



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Выбор типа систем накопления энергии для различных задач управления режимами электроэнергетических систем.

Н. Л. Новиков

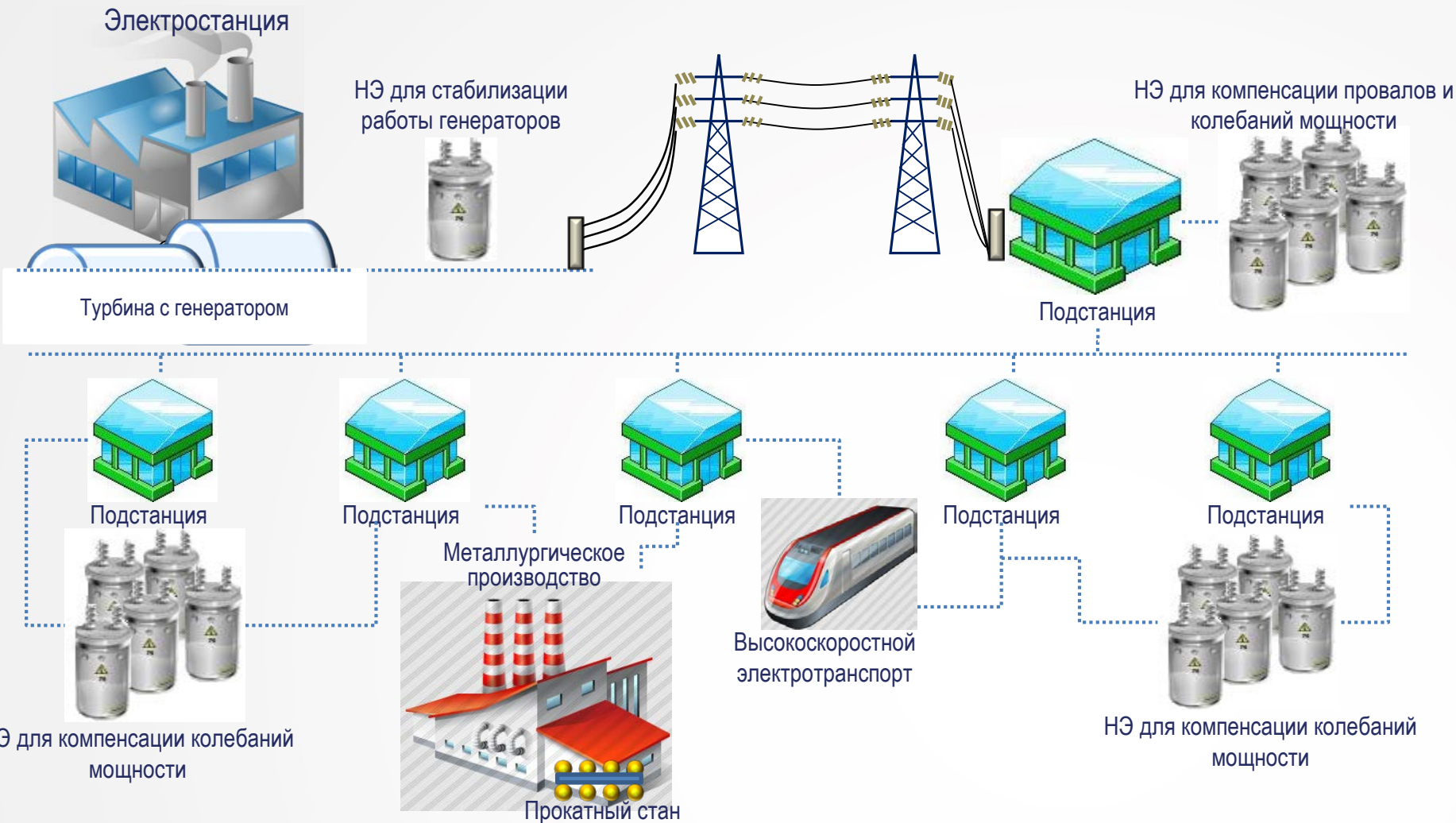
Д.т.н., проф., Заместитель Научного руководителя АО «НТЦ электроэнергетики»

А.Н. Новиков

Главный специалист ОАО «НТЦ электроэнергетики» Отдел разработки и внедрения систем управления жизненным циклом



Области применения накопителей энергии (НЭ) в электрических системах



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



Системный оператор

- Повышение надежности
- Регулирование частоты



Генерация

- Покрытие пиковых нагрузок (сглаживание графиков нагрузок)
- Интеграция ВИЭ
- Повышение надежности
- Увеличение резервной мощности



Сети

- Снижение пиковой нагрузки на подстанции
- Повышение надежности
- Отсрочка расширения мощности сети



Сбыт

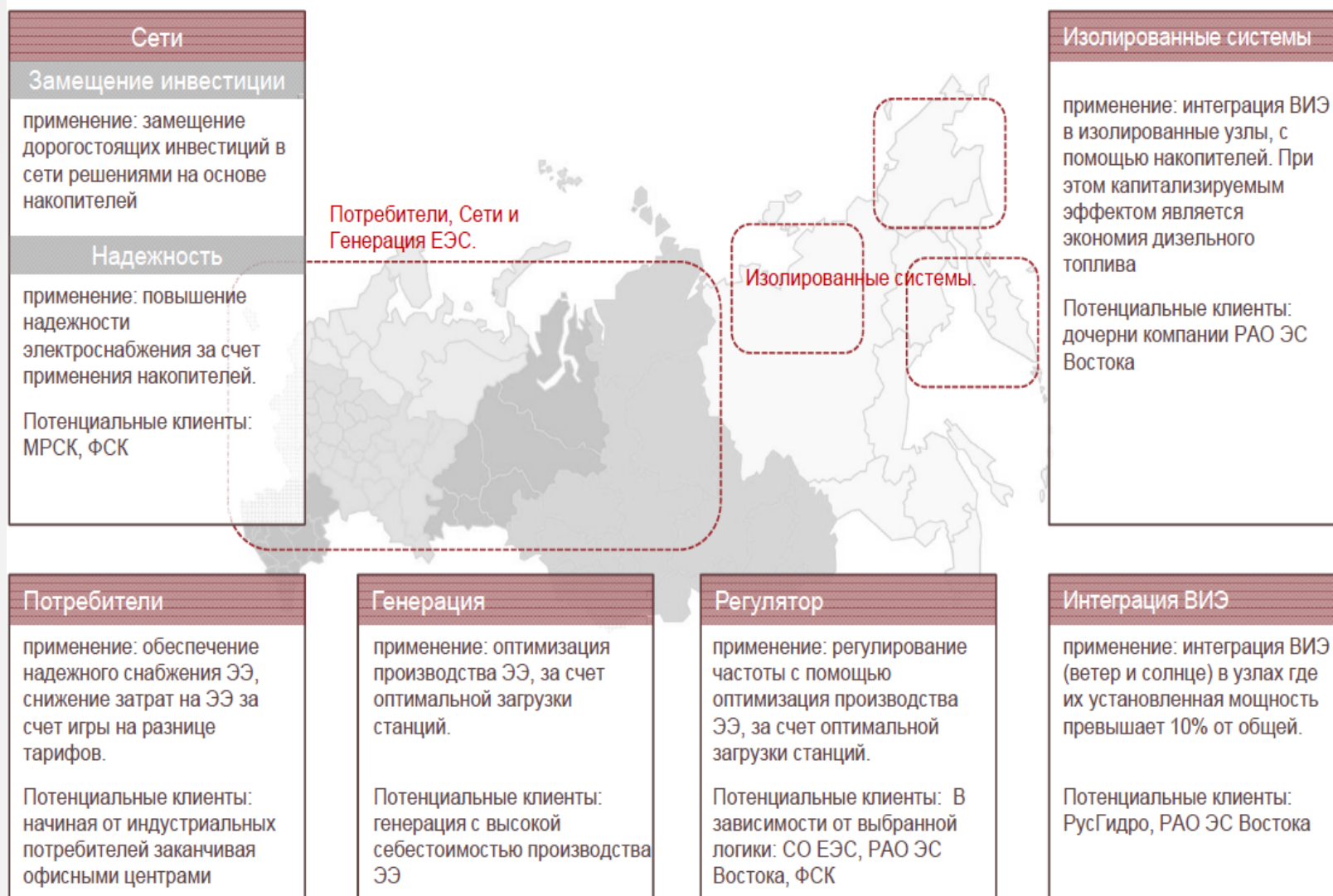


Потребитель

- Снижение платы за электроэнергию
- Эффективное управление спросом
- Повышение надежности



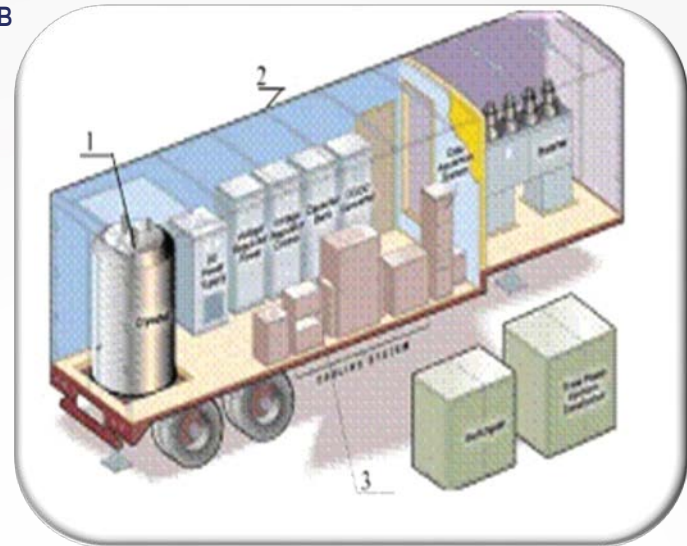
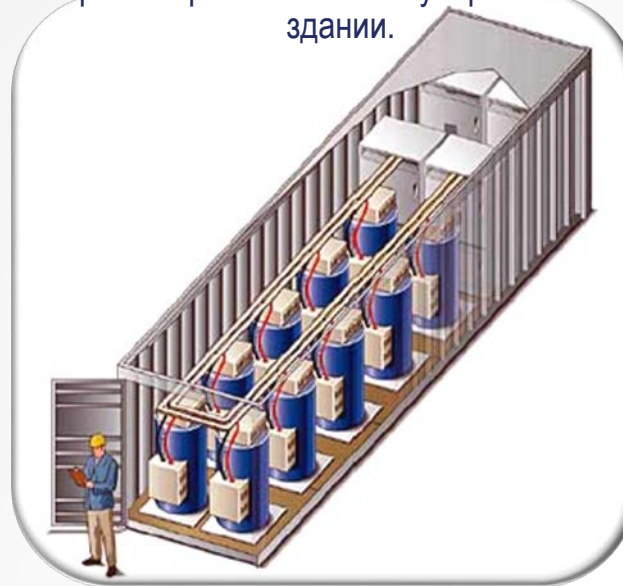
Потенциальные области применения накопителей в России





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.

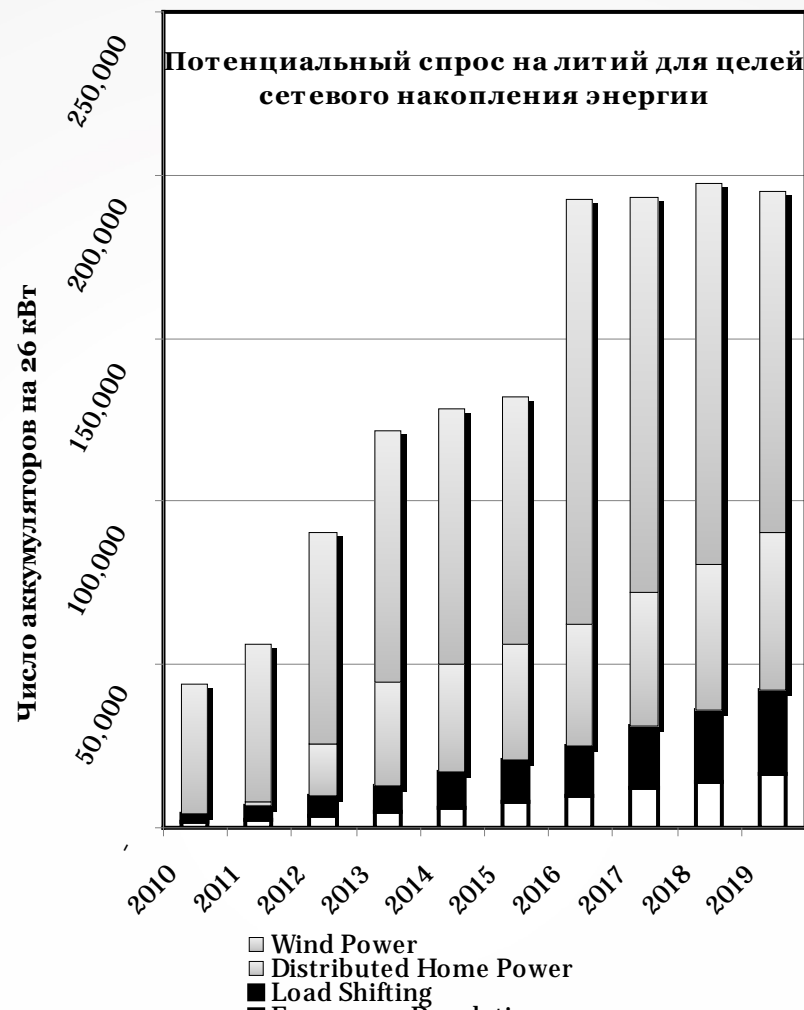
Прогноз развития рынка систем накопления электроэнергии



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.

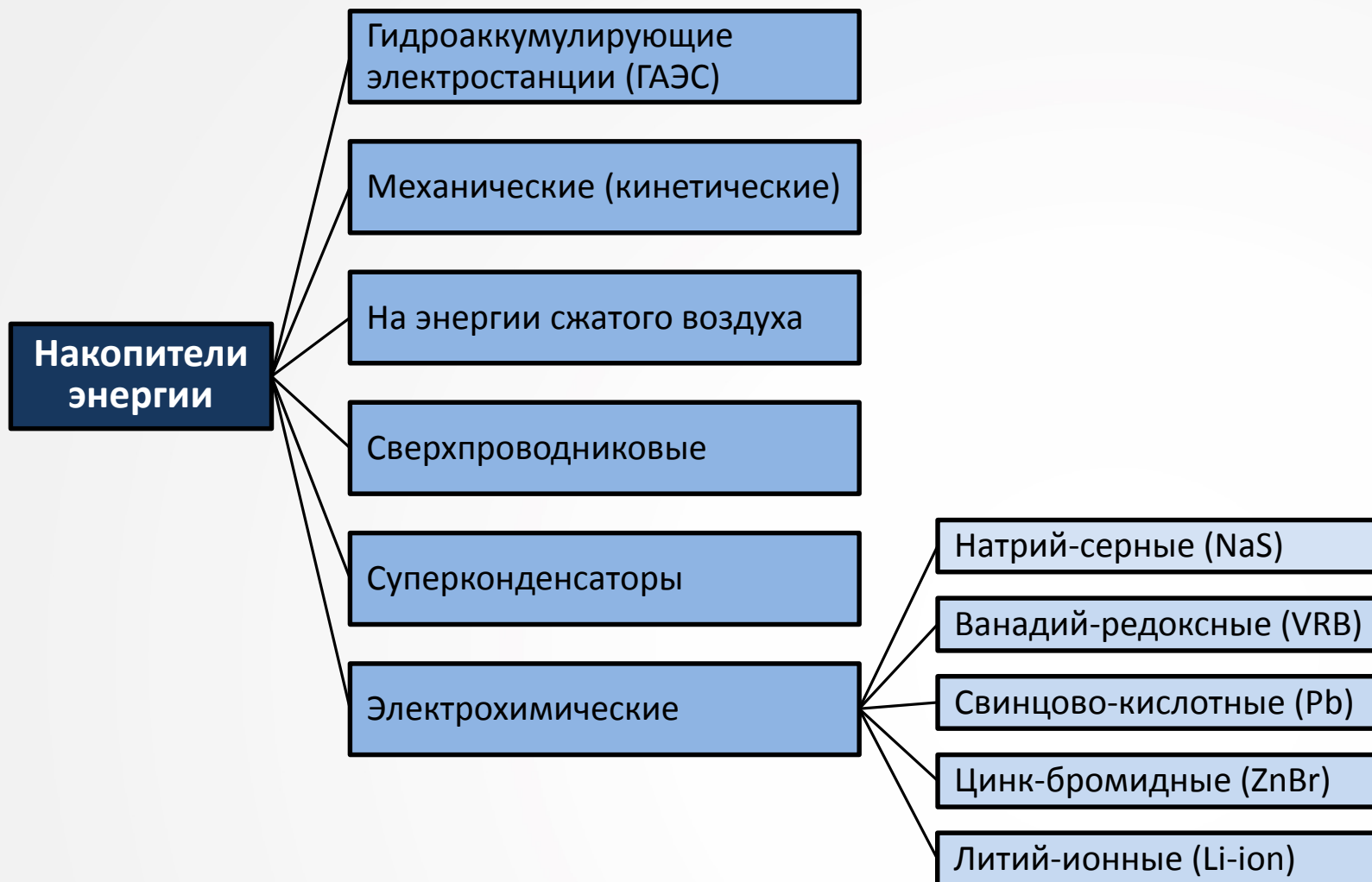
Ожидается, что к 2015 г. мировой рынок сетевых накопителей энергии удвоится



Классификация систем накопления электроэнергии



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»





Натрий-серные аккумуляторы

Преимущества:

Большая емкость - 700 Втч/кг

Высокий КПД – 85%

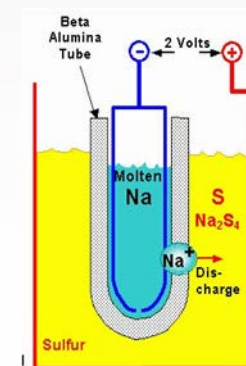
Относительно большой ресурс – 5000 циклов

Высокое быстродействие – 1 мсек

Относительно низкий саморазряд

Экологическая безопасность + герметичные элементы

Налажено серийное производство + опыт эксплуатации более 15 лет



Недостатки:

Относительно высокая стоимость

Высокая рабочая температура





Ванадий-редоксные (проточные) аккумуляторы

Преимущества :

Высокая емкость благодаря большому запасу электролита 80 Втч/кг

КПД – 80%

Большое количество циклов – >10 000

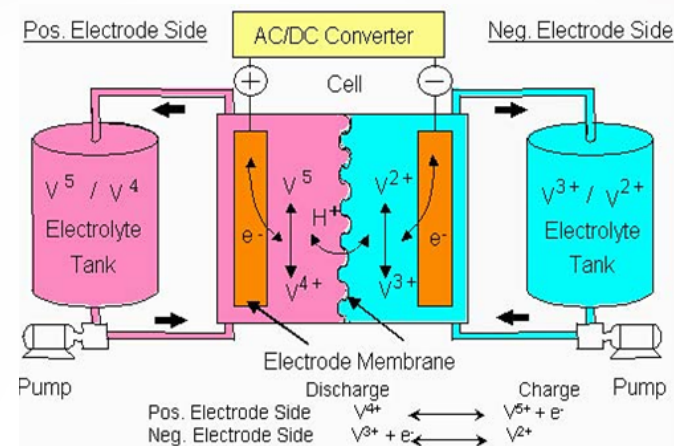
Длительный срок службы – 10-20 лет

Высокое быстродействие – 1 мсек

Недостатки:

Высокая стоимость, отсутствие серийного производства

Единичные установки в мире (4 МВт/1,5 часа макс.)



Свинцово-кислотные аккумуляторы



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Преимущества:

Отработанная технология

Невысокий саморазряд – 3-10% в мес.

Относительно простая система обслуживания

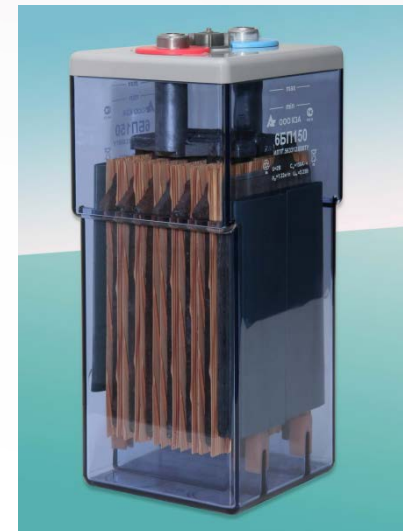
Недостатки:

Низкая удельная энергоемкость 35 Втч/кг

КПД – 85%

Количество циклов – до 2000

Жесткие требования по экологической безопасности при утилизации





Цинк-бромидные аккумуляторы

Преимущества:

Высокая емкость благодаря большому запасу электролита

КПД – 80%

Большой количество циклов

Длительный срок службы

Высокое быстродействие – 1 мсек

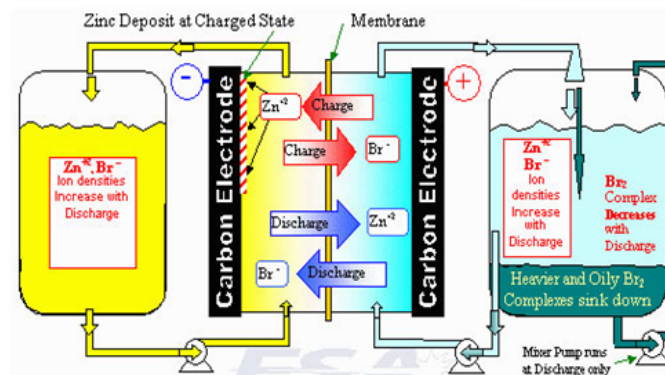
Быстрый заряд – 4-5 часов

Мощность производимых систем до 500 кВт (есть возможность параллельного включения)

Недостатки:

Значительные затраты на обслуживание

Ограниченное производство



Литий-ионные аккумуляторы

Преимущества:

Наибольшая плотность энергии из всех разновидностей аккумуляторов – как объемная, так и весовая.

Быстрый процесс заряда батарей - до 90% емкости за 30-40 мин

Низкий показатель саморазряда - до 5% в месяц

Могут утилизироваться без предварительной переработки

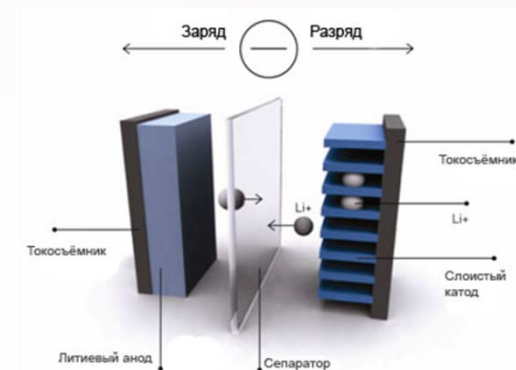
Недостатки:

Возможность взрыва при механическом повреждении или перезарядке аккумулятора

Достаточно быстрое старение аккумулятора - большинство аккумуляторов резко снижают свои характеристики при хранении или использовании более 5 лет

Для создания аккумуляторных батарей требуется сложная система управления батареями

Относительно высокая стоимость





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	-

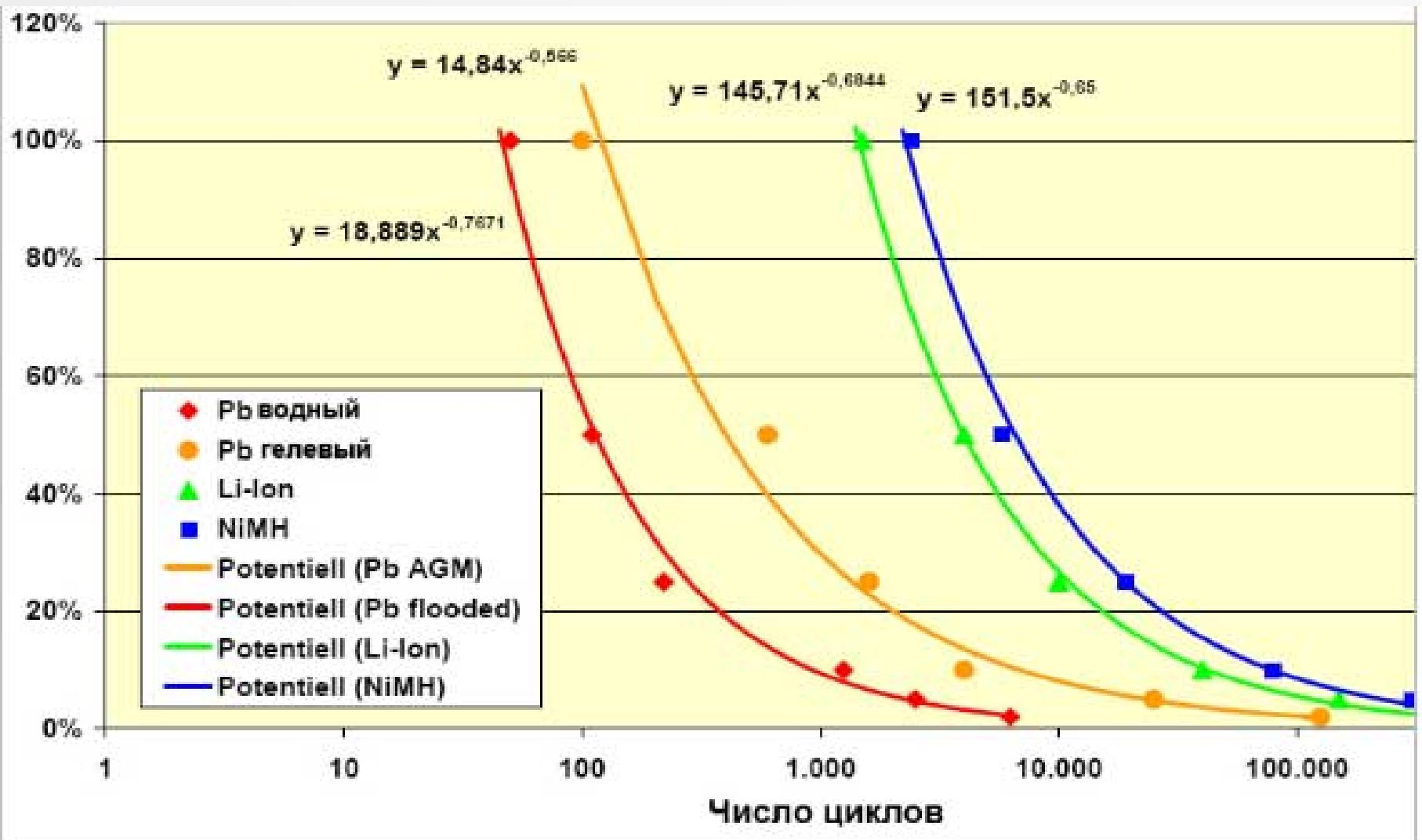
* По данным Sandia National Laboratories, США, 2007 г. 113

** 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

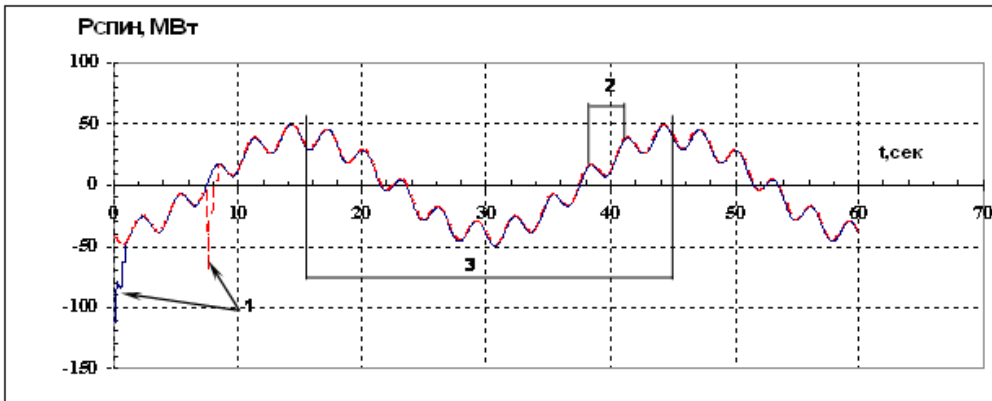
Требования	NaS	VRB	Pb	ZnBr	Li-ion**
Большая мощность	10	4	10	6	10
Высокая эффективность	10	8	6	7	10
Низкая стоимость утилизации	7	7	10	7	-
4..10 часов работы при номинальной мощности	8	10	6	5	-
Низкая полная стоимость (за МВт*ч)	9	7	10	7	-
Низкая стоимость перемещения	9	4	7	10	-
Коммерческое (серийное) 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 г. 113

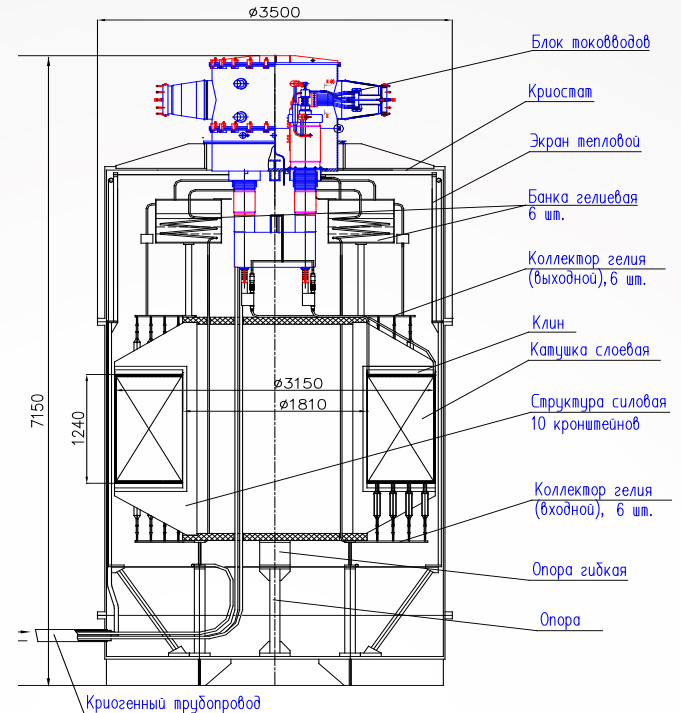
** Экспертная оценка

Построения сетевых регуляторов мощности (СРМ) на основе СПИН для многофункционального применения на различных объектах ОАО «ФСК ЕЭС» с целью повышения статической и динамической устойчивости энергосетей и узлов нагрузки, а также повышения пропускной способности передающих линий и межсистемных связей за счет подавления регулярных и нерегулярных колебаний мощности. Наиболее рациональным представляется распределение необходимой для этих целей общей энергоемкости 500-1500 МДж и общей мощности 40-120 МВт между одинаковыми модулями СПИН с запасом энергии 30-60 МДж в каждом, допускающими транспортировку автомобильным транспортом. Головной образец такого модуля СПИН может быть создан и испытан за 2,5-3 года.

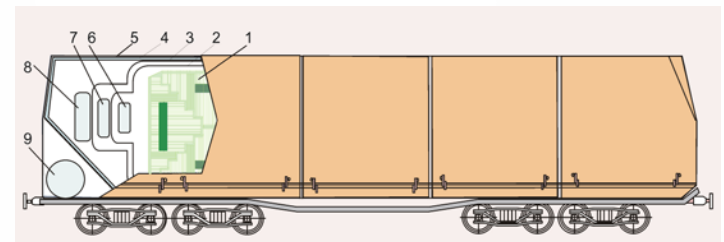
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ СПИН



- 1 - компенсация провалов мощности (60-70 МВт; 1 сек)
- 2 - компенсация регулярных колебаний мощности (8-10 МВт; 0,3-0,5 Гц)
- 3 - компенсация нерегулярных колебаний мощности (40 МВт; период T до 30 сек)



Модуль СПИН энергоемкостью 66,7 МДж (проект)



Проект транспортного модуля СПИН на 850 МДж
ФАО

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ И РЕЖИМНОЙ НАДЕЖНОСТИ МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ И ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЙ.

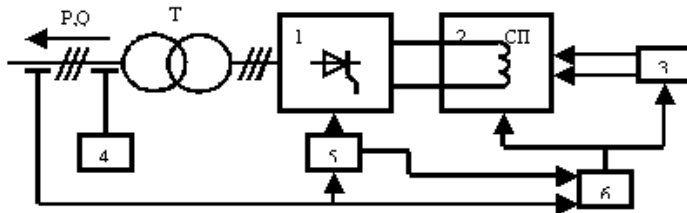
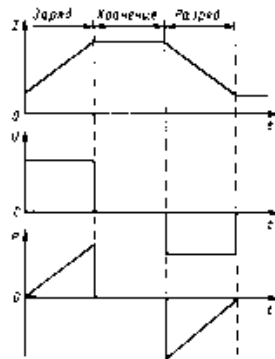


Схема СПИН

1 – преобразователь; 2 – криостат; 3 – рефрижератор;
4 – устройство компенсации; 5 – регулятор; 6 – устройство защиты



Характер изменения тока, напряжения, мощности СПИН

Энергия определяется следующим выражением:

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

где L - индуктивность СП катушки, I - ток.
Максимальный ток в СП катушке

$$i_{\text{max}} \cong \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{U}{x_v};$$

Максимальная запасенная энергия

$$W_{\text{max}} = \frac{L_u \cdot i_{\text{max}}^2}{2} = L_u \frac{U^2}{4x_v^2}$$

Полная, активная и реактивная мощности

$$S \cong K_{\text{cx}} \frac{U^2}{x_v} \sqrt{K_3} = K_{\text{cx}} \frac{U}{2} \sqrt{\frac{\int_0^t P(t) dt}{L_u}};$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}; P_3(t) = F_v(f, U, P, Q, \dots)$$

где K_{cx} - коэффициент схемы, $K_3 = \frac{W}{W_{\text{max}}}$ - коэф. заряда;

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial P}{\partial K_3} \Delta K_3 + \frac{\partial P}{\partial \alpha} \Delta \alpha \\ \Delta Q &= \frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial Q}{\partial K_3} \Delta K_3 + \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \Delta \alpha \end{aligned} \right\}$$

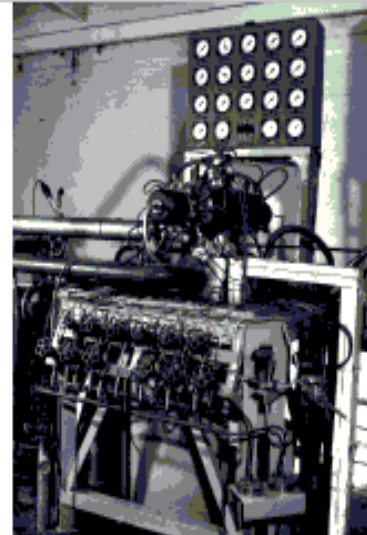
КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМ



Система связи, управления и преобразования



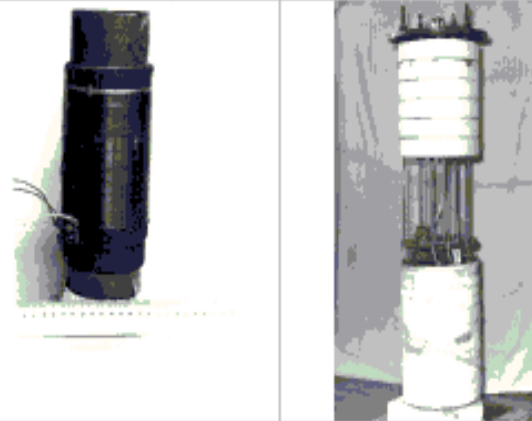
Модель электросистемы



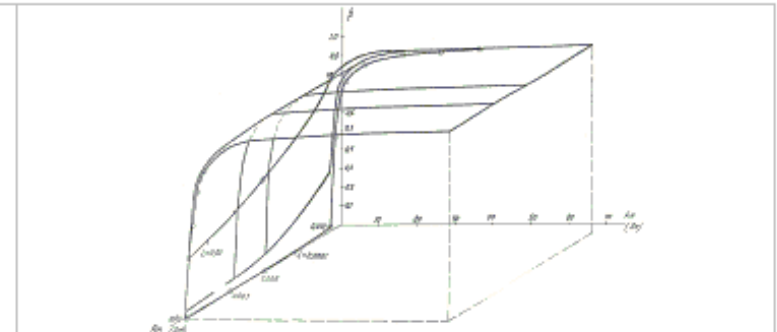
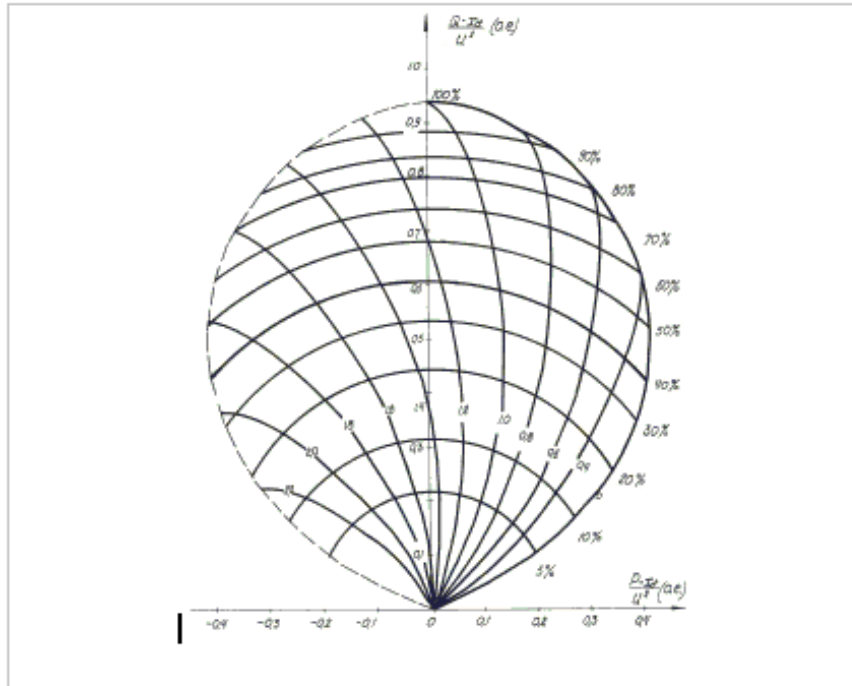
Криогенно-вакуумная система



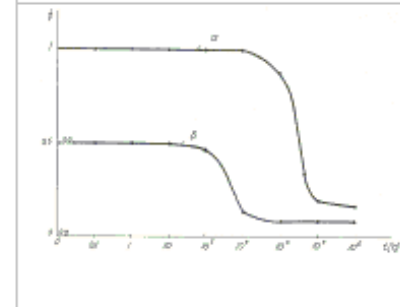
Пульт регистрации и управления СПИН



Сверхпроводниковая магнитная система емкостью 10^5 Дж и сверхпроводниковый нелинейный реактор



Зависимость $\eta = f(L_{\Sigma}, R_{\Sigma})$ при $\alpha_{\Sigma} = 0,001$ 1/с



$$\eta(t) = \frac{D_{\pi}(t) - D_{\pi}(t)}{D_{\pi}(t)}$$

$$K_{\sigma}(z) = D_{\sigma} \cdot e^{-\frac{z}{T_{\sigma}}}, S_{\sigma}(p) = \frac{2D_{\sigma} \cdot \frac{1}{T_{\sigma}}}{(\frac{1}{T_{\sigma}})^2 - p^2}$$

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{1}{T_{\Sigma}}$$

Внешние статические характеристики СПИН

$$\frac{dP}{dt} = F(U, f, K_3, P) + B(U, f, K_3) \alpha; \alpha = K(P_3 - P); P_3 = P - \frac{F(U, f, K_3, P)}{B(U, f, K_3)K}$$

$$\frac{P(t)}{i(t)} = R_{\Sigma} i(t) + L_{\Sigma} \frac{di(t)}{dt}$$

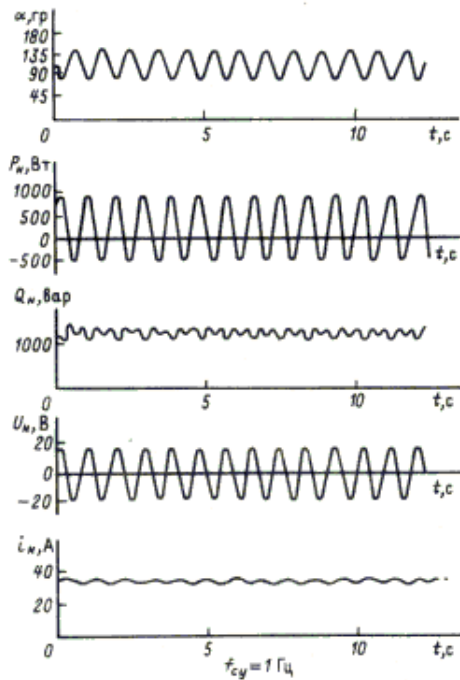
$$P(t) = R_{\Sigma} \cdot i^2(t) + \frac{1}{2} L_{\Sigma} \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = P_{\pi}(t) + \frac{1}{2} \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \cdot \frac{dP_{\pi}(t)}{dt}$$

$$D_{\pi}(t) = \frac{D_{\Sigma} \beta}{\beta^2 - \alpha_{\Sigma}^2} [\beta - \alpha_{\Sigma} + (\beta + \alpha_{\Sigma}) e^{-\beta t} - 2\beta \cdot e^{-(\beta + \alpha_{\Sigma}) t}]; \beta = \frac{2R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}};$$

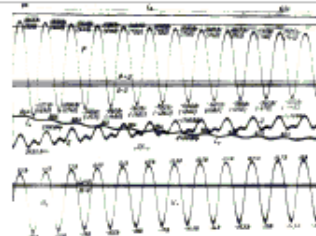
$$\eta(t) = 1 - \frac{\beta}{\beta^2 - \alpha_{\Sigma}^2} [\beta - \alpha_{\Sigma} + (\beta + \alpha_{\Sigma}) e^{-\beta t} - 2\beta \cdot e^{-(\beta + \alpha_{\Sigma}) t}]$$

$$\eta = 1 - \frac{\beta}{\alpha_{\Sigma} + \beta} = \frac{L_{\Sigma}}{L_{\Sigma} + 2T_{\Sigma} R_{\Sigma}}$$

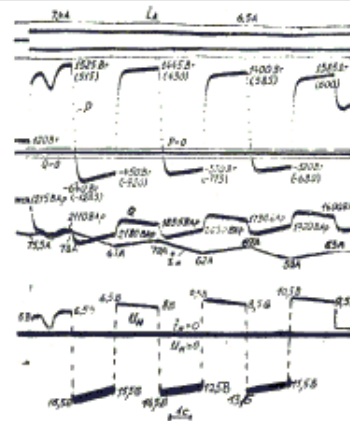
Зависимость $\eta(t)$ а) $\alpha_{\Sigma} = 0,0001$ 1/с; $L_{\Sigma} = 100$ Гн; $R_{\Sigma} = 0,001$ Ом; б) $\alpha_{\Sigma} = 0,001$ 1/с; $L_{\Sigma} = 10$ Гн; $R_{\Sigma} = 0,005$ Ом;



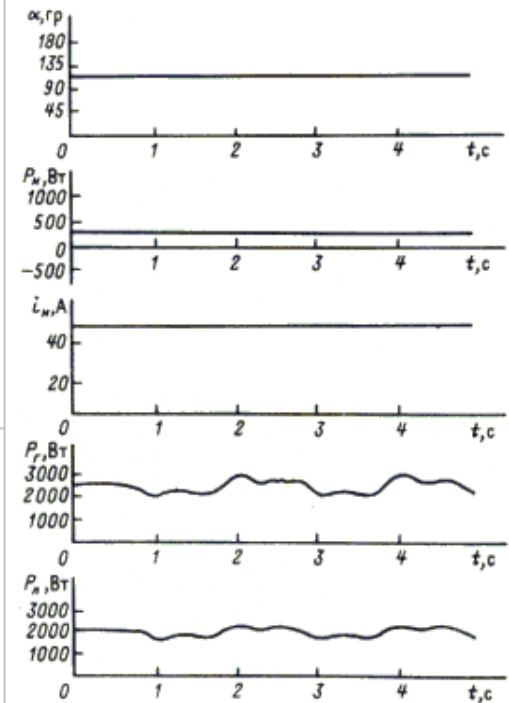
Экспериментальная осциллограмма переходного процесса в СПИН при синусоидальной форме сигнала управления ($f_{c.u.} = 1 \text{ Гц}$)



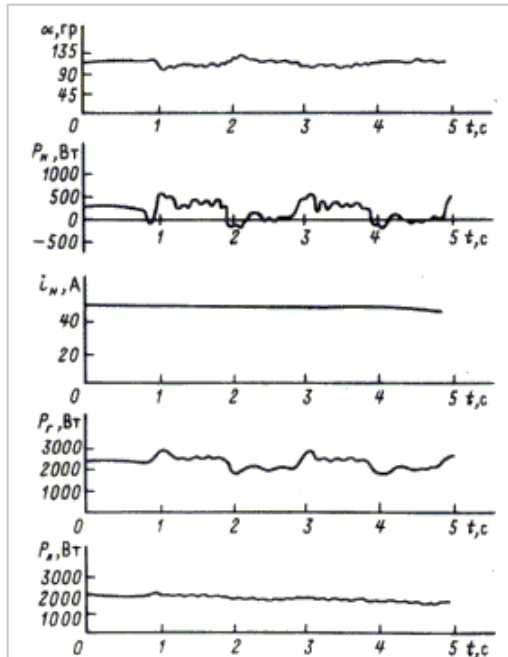
Экспериментальная осциллограмма переходного процесса в СПИН при синусоидальной форме сигнала управления ($f_{c.u.} = 0,5 \text{ Гц}$)



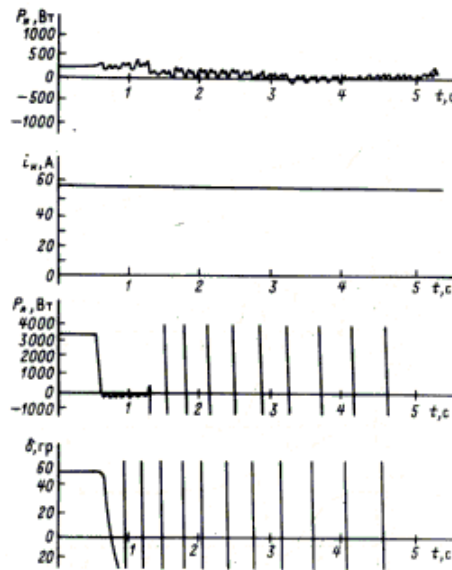
Экспериментальная осциллограмма переходного процесса в СПИН при прямоугольной форме сигнала управления ($f_{c.u.} = 0,25 \text{ Гц}$)



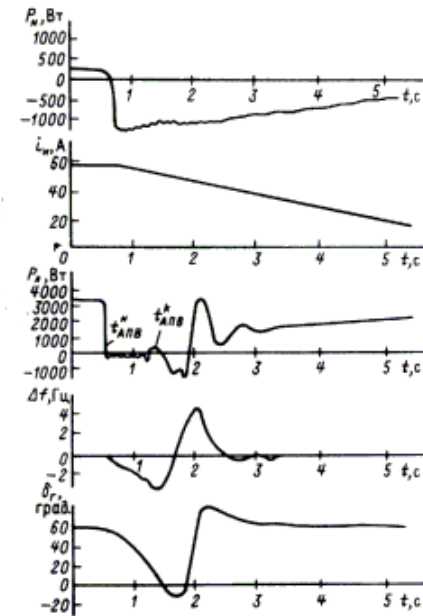
Осциллограмма переходного процесса в энергосистеме при периодическом изменении момента турбины



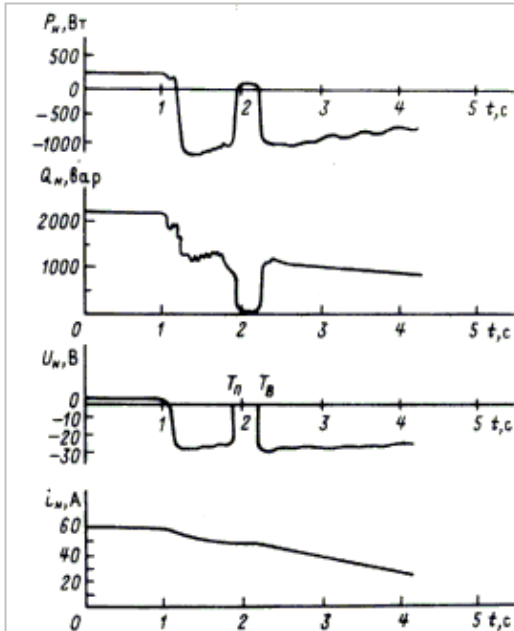
Осциллограмма переходного процесса в энергосистеме при периодическом изменении момента турбины и включении СПИН в контур управления



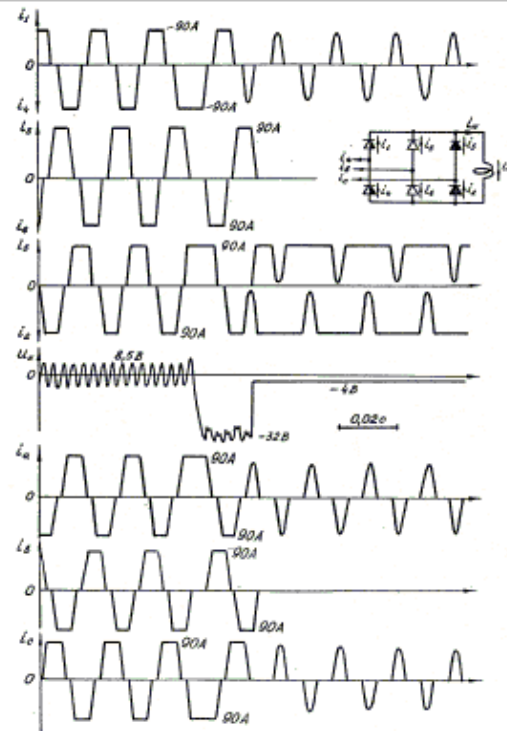
Переходный процесс при БАПВ ЛЭП (СПИН в режиме хранения)



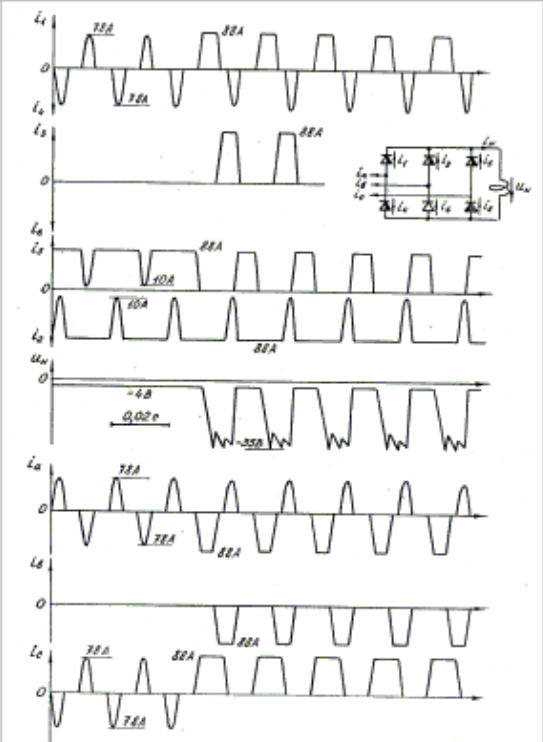
Переходный процесс в энергосистеме при ТАПВ линии электропередачи и переводе СПИН в режим выдачи



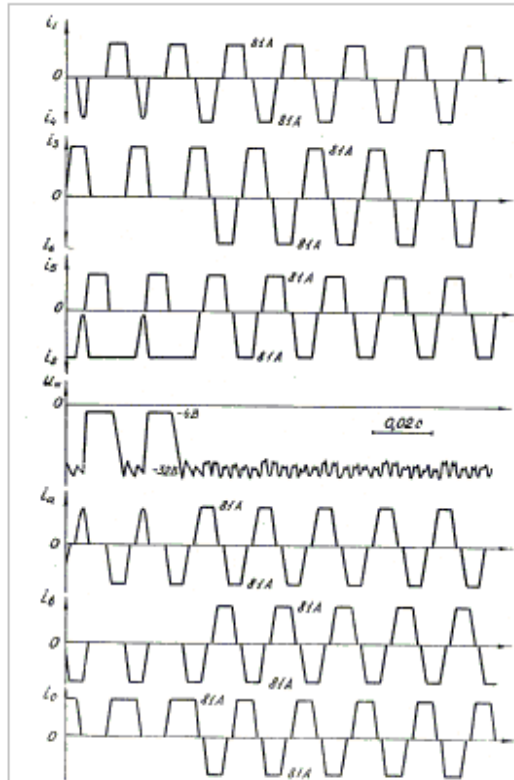
Потеря управляемости СПИН во время переходного процесса



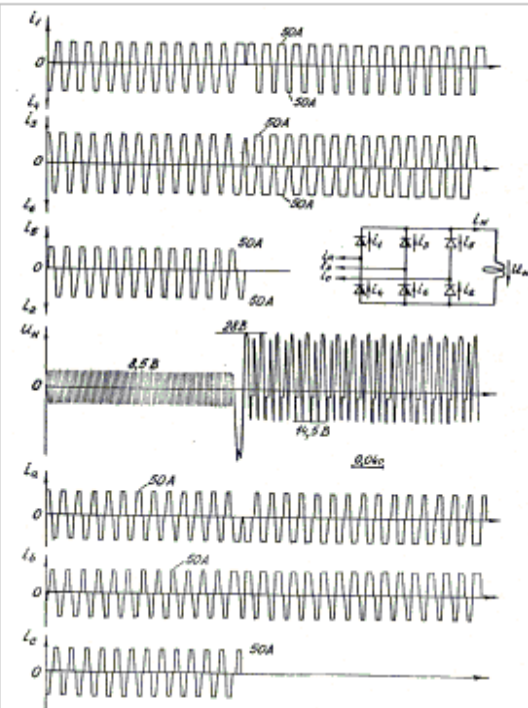
Потеря управляемости СПИН при переключении угла управления $\alpha_1 = 85^\circ$ и $\alpha_2 = 145^\circ$



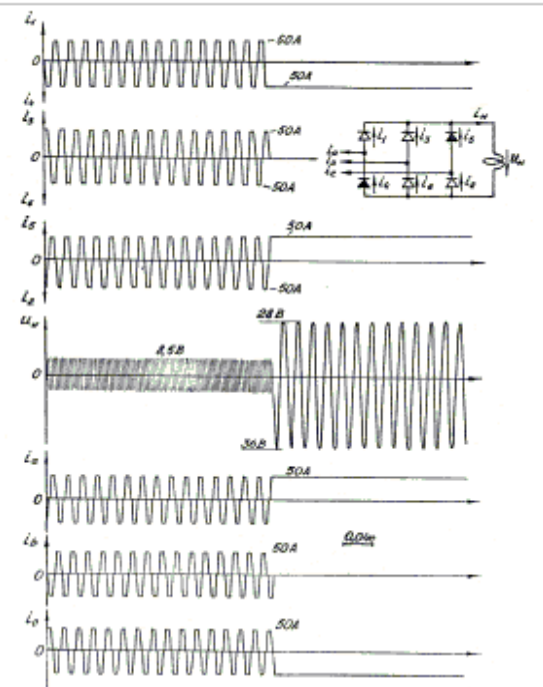
Изменение режима преобразователя в процессе разряда СПИН



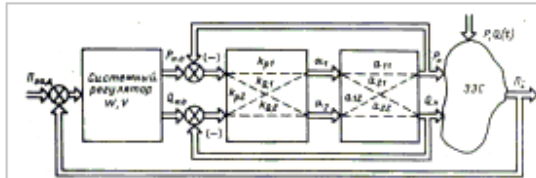
Восстановление управляемости СПИН



Потеря управляемости СПИН при переключении угла управления $\alpha_1 = 88^\circ$ и $\alpha_2 = 155^\circ$



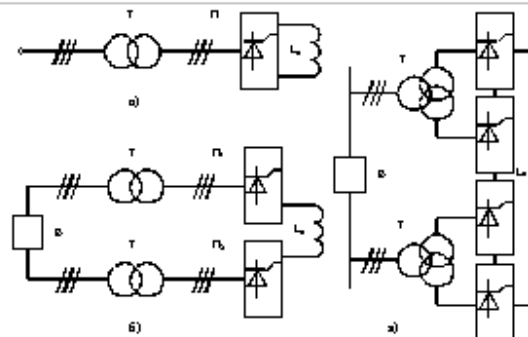
Потеря управляемости СПИН при переключении угла управления $\alpha_1 = 88^\circ$ и $\alpha_2 = 160^\circ$



$$\left. \begin{aligned} P_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^n W_i(p) P_i(p), \bar{P} > P_{\Sigma} > \underline{P}; \\ Q_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^n V_i(p) Q_i(p), \bar{Q} > Q_{\Sigma} > \underline{Q} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} P_{\Sigma} &= k \frac{2\sqrt{3}}{\pi} UI_{\Sigma} (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2); \\ Q_{\Sigma} &= k \frac{2\sqrt{3}}{\pi} UI_{\Sigma} (\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2), \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{3}{2\sqrt{2}\pi} UI (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2 + \cos\alpha_3 + \cos\alpha_4); \\ Q &= \frac{3}{2\sqrt{2}\pi} UI (\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2 + \sin\alpha_3 + \sin\alpha_4), \end{aligned} \right\}$$



Схемы связи

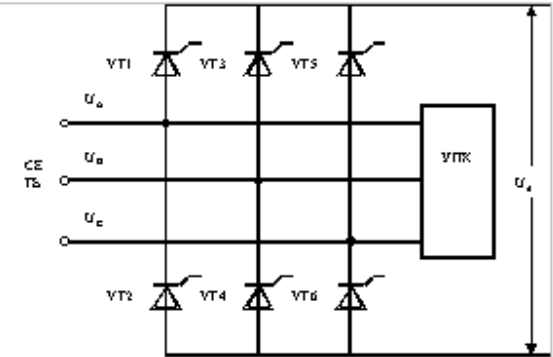
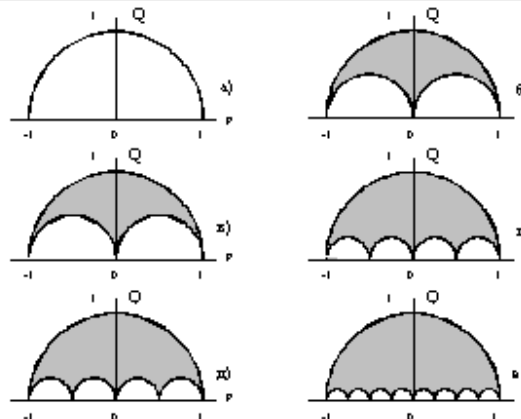
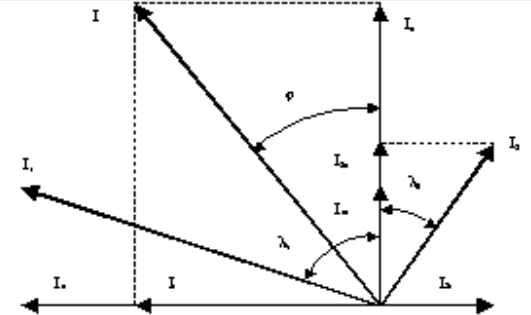


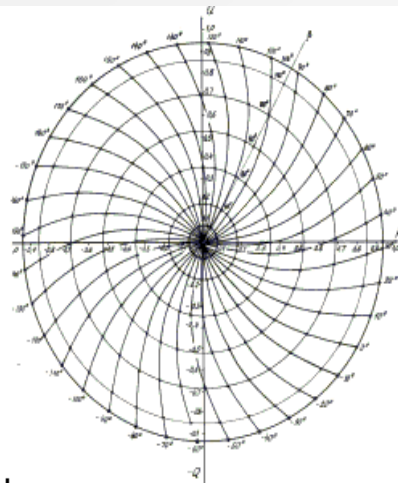
Схема связи с устройством принудительной коммутации



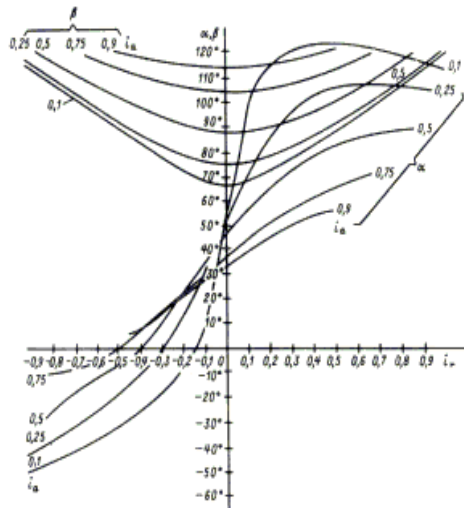
Внешние характеристики без учёта коммутации



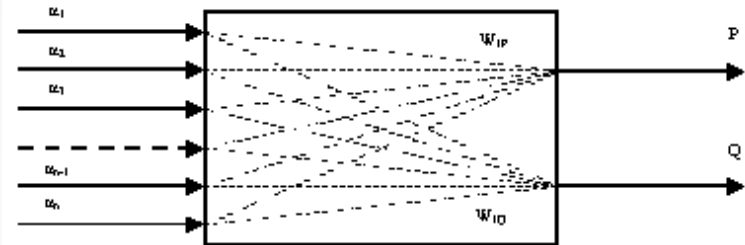
Активная и реактивная составляющие первой гармоники фазного тока



Внешние характеристики РУ СПИН с преобразователем с УПК



Зависимость α и β от активной и реактивной составляющих токов



Распределительное устройство СПИН как многоканальный, многосвязанный объект управления

$$\Delta C_{1P} = \Delta C_{1P}^1 + \Delta C_{1P}^2 + \dots + \Delta C_{1P}^n = \int_0^F \log \frac{S_{\alpha_1}(f) W_{1P}^2(f)}{S_P(f)} df + \sum_{k=0}^n \int_0^F \log \frac{S_{\alpha_1}(f) V_k^2(f)}{S_Q(f)} df,$$

где $S_Q(f)$, $S_P(f)$ - спектральные плотности активной и реактивной мощностей.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \alpha_1 &= k_{p1} \Delta P + k_{q1} \Delta Q; \\ \Delta \alpha_2 &= k_{p2} \Delta P + k_{q2} \Delta Q. \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= a_{11} \Delta \alpha_1 + a_{12} \Delta \alpha_2; \\ \Delta Q &= a_{21} \Delta \alpha_1 + a_{22} \Delta \alpha_2. \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \varphi_P(\alpha_1, \alpha_2); \\ Q &= \varphi_Q(\alpha_1, \alpha_2). \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1^{(k+1)} \\ \alpha_2^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1^{(k)} \\ \alpha_2^{(k)} \end{bmatrix} - \mathcal{Y}^{-1}(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}) \begin{bmatrix} P - \varphi_P(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}) \\ Q - \varphi_Q(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}) \end{bmatrix}$$

где $\mathcal{Y}^{-1}(\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)})$ - матрица Якоби

	<p>Фаза Шубникова.</p>	
<p>Электрическая машина с ВТСП ротором: а - цилиндрического исполнения; б - торцевого исполнения; 1 - статор; 2 - ротор; 3 - криостат; 4 - азот; 5 - ВТСП-шайбы.</p>	<p>Нелинейные сверхпроводниковые реакторы с замкнутым (а), разомкнутым экранами (б), комбинированного типа (в); 1 - первичная обмотка; 2 - магнитопровод; 3 - экран; 4 - переключающий элемент; 5 - короткозамкнутые обмотки</p>	
<p>Механическая характеристика асинхронной машины: 1 - 3 - сопротивления цепи ротора $r_1 < r_2 < r_3$ Механическая характеристика электрической машины со сверхпроводниковым ротором</p>		

Гелевый криостат в сборе.

**Сверхпроводниковая магнитная система СПИН с
энергоемкостью $W = 0,5 \cdot 10^6$ Дж.**



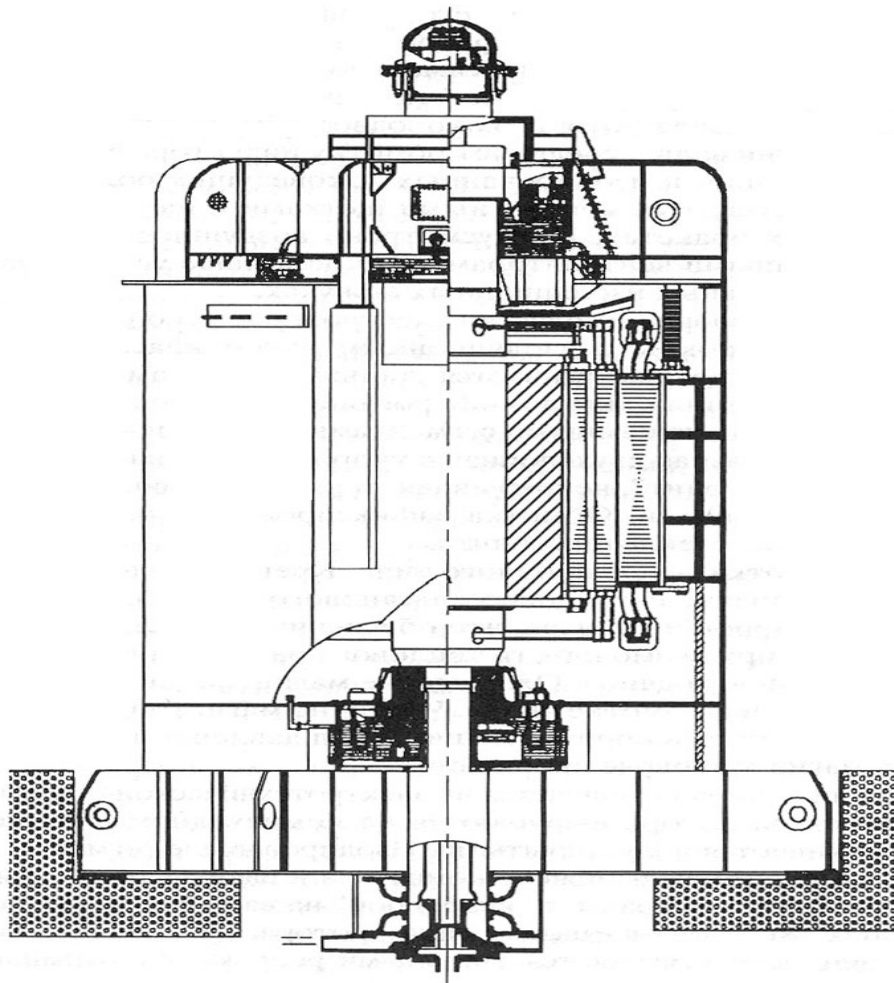
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



Проект маховикового накопителя на основе АС машины вертикального исполнения мощностью 200 МВт.



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



В настоящее время нет практических ограничений по созданию агрегатов первого типа мощности до 300 – 400 МВт и второго типа мощности 800 – 1600 МВт. Первый тип агрегатов имеет больший диапазон изменения скорости и большую способность использования кинетической энергии вращающихся машин, второй тип способен работать в диапазоне регулирования частоты вращения 50% от синхронной, имеет меньшую мощность преобразовательного устройства, чем в первом случае, обладает меньшей стоимостью и может быть выполнен на большую мощность. В России был разработан эскизный проект маховикового накопителя на основе асинхронизированной машины вертикального исполнения мощностью 200 МВт.

Установка фирмы Beacon Power



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



Установка введена в эксплуатацию в 2011 году фирмой Beacon Power
First 20 MW merchant plant operating in New York (NYISO, New York Independent System Operator)

- \$43 million DOE loan guarantee

- \$2 million New York grant

композитных маховиков из углеродного и стекловолокна

Частота вращения маховиков 16000 – 8000 об/мин

Энергоемкость одного маховика 90 МДж

Привод маховика от магнитоэлектрического двигатель-генератора мощностью 100 кВт

Маховичный агрегат в сборе



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»



Ротор агрегата



ОАО «HTЦ ФСК ЕЭС»



Накопитель энергии с маховиком и двигатель-генератором с двойным питанием ROTES, Япония



1. Успешная коммерческая эксплуатация маховиковой генерирующей системы с регулированием скорости и двойным питанием разработки фирмы Toshiba продолжается с августа 1996 г. на подстанции Chujiowan компании Okinawa El.Power Co., Inc., в Японии.

2. Система ROTES в состоянии подавлять колебания частоты в энергосистеме при выдаче энергии, накопленной в роторе генератора и маховике при изменении частоты вращения в ответ на внезапные изменения нагрузки.

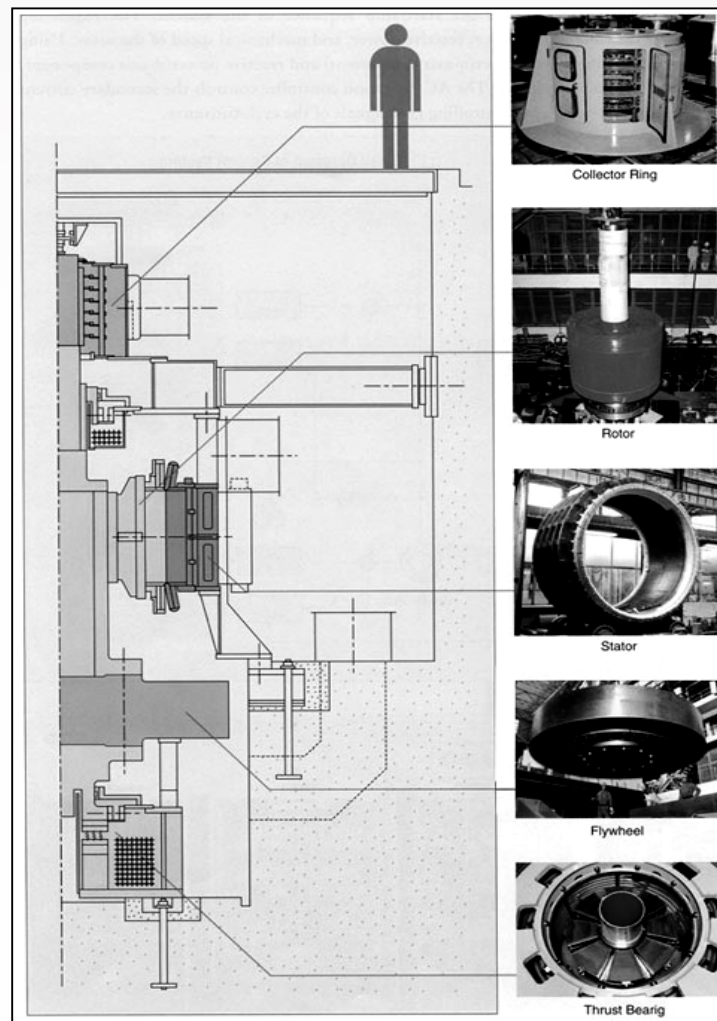
3. Система ROTES удерживает колебания частоты в пределах $60 \pm 0,3$ Гц (без неё $60 \pm 0,4$ Гц) при внезапном изменении нагрузки на 30 МВт, имеющем место при работе электрических печей, в условиях энергосистемы острова Окинава (потребление 400-1200 МВт).

Разрез ROTES и его технические характеристики



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Узел установки	Параметры	Номинальное значение
Генератор с маховиком	Мощность	26,5 МВА
	Напряжение	6,6 кВ
	Рабочая частота	60 Гц
	Частота вращения	510-690 об/мин
	Маховой момент GD^2	710 тм ²
Циклоконвертер	Отдаваемая энергия	200 МДж
	Мощность	6,55 МВА
	Напряжение	1930 В
	Рабочий ток	1960 А
Трансформатор системы возбуждения	Рабочая частота	0,25-9,0 Гц
	Мощность	4,2 МВА x 3
	Напряжения	6,6 кВ/ 770 В/770 В





Области применения АББЭ на объектах электроэнергетики РФ



ОАО «HTЦ 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.

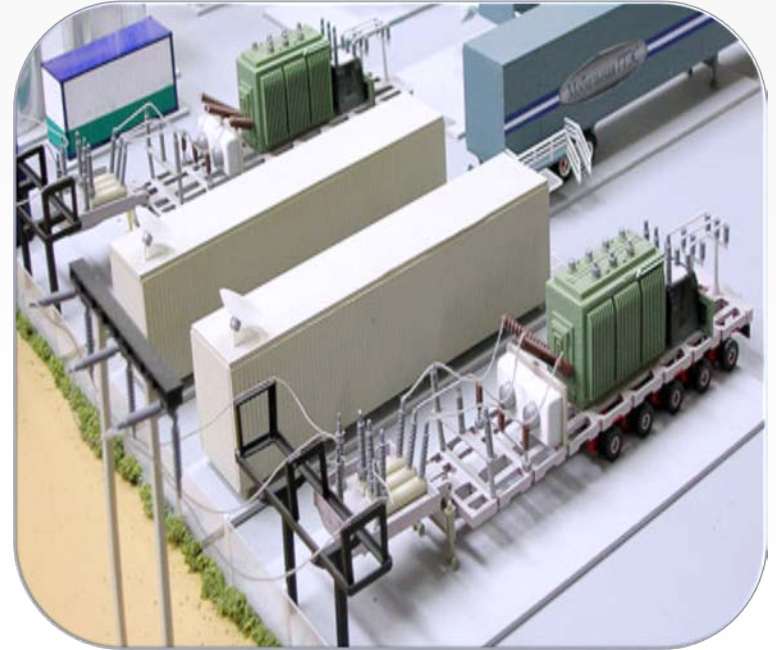
На объектах с возобновляемыми источниками энергии.

Применение АББЭ 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.





- ✓ 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.



Ветровые электростанции (ВЭС):

В 2008 году ОАО «РусГидро» одобрены 12 площадок, в том числе ВЭС на о. Русском мощностью 36 МВт.

Применение АББЭ на ВЭС позволяет:

- ✓ снизить колебания мощности;
- ✓ обеспечить требуемое качество электроэнергии;
- ✓ обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей.



Приливные электростанции (ПЭС):

Кислогубская ПЭС мощностью 1,5 МВт.

Применение АББЭ на ПЭС позволяет выравнять переменные графики работы ПЭС, обусловленные спецификой приливной энергетики.

Требуемая мощность АББЭ составляет примерно 0,5 МВт для Кислогубской ПЭС.

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**



Конструктивное исполнение СНЭ



ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Состав системы СНЭ

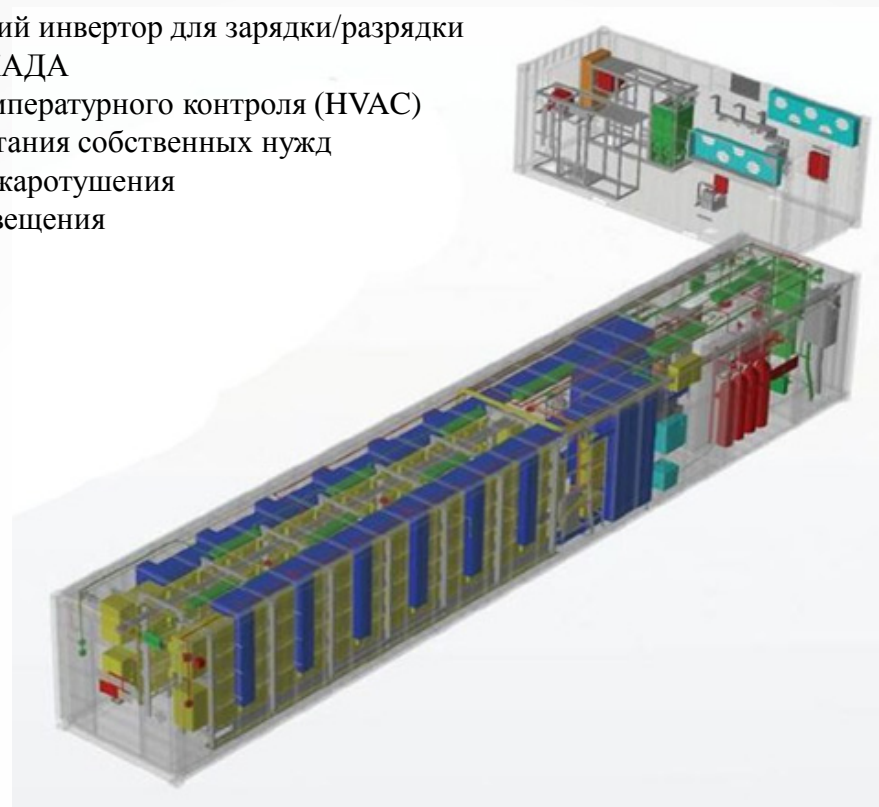


Батарея

Система температурного контроля (HVAC)
Система управления аккумуляторами (BMS)
Система питания собственных нужд
Система пожаротушения
Система освещения

Энергетический модуль

Двусторонний инвертор для зарядки/разрядки
Система СКАДА
Система температурного контроля (HVAC)
Система питания собственных нужд
Система пожаротушения
Система освещения



Одним из наиболее удобных конструктивных исполнений СНЭ является размещение компонентов СНЭ в стандартных транспортных контейнерах 6 метро и 12 метров, что позволяет обеспечить их мобильность и простоту монтажа.

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 «НТЦ ФСК ЕЭС»

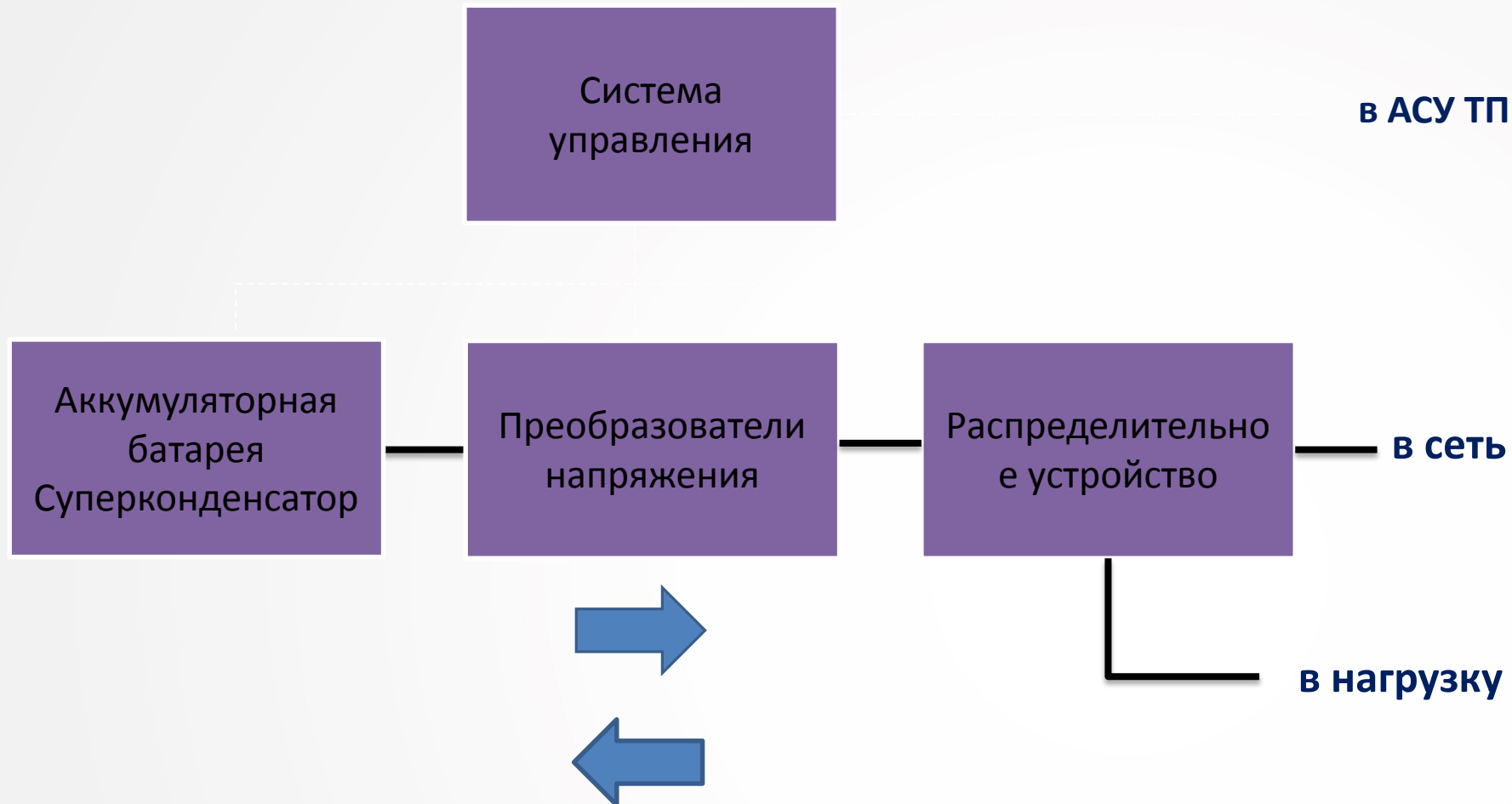
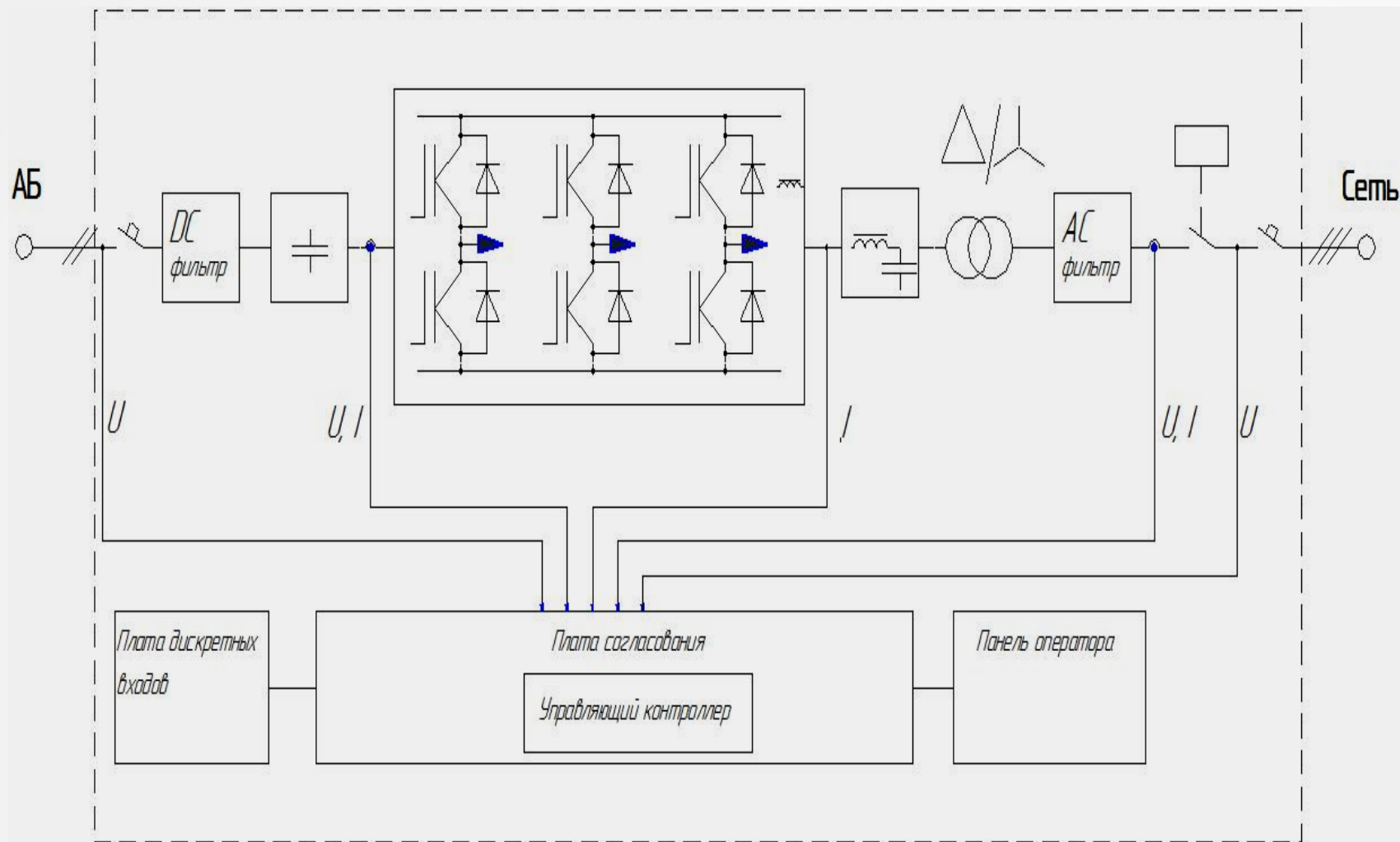




Схема двунаправленного инвертора





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

- 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 быстродействием системы управления, мс	10
Просадка напряжения на нагрузке при пропадании напряжения сети	По ГОСТ 13109-97



Особенности системы управления

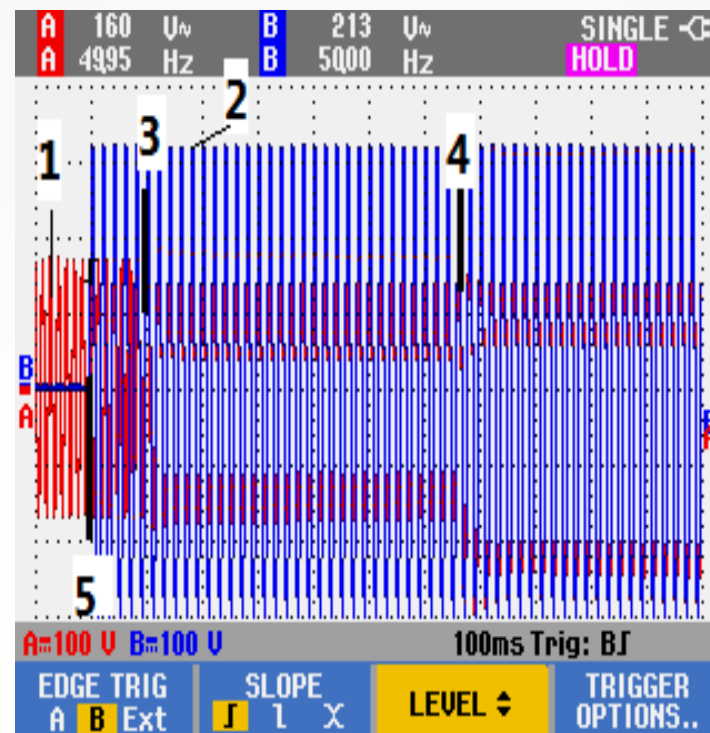
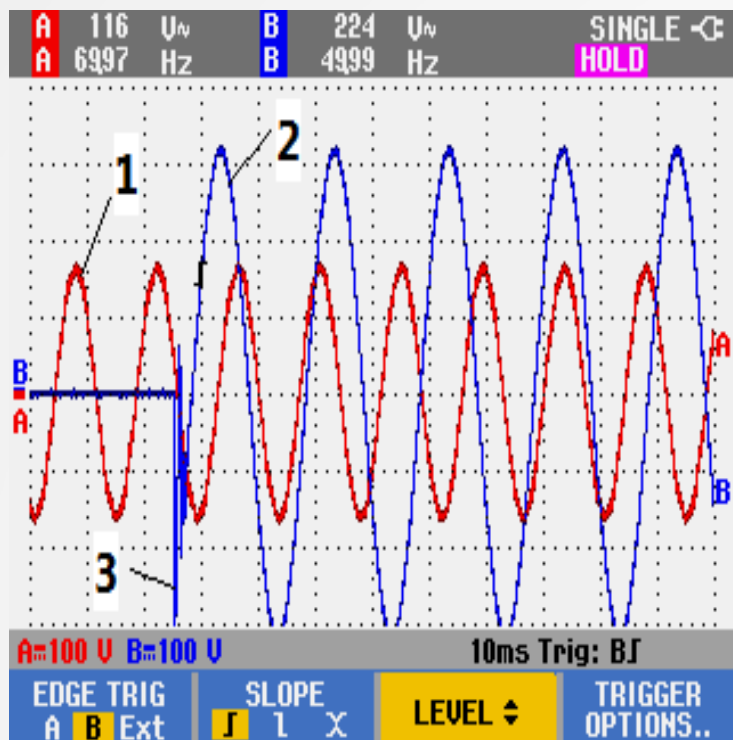
Разработан уникальный алгоритм управления на основе адаптивных цифровых фильтров, который позволяет оптимизировать параметры регуляторов в петле обратной связи в зависимости от измеряемого сигнала. Данный алгоритм позволяет существенно повысить быстродействие системы управления

- 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

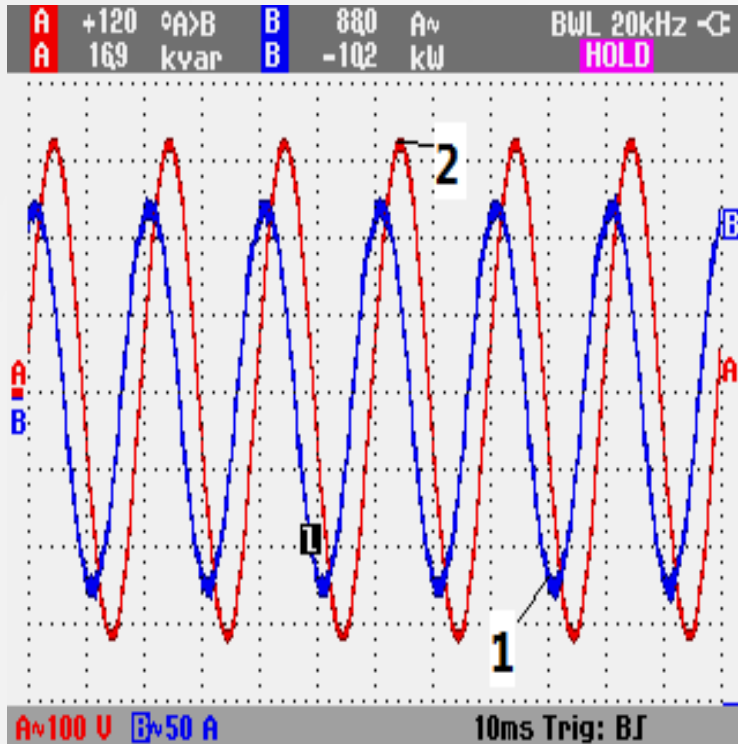


Переход от напряжения 125В/70Гц к напряжению 220В/50Гц

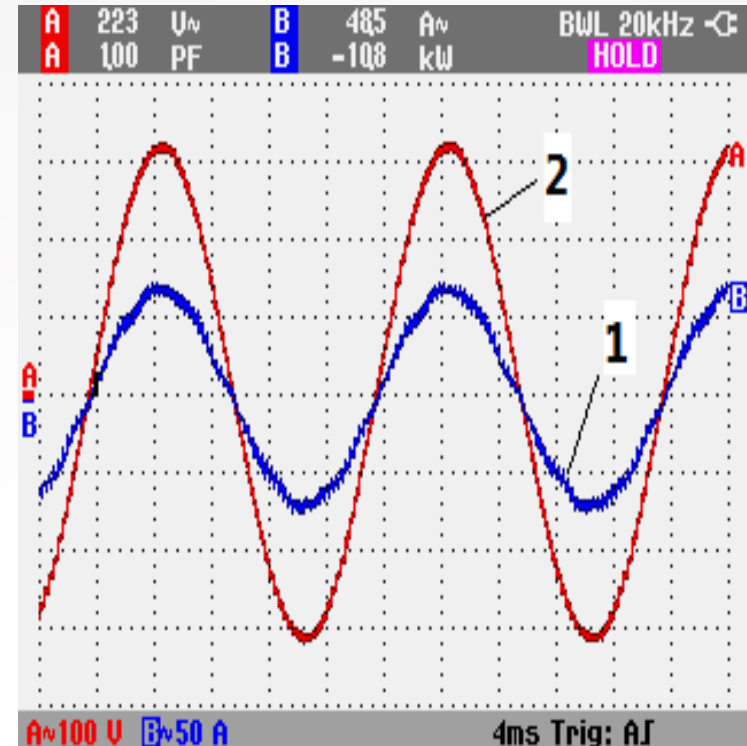
Компенсация реактивной мощности



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;

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 в докладе области применения накопителей энергии для регулирования и управления режимами электроэнергетической системы не являются исчерпывающими. В процессе исследований могут появиться новые области применения, также как и новые виды (технологии) накопления энергии.



Заключение



О «НТЦ ФСК ЕЭС»

Применение в электрических сетях аккумуляторных батарей большой энергоемкости 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 АББЭ целесообразно создание пилотных проектов.



Необходимо разработать технико-экономическое обоснование (ТЭО) применения накопительных аккумуляторных батарей большой энергоемкости для объектов электроэнергетики РФ.



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





ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ