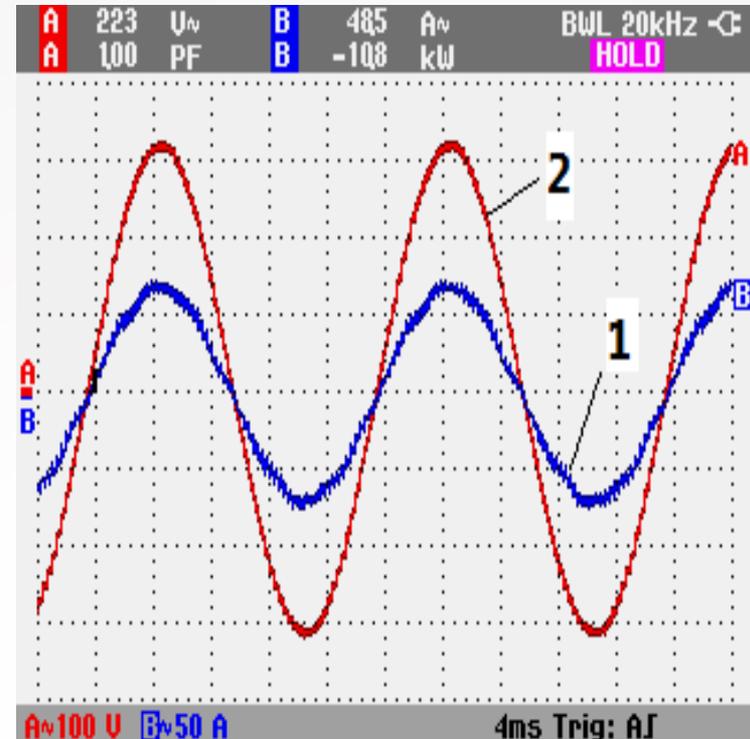
Компенсация реактивной мощности



ОАО «HTЦ ФСК ЕЭС»



Мощность, генерируемая инвертором 1 – напряжение
2 - ток



Мощность, потребляемая из сети
1 – напряжение
2 - ток



Разработан двунаправленный преобразователь напряжения для СНЭ с уникальным алгоритмом управления, который обеспечивает:

- Высокую скорость синхронизации выходного сигнала;
- Параллельную работу нескольких инверторов;
- Параллельную работу с ДГУ на общую нагрузку;
- Компенсацию реактивной мощности и высших гармоник тока;
- Работу с различными типами аккумуляторных батарей и суперконденсаторами;

В настоящее время ведется разработка:

- Инвертора мощностью 500 кВт;
- Системы управления для инвертора мощностью 10 – 100 МВт;



Методика использования накопителей энергии для многоуровневой интеграции генерирующих станций и потребителей базируется на учёте:

- Основной структуры потребления энергосети с точки зрения спектра активной и реактивной мощности;
- Проблемы изменения частоты в локальных энергосетях;
- Проблемы топливной эффективности при малом энергопотреблении;
- Обеспечения заданного качества;
- Наличия установленной тарифной сетки и возможность обеспечения существенной разницы между дневным и ночным трафиком;
- Режима обеспечения компенсации провалов (вольтодобавки
- Наличия возобновляемых источников энергии с заданным спектром генерации, возможность подключения к сети переменного или постоянного тока, стабилизированной или не стабилизированной как по напряжению, так и по частоте.



ПАРАМЕТРЫ, ПО КОТОРЫМ ОЦЕНИВАЕТСЯ НЕОБХОДИМОСТЬ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИНТЕГРАЦИИ

С точки зрения накопителя можно выделить следующие параметры:

1. Общий КПД цикла заряд/разряд , базовые динамические характеристики цикла, зависимость от скорости изменения тока накопителя и другие характеристики, влияющие на эффективность накопления при заданном цикле (периодическом или случайном);
2. Зависимость полной эффективности (включая преобразователь) от энергоёмкости и мощности;
3. Наличие параллельной работы и модулей накопительных элементов, резервирование, обеспечение надёжности при выходе модулей из строя, замен элементов ;
4. Наличие режимов обслуживания *накопителя*;
5. Хранение, ремонт, утилизация накопительных элементов;
6. Наличие специальных режимов
7. Управление с использованием внешнего контроллера;
8. Структура накопителя.



ПАРАМЕТРЫ, ПО КОТОРЫМ ОЦЕНИВАЕТСЯ НЕОБХОДИМОСТЬ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИНТЕГРАЦИИ

С точки зрения системного уровня:

1. Алгоритмы общего управления и критерии качества, интеграция системы управления генератором и накопителем;
2. Использование накопительных элементов для минимизации ступеней преобразования – непосредственное использование в инверторах электропривода вместо ИБП, сети с высокой частотой, сети с переменной частотой, сети постоянного тока стабилизированные или с использованием заданного диапазона;
3. Преобразователь и накопитель как элемент, позволяющий строить энергосистемы с отсутствием жёстко нормируемых характеристик, применение потребителем преобразователей, подключаемых непосредственно к накопителю, уменьшение количества ступеней преобразования, затрат на поддержание заданного качества электрической энергии ввиду наличия широкодиапазонных преобразователей.

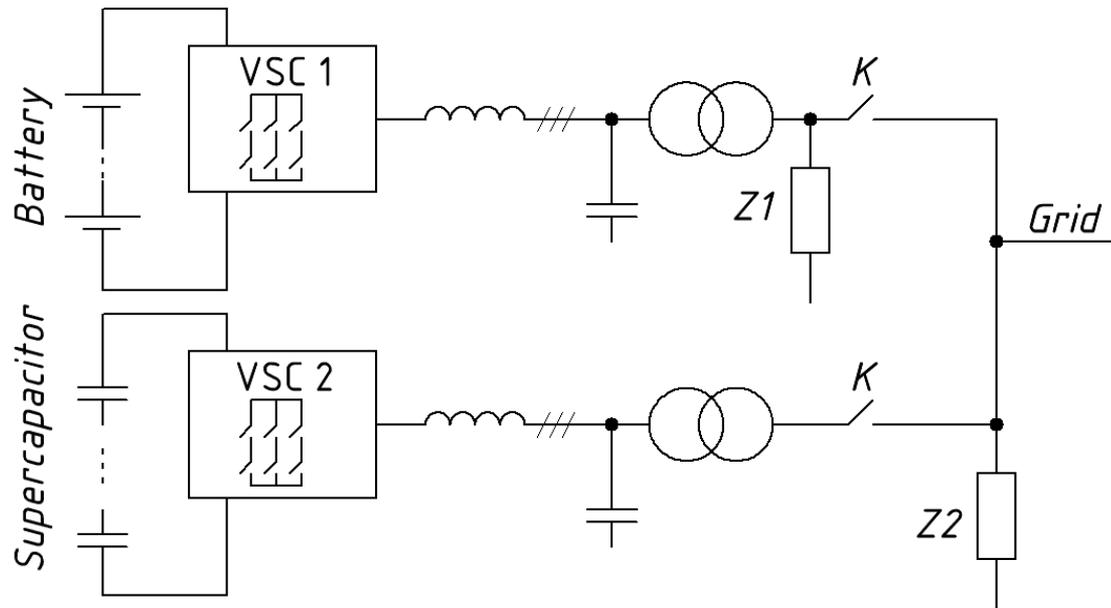
СТРУКТУРА МНОГОУРОВНЕВОЙ ИНТЕГРАЦИИ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Основные звенья для обеспечения многоуровневой интеграции:

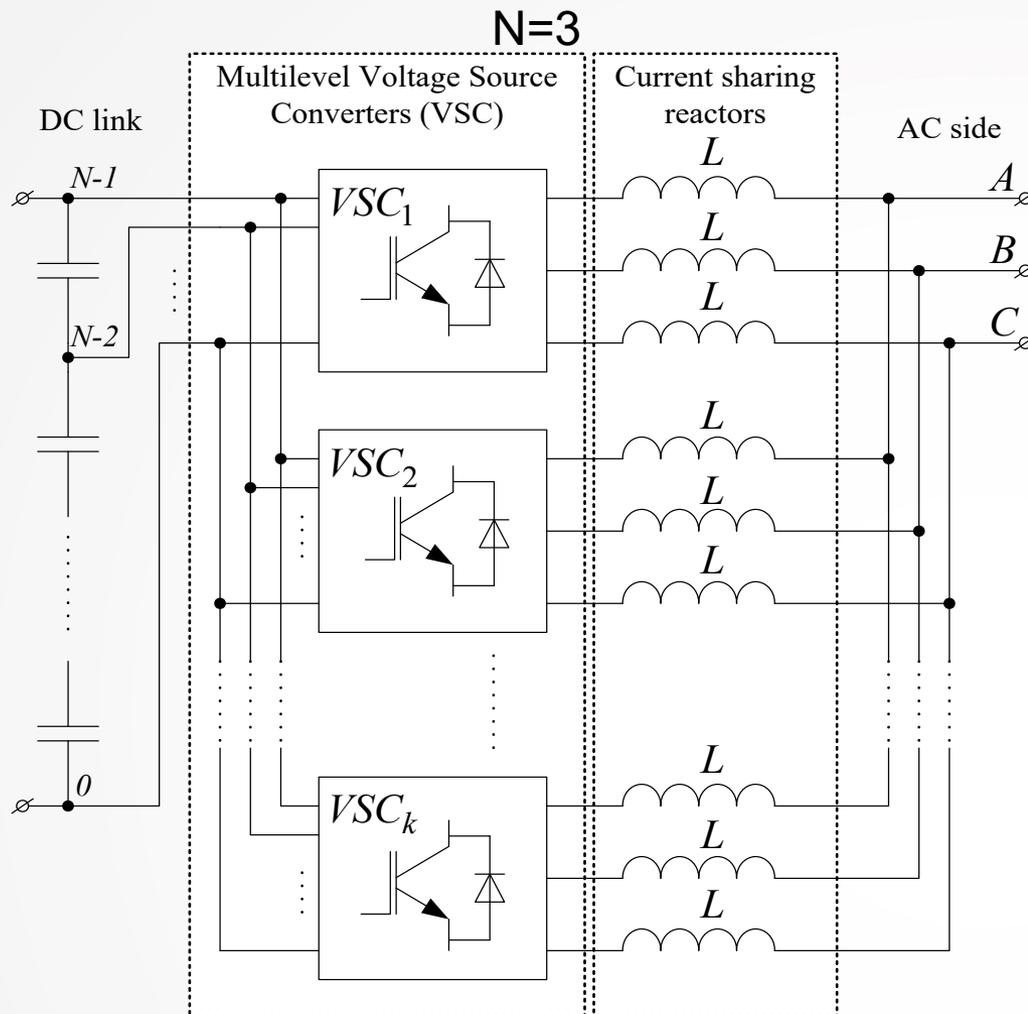
- Преобразователь с согласующим повышающим трансформатором и суперконденсаторами на низкое напряжение (силовые ключи 1.7 кВ) - преимущества - гальваническая развязка, недостаток - наличие габаритного трансформатора, одно из преимуществ - многообмоточный трансформатор с многоуровневым преобразователем - упрощение схемы управления силовыми ключами, гальваническая изоляция, более лёгкое управление по выравниванию заряда на суперконденсаторах за счёт локальной системы управления и возможности обеспечения единого питания низковольтных секций инвертора;
- Многоуровневый преобразователь с LC фильтром непосредственно подключаемый к сети. Преимущества - нет трансформатора, недостатки - необходимы ключи 1.7 кВ, 3.3 кВ и выше, схема выравнивания заряда на суперконденсаторах, требующая изоляции по высокому напряжению;
- Синхронные генераторы (дополнительно позволяют обеспечить поддержание заданного напряжения сети при её флуктуациях) с маховиками;
- Асинхронизированные машины ;
- Асинхронные машины (преимущество в отсутствии щёток - но малый рабочий диапазон).



Пример многоуровневой интеграции, отвечающей критериям временного разделения, а также по интегральным показателям. Основой подобного рода структурной схемы является решение вопроса исследования влияния пульсаций тока литий-ионной батареи а также компенсации не симметричных компонент и гармоник.

Среди известных топологий многоуровневых преобразователей топология с фиксирующими диодами (NPC) является наиболее подходящей для МПГУ благодаря возможности работы с одним звеном постоянного тока, представляющего собой емкостной делитель напряжения.

Пример преобразователя напряжения с такой топологией и числом уровней





ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОУРОВНЕВОЙ ИНТЕГРАЦИИ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Целью экспериментальных исследований явились изучение в условиях, близких к реальным, функциональных возможностей накопителя энергии при многоуровневой интеграции генерирующих станций и потребителей энергии.

Для проведения необходимых испытаний и тестов, был разработан испытательный стенд, включающий автономный источник электроэнергии (газотурбинную электростанцию – ГТЭ) мощностью до 1.5 МВт, набор активных и реактивных нагрузок и необходимую коммутационную и измерительную аппаратуру.

Методика системных испытаний включает следующие разделы:



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

- Алгоритм задания воздействий, имитирующих сдвиг уровня пикового потребления и поддержание оптимальной загрузки сети;
- Алгоритмы компенсации реактивной мощности, гармоник, создаваемых нагрузкой, обратной последовательности напряжения сети или нагрузки;
- Поддержание непрерывного снабжения электроэнергией на заданном интервале времени: устранение просадок напряжения или пропадание напряжения интервалом от секунд до десятков минут – тест функции бесперебойного источника питания;
- алгоритмы по переключению линий в «Горячий резерв» и оптимизации распределения в энергосистеме в случае непредвиденных обстоятельств до 15 минут;
- Алгоритмы управления выходным напряжением в случае большого потребления (стабилизации тока), «горячий пуск».
- Алгоритмы использования питающей сети при подключении дополнительных потребителей с циклическим потреблением к имеющимся мощностям, или потребителей, отбирающих в течение определённых промежутков времени (десятки минут) мощность, большую, чем номинальная мощность сети.
- Сервисные функции.



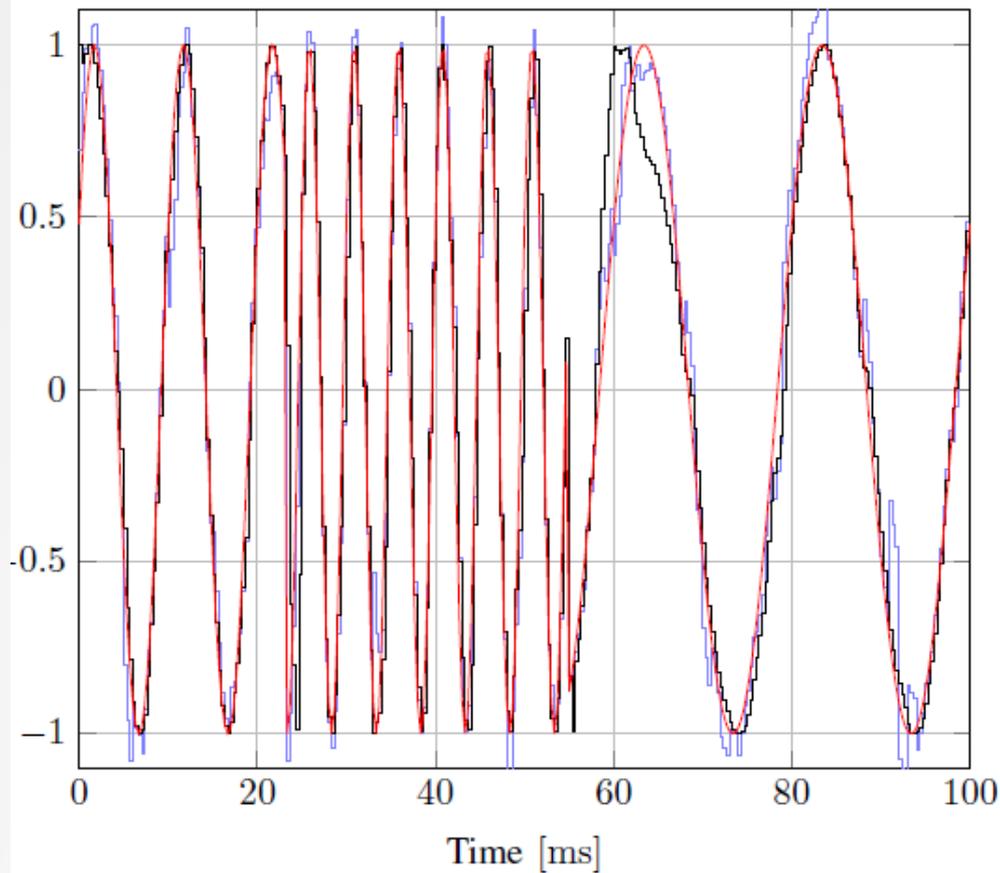
Испытания проводились в следующих режимах работы СНЭ:

- Поддержание непрерывного снабжения электроэнергией на заданном интервале времени, устранение просадок напряжения или пропадание напряжения интервалом от секунд до десятков минут – функция резервного источника питания
- Определение области устойчивости при параллельной работе инверторов СНЭ на общую нагрузку. Проверка корректной работы алгоритмов управления СНЭ при параллельной работе инверторов на общую нагрузку; Поддержание непрерывного снабжения электроэнергией на заданном интервале времени, устранение просадок напряжения или пропадание напряжения интервалом от секунд до десятков минут – функция резервного источника питания;
- Анализ области устойчивости и поиск ограничений при использовании СНЭ совместно с генератором соизмеримой мощности при параллельной работе на общую нагрузку в локальной сети. Выработка алгоритмов управления с целью расширения области устойчивой работы при использовании СНЭ в этом режиме;

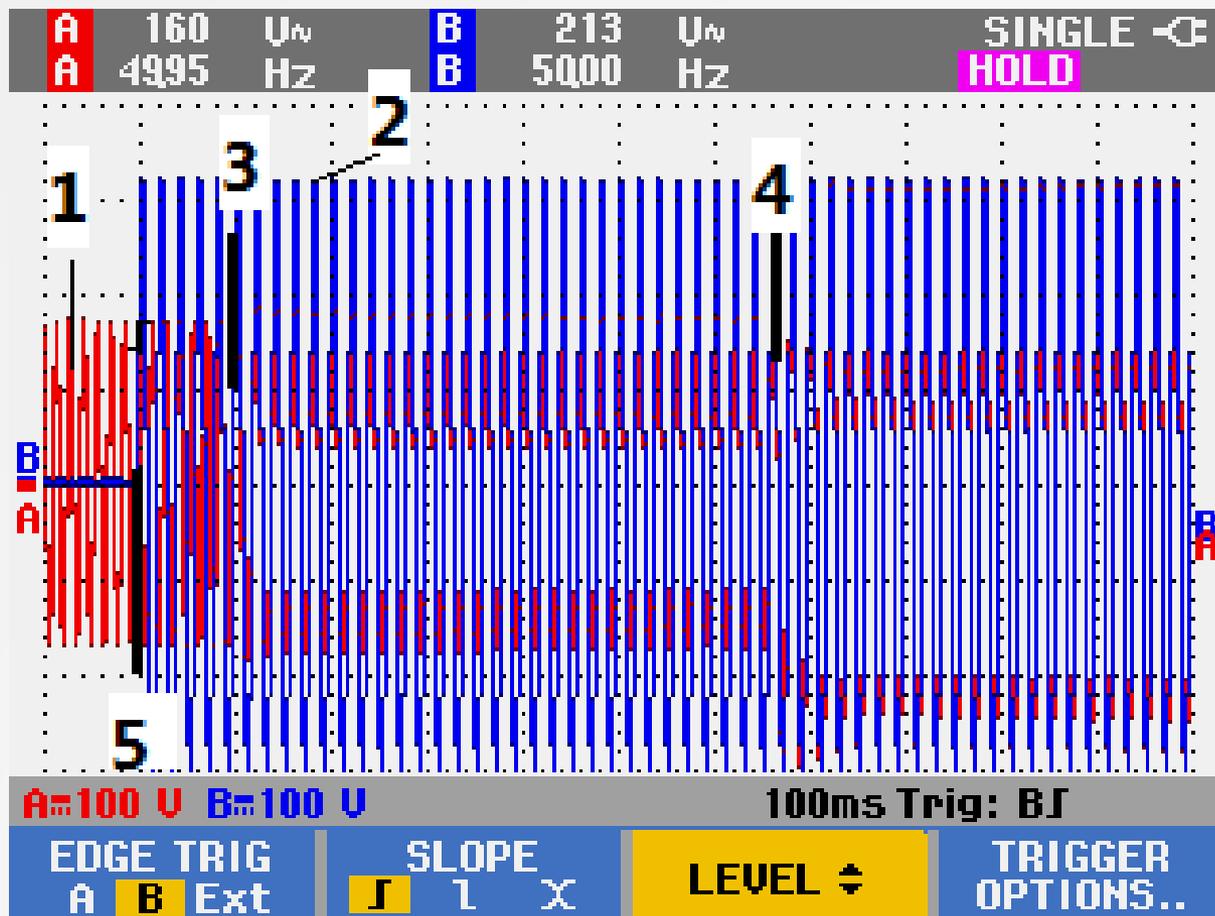


Испытания проводились в следующих режимах работы СНЭ:

- Работа СНЭ в режиме диспетчеризации мощности при работе с ДГУ на общую нагрузку по командам диспетчера. Анализ переходных процессов в СНЭ и ДГУ. Определение ограничений области устойчивой работы;
- Исследование работы СНЭ в режиме регулирования частоты при работе с ДГУ на общую нагрузку по командам диспетчера;
- Исследование работы СНЭ в режиме сглаживания колебаний нагрузки при параллельной работе с ДГУ на общую нагрузку. Поддержание оптимального режима работы ДГУ;
- Проверка функционирования СНЭ, работающего совместно с ДГУ в режиме back-to-back;
- Определение динамических характеристик системы при сбросе/набросе нагрузки в островном режиме. Анализ области устойчивости системы при сбросе/набросе нагрузки в островном режиме.



Диаграммы работы блока ФАПЧ – одного из важнейших блоков управления при наличии многоуровневой интеграции. При отсутствии сигнала обратной связи с генерирующей установкой, системе накопления необходимо обеспечить синхронизацию с сетью с неизвестными параметрами. Так, при наличии многоуровневой интеграции возможна передача преобразователям угла поворота генератора, временных меток, относительно которых можно произвести синхронизацию при резких изменениях частоты вращения. Таким образом, дополняя контур управления фазой можно избежать чрезмерных токов и перенапряжений, возникающих из-за рассогласования частоты ФАПЧ преобразователя и генератора при переходных процессах. Скорость разработанных алгоритмов ФАПЧ позволяет синхронизироваться за интервал времени порядка одного периода.



Осциллограммы работы преобразователя в режиме синхронизации с сетью и перехода из островного режима работы в сетевой. В момент времени 1 напряжение инвертора и его частота и амплитуда (для наглядности) существенно отличаются от сетевой и имитируют островной режим работы. В момент времени 5 происходит включение сетевого напряжения 2. В момент времени 3 производится синхронизация (в течении 1-2 периодов по частоте), при этом, однако, амплитуда и частота на выходе изменяются с использованием ограничений по скорости. Так, на интервале времени 3-4 производится плавная подстройка фазы выходного напряжения под сетевое и только в момент времени 4 производится замыкание байпасного контактора.

Разработаны модели многоуровневой интеграции, позволяющие разделить систему генерирования и потребления по временным и интегральным характеристикам с точки зрения преобразуемой электрической энергии, а также, с использованием иерархии передачи данных и информации между управляющими системами:



- разработан стенд для испытания накопителей электрической энергии мощностью до нескольких мегаватт;
- предложена многоуровневая система управления накоплением энергии и потребителями для обеспечения стабильной и устойчивой работы децентрализованных и нетрадиционных источников энергии, работающих как автономно, так и в составе электроэнергетических систем;
- проведен комплекс испытаний НЭ в ходе испытаний которого были установлены преимущества использования многоуровневой интеграции генерирующих станций и потребителей;
- показана эффективность при использовании синхронизируемых генерирующей станции, накопителя и потребителя в сетях переменного тока;
- показана эффективность многоуровневой интеграции с точки зрения использования унифицированных модулей на основе батарей и суперконденсаторов;
- сформулированы требования к иерархической структуре системы управления при многоуровневой интеграции с разбиением на физические и логические модули
- показана эффективность синхронизации на основе взаимодействия системы управления преобразователя и синхронизирующей подсистемы
- показана возможность интеграции накопителей, преобразователей с использованием многоуровневой техники.

Выводы

1. Технологии накопления энергии развиваются высокими темпами, накопители энергии находят все более широкое применение в практике регулирования и управления режимами электроэнергетических систем.
2. Малое время отклика, значительные величины мощности и энергоемкости открывают широкие перспективы применения накопителей для управления как переходными, так и установившимися режимами электроэнергетической системы.
3. По оценкам экспертов в ближайшие 10 лет рынок накопителей энергии будет расти со среднегодовыми темпами, превышающими 30% с тенденцией к снижению удельной стоимости запасенной энергии.
4. Широкое использование в электроэнергетических системах получили такие накопители, как ГАЭС, накопители на сжатом воздухе, электрохимические аккумуляторы. Некоторые типы накопителей находятся в стадии создания прототипов и их испытания.
5. Приведенные области применения накопителей энергии для регулирования и управления режимами электроэнергетической системы не является исчерпывающими. В процессе исследований могут появиться новые области применения, также как и новые виды (технологии) накопления энергии.



Заключение

Применение в электрических сетях СНЭ является перспективной технологией, которая может найти широкое применение в электроэнергетических системах и электрических сетях России, обеспечивая повышение **энергоэффективности, надежности, устойчивости и экономичности.**



Для получения опыта применения СНЭ целесообразно создание пилотных проектов.



Необходимо разработать технико-экономическое обоснование (ТЭО) применения СНЭ для объектов электроэнергетики РФ.



Считать целесообразным создать межотраслевой полигон для испытаний различных систем аккумулирования энергии.





ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

Новиков Николай Леонтьевич

novikov_nl@ntc-power.ru

+7-910-469-1763