



**ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНАЯ МОЛОДЕЖНАЯ
ШКОЛА «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ И ПРИОРИТЕТЫ НАУЧНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ»**

СПОСОБЫ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ И ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОРАЙОНАХ

Илюшин Павел Владимирович

**д.т.н., руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических
систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических
исследования РАН»**

Москва, 16-17 ноября 2022 г.

Существующее положение

2

В последние годы СНЭЭ находят все большее применение в энергосистемах различных стран мира для решения актуальных задач

Крупнейшая СНЭЭ Gateway Energy (Калифорния) введена компанией LS Power с литий-ионными АБ мощностью **250 МВт (1 ГВт*ч)** в 2020 г.

В отчете компании Bloomberg New Energy Finance отмечается, что к 2030 г. суммарная установленная мощность СНЭЭ в мире составит **125 ГВт**

До 2024 г. в России должны быть введены ВЭС и СЭС суммарной мощностью **5,28 ГВт**, по программе ДПМ ВИЭ 2.0 в 2025-2035 г.г. дополнительно планируется ввести **≈ 6,7 ГВт** на ВЭС и СЭС

В России не применяются СНЭЭ в составе электростанций на основе ВИЭ (2 пилотных проекта: Бурзянская СЭС – Республика Башкортостан; Кош-Агачская СЭС – Республика Алтай)

На энергообъектах России СНЭЭ используются совместно с ДГУ, в качестве РИСЭ, в т.ч. в СОПТ, а также для поддержания ПКЭЭ

Литий-ионные аккумуляторные батареи за последнее десятилетие подешевели в 2 раза (повысило их инвестиционную привлекательность)

В России имеются изолированные энергорайоны с объектами РГ (в т.ч. ВИЭ), а также некоторые энергорайоны могут отделяться от энергосистемы для работы в островном режиме с нагрузкой

Основные характеристики СНЭЭ

СНЭЭ состоит из накопителей электроэнергии, двунаправленного инверторного преобразователя с САУ, силового трансформатора, высоковольтной ячейки с коммутационным аппаратом, контейнера (6-12 м), системы собственных нужд, климат-контроля, пожаротушения, освещения

Мощность – определяется величиной мощности, которую может выдать накопитель в энергосистему или энергорайон (кВт, МВт)

Энергоемкость – величина энергии, которую накопитель может запасти и поставить в энергосистему или энергорайон (кВт*ч; МВт*ч)

Время отклика – время перехода накопителя из нерабочего состояния (холостого хода) в режим заряда или режим выдачи мощности с заданными параметрами

Время разряда – время, в течение которого мощность (электроэнергия) выдается в энергосистему или энергорайон без подзарядки

Плотность мощности и энергии – определяются величинами мощности и электроэнергии, приходящимися на единицу веса СНЭЭ (транспортировка; передвижные СНЭЭ; стесненные условия)

Суммарная эффективность СНЭЭ – определяется процентным соотношением электроэнергии, полученной при разряде к электроэнергии, затраченной на ее накопление и хранение

Виды технологий накопления энергии



Преимущества и недостатки литий-ионных НЭЭ

Преимущества:

- высокая объемная и весовая (90-180 Вт*ч/кг) плотность энергии
- большие ресурсные характеристики (до 15 000 циклов)
- быстрый процесс заряда АБ – до 90% энергоемкости за 30-40 мин (литий-фосфатные НЭЭ – до 3 кВт/кг);
- низкая величина саморазряда – до 5% в месяц
- функциональная гибкость в различных режимах работы
- исполнения устойчивые к низким температурам
- модульное исполнение, компактность
- возможна утилизация без предварительной переработки

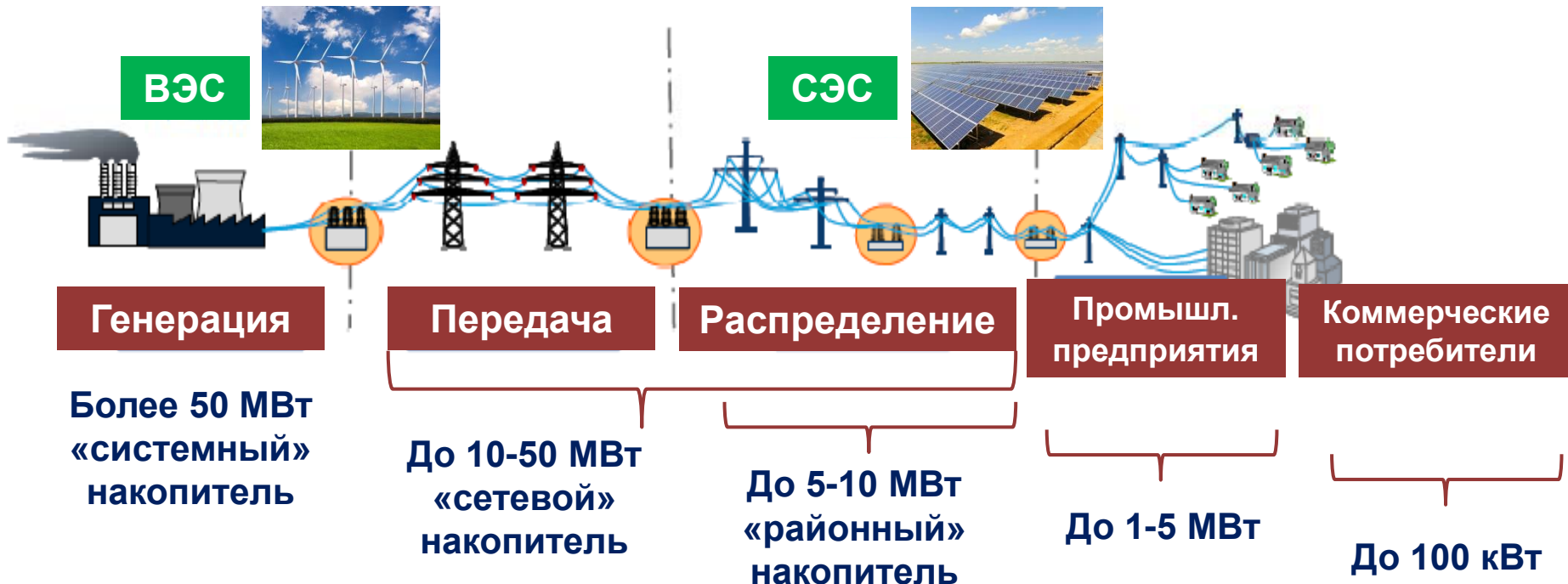
Недостатки:

- относительно высокая стоимость
- взрывоопасность/ пожароопасность при мех. повреждении/ перезаряде
- достаточно быстрое старение НЭЭ – большинство резко теряют параметры при хранении или использовании более 5 лет
- требуется сложная САУ аккумуляторной батареи в составе СНЭЭ
- неустойчивость большинства НЭЭ к высоким температурам
- ограниченность запасов лития в мире
- снижение ресурса при работе в пиковых режимах разряда/заряда
- специальные требования к глубине разряда

Опыт применения СНЭЭ в мире

6

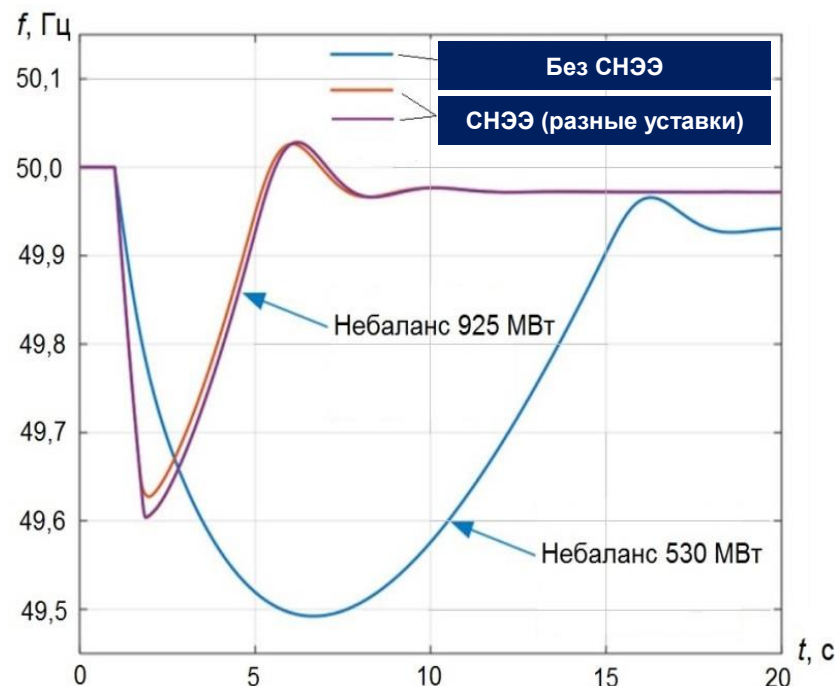
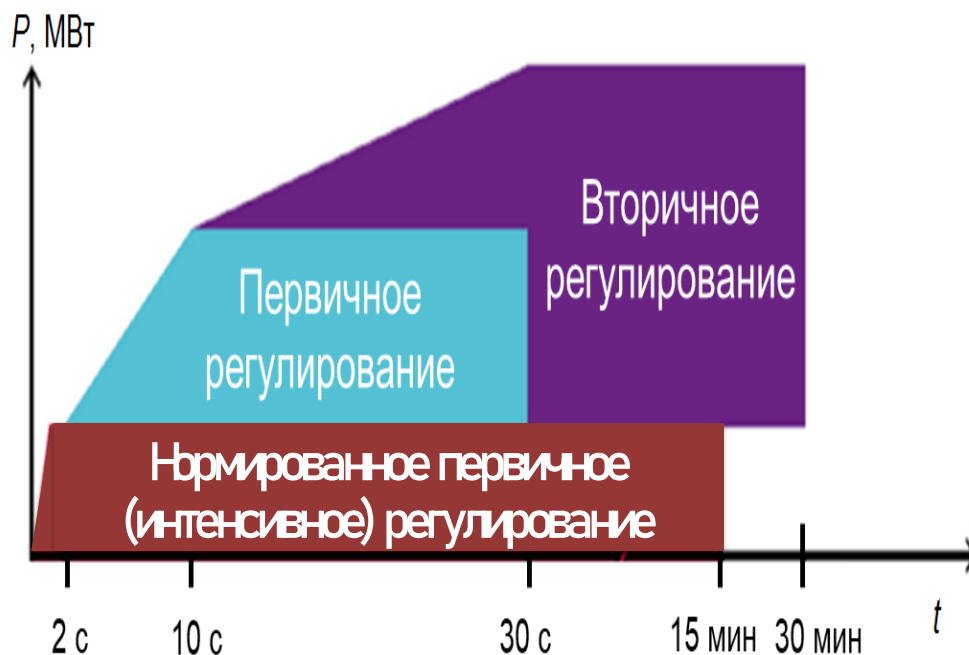
- Улучшение маневренных характеристик электростанций с целью расширения возможностей управления режимами энергосистем
- Увеличение горячего резерва мощности для покрытия пиковых нагрузок
- Частичное покрытие стохастичности выработки электроэнергии ВИЭ
- Выравнивание графика нагрузки, демпфирование колебаний мощности при резкопеременной нагрузке, предотвращение ЛЭП и СТ
- Снижение затрат на потребленную электроэнергию и мощность



Участие СНЭЭ в нормированном первичном (интенсивном) регулировании частоты

7

Требования к маневренности ГУ: уменьшение продолжительности пусковых операций; расширение регулировочного диапазона; повышение допустимой скорости изменения нагрузок в его пределах



! Ужесточение ТТ к маневренности ГУ не должно приводить к их повышенному износу и снижению надежности сроков службы элементов (углубленный анализа условий работы в пуско-остановочных режимах и под нагрузкой с оценкой напряжений, возникающих в критических элементах при теплосменах)

Примеры действующих НТД по СНЭЭ

8

Регулятор	Приказ	Разъяснение	Воздействие
FERC (Федеральная комиссия по регулированию энергетики)	Приказы №755 и №784	Устанавливает, что системный оператор производит оплату услуг по регулированию частоты на основе факта оказания такой услуги, в том числе оплату мощности, включая маргинальные издержки СНЭЭ, и оплату собственно услуги – величина которой зависит от точности и скорости предоставления требуемой мощности	Системы накопления электроэнергии оплачиваются больше, потому что они обеспечивают более быструю и более точную отработку задания системного оператора по сравнению с традиционными генераторами
FERC	Приказ №719	Устанавливает обязанность системных операторов и сетевых компаний принимать заявки от объектов « Управления спросом » для услуг по обеспечению системной надежности, на основе принципа сопоставления с другими объектами	Дает возможность коммерческим и промышленным потребителям чаще участвовать в программе «Управление спросом» , используя собственные СНЭЭ

Регулирование частоты СНЭЭ осуществляется в соответствии с заданным статизмом регулирования, с учетом высокого быстродействия (выдача полной заданной мощности за время менее 20 мс), что особенно важно для энергосистем и энергорайонов с малой инерцией

Применение СНЭЭ совместно с ВИЭ

Особенности	Примеры использования	Присоединение
<p>Компенсация изменений мощности СЭС (мощность до нескольких МВт; разряд от 1 с до 20 мин)</p>	<p>Сглаживание стохастической выработки электроэнергии СЭС, возникающей в энергосистеме (микросети) с большой долей СЭС</p>	<p>Сети среднего напряжения 6-35 кВ</p>
<p>Компенсация изменений мощности ВЭС (мощность 1-100 МВт; разряд от 2-15 минут)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Сглаживание стохастической выработки ВЭС для обеспечения требуемой скорости изменения мощности (МВт/мин) ➤ Покрытие нерегулярных колебаний нагрузки <ul style="list-style-type: none"> ➤ Поддержание напряжения в микросети <ul style="list-style-type: none"> ➤ Регулирования частоты ➤ Обеспечение устойчивости ВЭС при провалах напряжения в сети (LVRT) 	<p>Сети среднего (6-35 кВ) и высокого напряжения (110 кВ и выше)</p>
<p>Замещение нагрузки или объектов генерации (мощность от кВт до нескольких сотен МВт; разряд от 2 до 10 часов)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Накопление энергии в период провала электропотребления с целью выдачи мощности в часы утреннего или вечернего максимумов нагрузки ➤ Участие на рынках мощности в качестве диспетчируемой энергии и резерва ➤ Накопление электроэнергии для оказания услуг по обеспечению системной надежности 	<p>Сети среднего (6-35 кВ) и высокого напряжения (110 кВ и выше)</p>

Нормативно-технические документы по СНЭЭ в России

10

Обозначение	Наименование	Статус
ГОСТ Р 58092.1-2018	Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения	Действующий (с марта 2019 г.)
ГОСТ Р 58092.5.1-2018	Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Безопасность систем, работающих в составе сети. Общие требования	Действующий (с марта 2019 г.)
ГОСТ Р 58092.2.1-2020	Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Параметры установок и методы испытаний. Общее описание	Действующий (с ноября 2020 г.)
ГОСТ Р 58092.3.1-2020	Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования	Действующий (с ноября 2020 г.)

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНЭЭ

- выдача или потребление активной мощности
- выдача или потребление реактивной мощности
- компенсация несимметрии
- компенсация несинусоидальности

При управлении реактивной мощностью энергия СНЭЭ не используется (задействуется инверторный преобразователь и конденсатор в его составе)

Возможные варианты эффективного применения СНЭЭ (механизмы окупаемости) в России

№ п/п	Вид услуг СНЭЭ	Место размещения СНЭЭ			Бенефициар
		В сетях внутреннего электроснабжения конечных потребителей (за счетчиком)	Распределительные сети	Магистральные сети	
1.	Регулирование частоты – 1 место			Услуги недоступны	Услуги недоступны
2.	Резервный источник электроснабжения (РИСЭ) – 3 место				
3.	Увеличение доли генерации ВИЭ в балансе мощности – 4 место				
4.	Поддержание напряжения в узлах				
5.	Горячий (вращающийся) резерв				
6.	Ликвидация перегрузок ЛЭП и СТ				
7.	Договорная поставка электроэнергии	Услуги недоступны		Услуги недоступны	Генерирующие компании
8.	Обеспечение маневренных характеристик электростанций				
9.	Сдвиг вправо сроков строительства ЛЭП в магистральных сетях				
10.	Сдвиг вправо сроков строительства ЛЭП в распределительных сетях				
11.	Снижение затрат на электроэнергию и мощность – 2 место				
12.	Автономное электроснабжение				
13.	Ценовой арбитраж				
14.	Расширение области допустимых режимов ГУ объектов РГ				

В настоящее время отсутствуют законодательные ограничения на установку СНЭЭ «за счетчиком» для инвесторов/собственников СНЭЭ.

С учетом процедурной простоты установки СНЭЭ на стороне потребителя, имеются возможности для оказания максимального количества услуг

Наибольшим потенциалом при текущих ценах на СНЭЭ, обладает вариант снижения затрат на электроэнергию и мощность.

Данный способ эффективен для потребителей 3-6 ценовые категории с мощностью технологического присоединения более 670 кВт (промышленные предприятия, дата-центры, офисных зданий и др.)



Интеграция СНЭЭ небольшой мощности и энергоемкости в сети внутреннего электроснабжения конечных потребителей (за счетчиком) может стать значимым драйвером для развития отрасли СНЭЭ в России (промышленная эксплуатация)

Сопоставление технических характеристик СНЭЭ для применения у потребителей

12

Критерии выбора:

Время отклика СНЭЭ – миллисекунды, продолжительность накопления и выдачи мощности – 3-8 часов, количество циклов – больше 10 000, безопасность использования на стороне потребителя

Тип	Мощность, МВт	Время отклика	Время заряда и разряда	Количество циклов	КПД, %
Гравитационные	1 – 22500	Секунды, минуты	Часы, недели	Нет ограничения	70-85
Термические	5 –100	Минуты	Часы	> 4500	80-90
Химические	0,1 – 100	Секунды, минуты	Часы	20000	до 45
Электрохимические					
➤ литий-ионные	0,01 – 50	Миллисекунды	Минуты, часы, дни	1000-15000	95-98
➤ свинцово-кислотные	< 1	Миллисекунды	Секунды, минуты	> 10000	60-98
➤ проточные	0,01 – 100	Миллисекунды	Часы	> 10000	65-95
Сверхпроводниковые	< 5	Миллисекунды	Минуты, часы, дни	Нет ограничений	до 98
Механические	< 20	Миллисекунды	Секунды, минуты	> 100000	85-95

Для окупаемости СНЭЭ требуется высокая точность прогнозирования часа максимума региона (стоимость покупной мощности – 1 ч. в день в момент прохождения максимума региона), а также большую длительность разряда и выбор алгоритма управления СНЭЭ (стоимость сетевой мощности – от 3 до 8 ч. в день в зависимости от месяца в утренние и вечерние часы максимума СО)

Механизмы окупаемости СНЭЭ («за счетчиком» у потребителей)

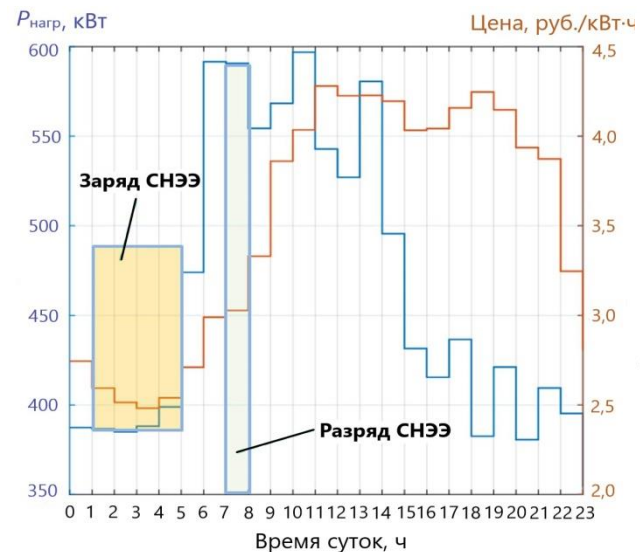


Рис. 1. График нагрузки предприятия и цена на электроэнергию

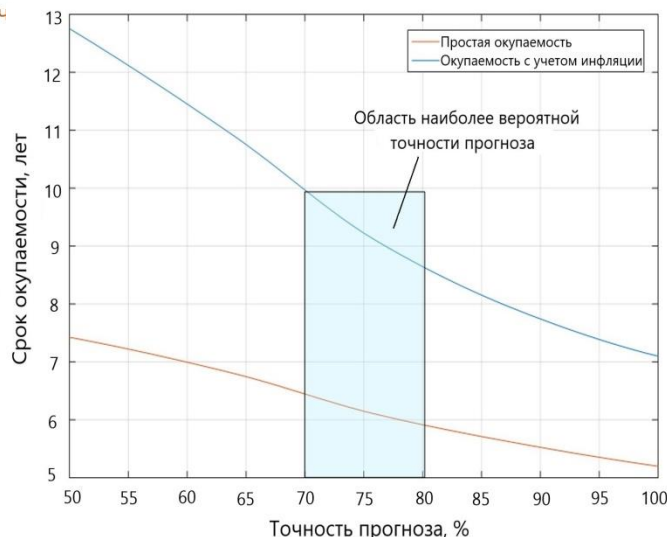


Рис. 2. Зависимость срока окупаемости СНЭЭ от точности прогноза часа максимума региона

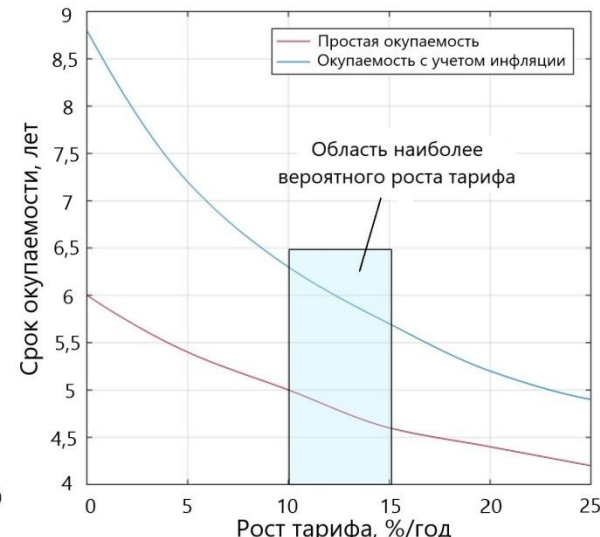


Рис. 3. Зависимость срока окупаемости СНЭЭ от величины роста тарифа на мощность

- заряд осуществляется с 01:00 до 05:00, а разряд с 06:59 до 08:01, когда фиксируется час максимума региона
- простой период окупаемости СНЭЭ составит 5,5 лет, а с учётом дисконтирования (инфляция 12,3% в год) и ежегодном росте стоимости обслуживания СНЭЭ на 1% – около 7,5 лет
- с учетом точности прогноза часа максимума региона в районе 70-80% срок окупаемости составит 8,5-10 лет

Чем выше тариф на покупную мощность в регионе, а также больше величина ежегодной индексации тарифов, тем меньше срок окупаемости СНЭЭ

Расширение области допустимых режимов ГУ (независимое управление по P/Q СНЭЭ)

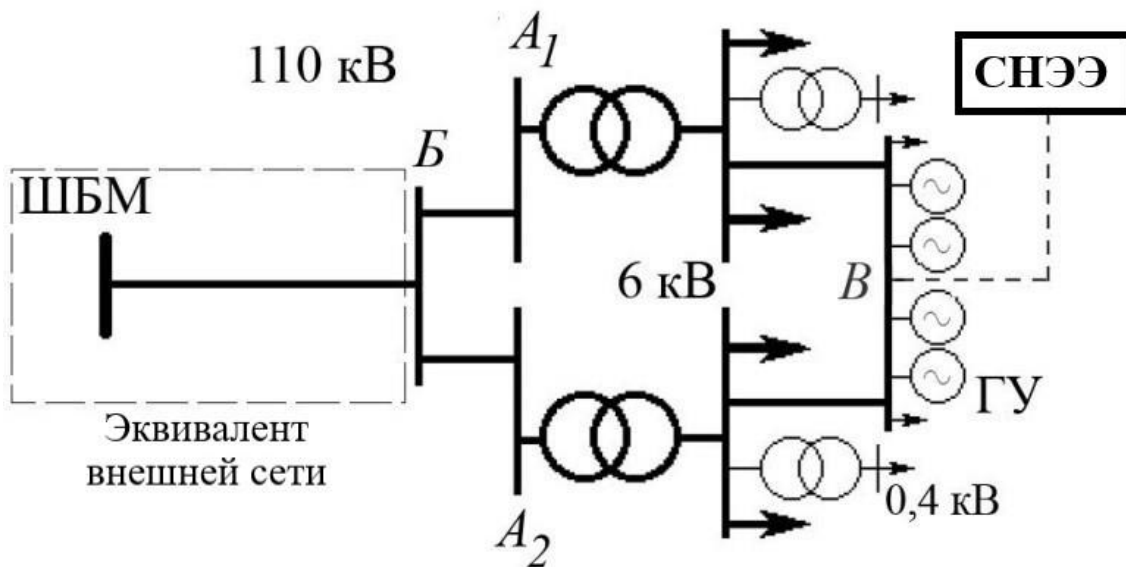


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема энергорайона с объектом РГ

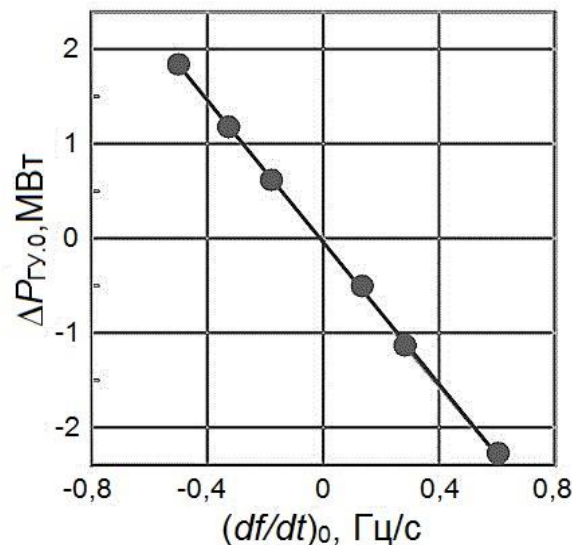


Рис. 2. График $\Delta P_{ГУ,0} = \varphi(df/dt)$ в энергорайоне с объектом РГ ($K_{df} \approx -3,74$ МВт·с / Гц)

В начале переходного процесса, при фиксации быстрого изменения генерации ($\Delta P_{ГУ}$), посредством реализации УВ_{СНЭЭ-Р} в размере $\Delta P_{СНЭЭ}$ с минимальным запаздыванием, а выбор $\Delta P_{НЭЭ}$ осуществлять пропорционально производной частоты

В переходном процессе через одинаковые промежутки времени T (в расчетах 300 мс) осуществлять контроль частоты и, если $f < f_1$, формировать УВ на увеличение $P_{НЭЭ}$ (снижение мощности ГУ и, следовательно, на повышение частоты) или, если $f > f_2$, то на уменьшение $P_{СНЭЭ}$

Оптимальные значения интервалов T и дозировок УВ по мощности НЭЭ ($+\Delta P_{СНЭЭ}$, $-\Delta P_{СНЭЭ}$) выбираются на основании результатов имитационного моделирования

Наброс нагрузки, вызванный одновременным пуском группы АД

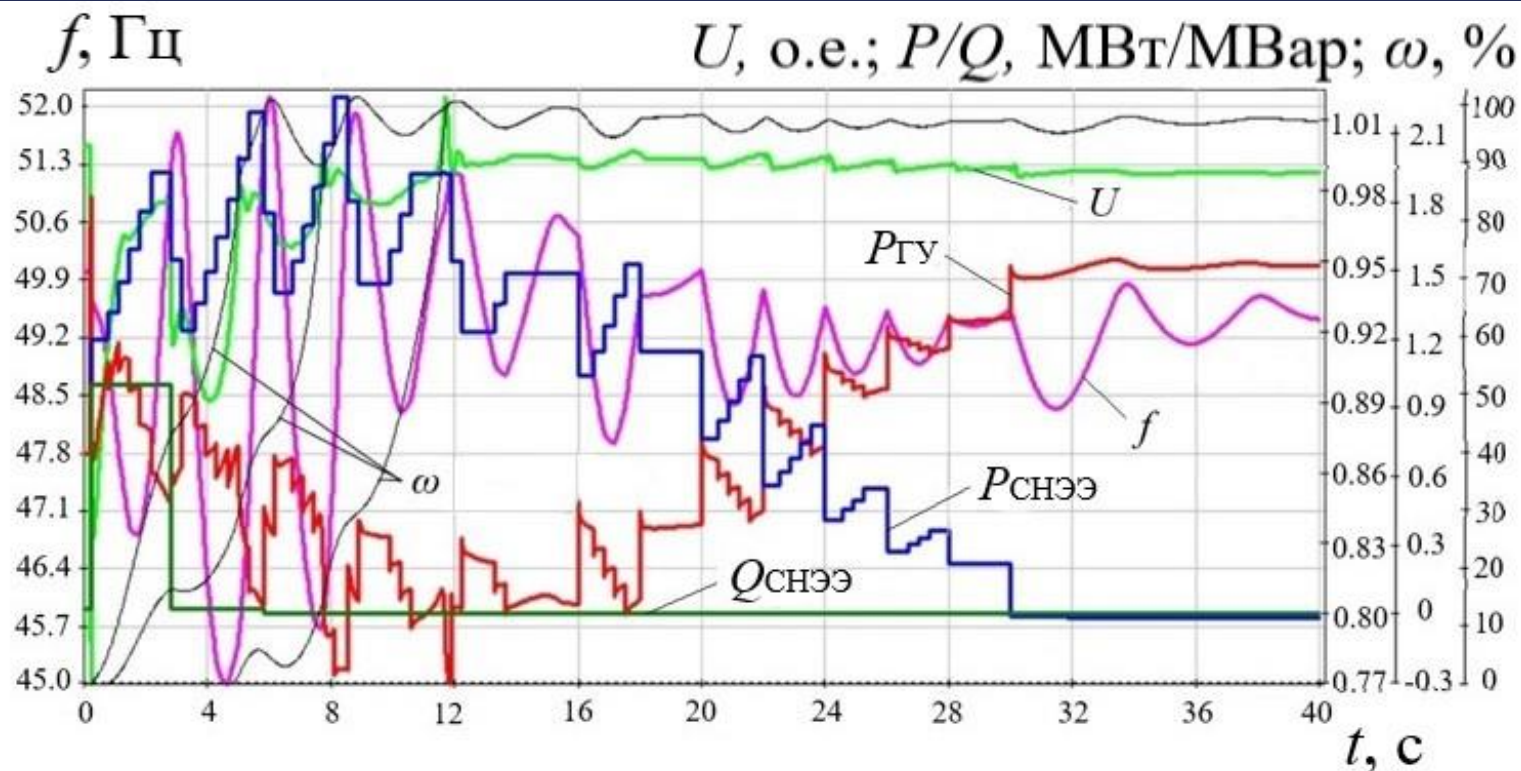


Рис. 1. Расчетное возмущение – пуск 3-х эквивалентных АД (исходная нагрузка ГУ перед набросом мощности – 30% от $P_{ном}$)

Суммарная номинальная мощность пускаемых АД составляет 37,5% от номинальной мощности ГУ, что значительно превышает возможности групповых пусков в островном режиме работы объекта РГ без использования дополнительных ГУ

Сброс 95% нагрузки при номинальной исходной нагрузке ГУ

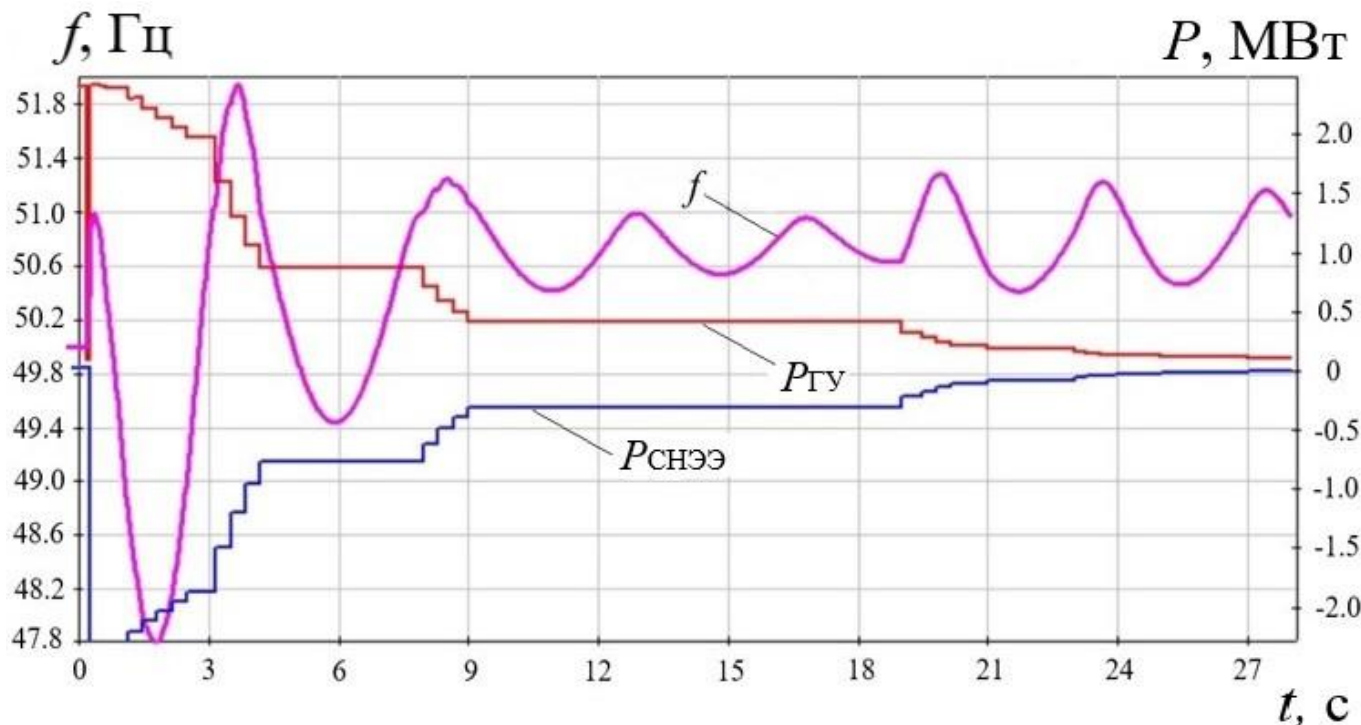


Рис. 1. В начале переходного процесса вводится УВ на СНЭЭ, реализуя потребление активной мощности равного величине сброса нагрузки: $\Delta P_{СНЭЭ} = -2,3$ МВт

Если большие сбросы мощности, при которых необходимо сохранять ГУ в работе, имеют значимую вероятность, то управление СНЭЭ в нормальных режимах должно обеспечивать поддержание такой величины накопленного заряда $\int P_{СНЭЭ} dt$, который позволял бы оперировать мощностями $\pm \Delta P_{ГУ.ном}$

Трехфазное КЗ в сети энергорайона с объектом РГ

17

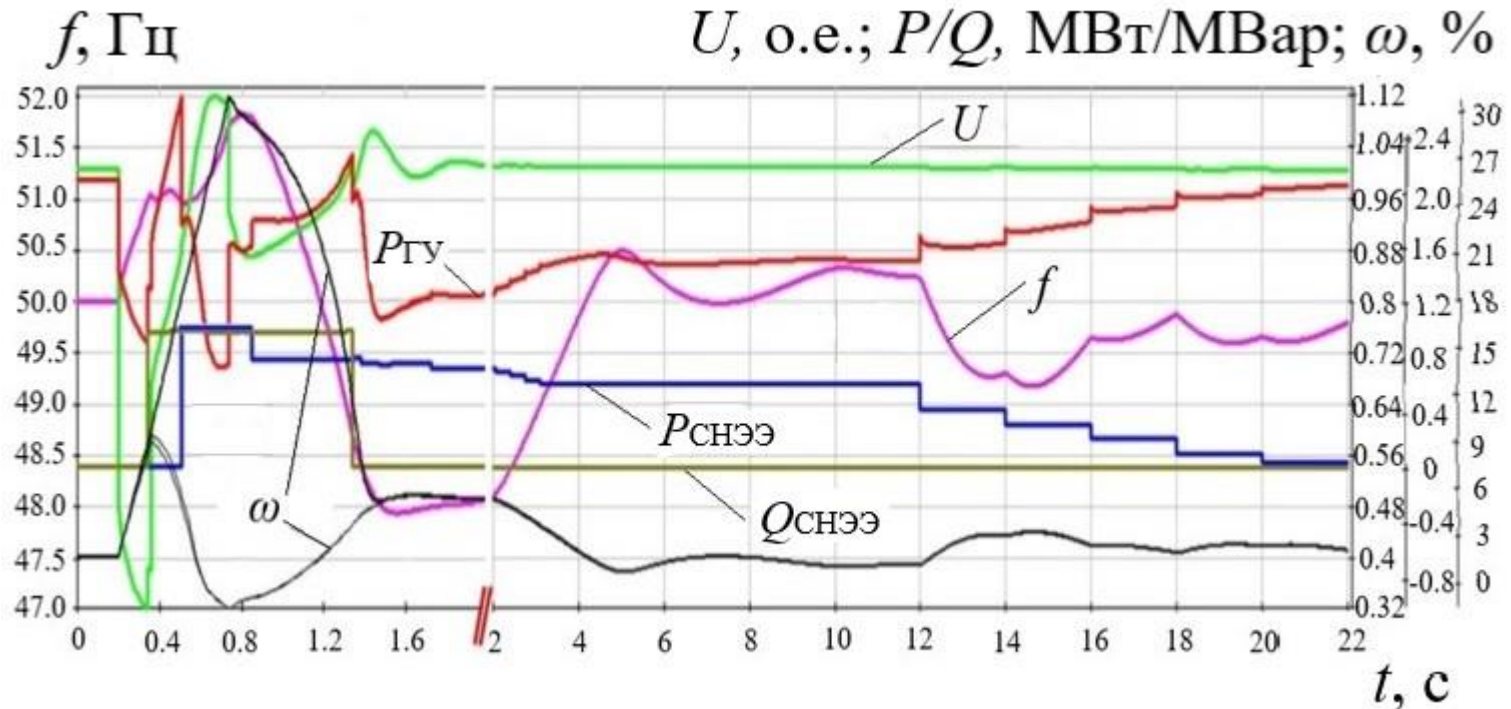


Рис. 1. ПС с нагрузкой равной 27% от $P_{ном}$ ГУ, в результате КЗ теряет питание, а его восстановление реализуется посредством устройства АВР через 0,38 с

- При разных продолжительностях КЗ и существенно разных параметрах электроприемников оптимальные параметры УВ на СНЭЭ будут различны
- Определение объемов УВ должен предшествовать анализ вероятностей КЗ и выбор обычных средств повышения динамической устойчивости нагрузки: сокращение длительности КЗ; применение автоматики восстановления нормальной работы электродвигателей и др.

Формирование технических требований к характеристикам СНЭЭ

18

Формирование технических требований к СНЭЭ должно осуществляться на основании результатов имитационного моделирования

Вариант возмущения	$U_{\text{ном}}$, кВ	I_{max} , А	P_{max} , МВт	Необходимый заряд, МВт·с
Пуск группы АД	6,3	220	+2,1	+25
Сброс 95% нагрузки	6,3	220	-2,4	-12
3-х фазное КЗ	6,3	130	+1,0	+10

Так как НЭЭ влияет на режим работы всего энергорайона, то экономически обоснована реализация локальных мероприятий:

- автоматическое ограничение суммарной мощности электродвигателей, одновременно участвующих в самозапуске
- применение автоматики повторных пусков электродвигателей и/или замена прямых пусков на пуски с применением частотно-регулируемого привода и др.

Проверки возможности излишних отключений ГУ устройствами РЗ должны выполняться для всех возможных возмущений, имеющих значимую вероятность, причем не только для худших случаев, но и для удаленных КЗ, НАПВ на линиях связи с энергосистемой и др.

Необходима проверка срабатывания устройств РЗ ГУ при несимметричных возмущениях и, соответственно, в условиях аварийной и послеаварийной несимметрии напряжений

Барьеры, препятствующие применению СНЭЭ в России

19

1

Отсутствие утвержденного перечня задач, подлежащих решению за счет применения СНЭЭ при перспективном развитии электроэнергетики России

2

Отсутствие утвержденных технических и функциональных требований к СНЭЭ при их работе в ЕЭС России, изолированных энергосистемах и др.

3

Отсутствие технического регламента по СНЭЭ и полного комплекта национальных стандартов по СНЭЭ в целом (имеется серия ГОСТ Р 58092)

4

Высокая стоимость СНЭЭ при относительно низкой стоимости электроэнергии (удельная стоимость сильно зависит от вида системы накопления, реализуемого СНЭЭ функционала и типа исполнения)

5

Ограниченный срок службы аккумуляторных батарей в составе СНЭЭ (скорость нарастания тока разряда, глубина разряда, допустимый ток заряда, календарный и циклический сроки службы и др.)

6

Отсутствие государственной программы поддержки проектов внедрения СНЭЭ, позволяющей совершить качественный скачок в формировании и развитии отрасли СНЭЭ (полный комплект отечественного оборудования; комплекс сертификационных испытаний и др.)

Мероприятия, содействующие использованию СНЭЭ

20

1

Разработка методических указаний и рекомендаций по проектированию, технико-экономическому обоснованию применения СНЭЭ и оценке эффективности внедрения

2

Разработка набора типовых технических решений (проектов) по применению СНЭЭ разной мощности в ЕЭС России и микросетях

3

Разработка технических требований к объемам приемочных и периодических испытаний СНЭЭ, а также утвержденных методик проведения испытаний

4

Организация повышения квалификации персонала проектных, монтажных, наладочных организаций и распределительных сетевых компаний особенностям внедрения и эксплуатации СНЭЭ

5

Требуется включение СНЭЭ в рынок системных услуг и создание рынка сетевых услуг для возврата инвестиций в строительство и эксплуатацию СНЭЭ (механизма подтверждения оказания услуг и их оплаты)

6

Требуется создание Центра компетенции по СНЭЭ для обеспечения сбора, анализа и обобщения опыта реализации пилотных проектов применения СНЭЭ в России, а также его учета в последующих проектах и принятия решений по актуальным проблемным вопросам

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

21

СНЭЭ широко применяются в мире для регулирования частоты в энергосистемах, смещении графика нагрузки, снижении платы за электроэнергию и мощность, в качестве РИСЭ, совместно с ВИЭ и др.

В России СНЭЭ применяются для обеспечения надежного электроснабжения потребителей и собственных нужд энергообъектов, поддержания ПКЭЭ, совместно с ДГУ и ВИЭ в составе гибридных энергетических комплексов

Экономически обоснованно применение СНЭЭ за счетчиком в сетях внутреннего электроснабжения потребителей для снижения затрат на электроэнергию и мощность (для потребителей мощностью более 670 кВт)

Эффективно использовать СНЭЭ для расширения области допустимых режимов ГУ в изолированных энергорайонах с целью предотвращения излишних отключений ГУ и надежного электроснабжения потребителей

Требуется определение перечня способов перспективного применения СНЭЭ (алгоритмы управления инверторов), создание рынка услуг для СНЭЭ, а также разработка механизма подтверждения оказания услуг и их оплаты

Требуется разработка НТД, содержащих технические требования к СНЭЭ, методики проведения всех видов испытаний, рекомендации по выбору СНЭЭ, проектированию и обоснованию эффективности применения

Необходимо создание Центра компетенции по СНЭЭ для решения проблемных вопросов интеграции и функционирования



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ !

Илюшин Павел Владимирович
ilyushin.pv@mail.ru