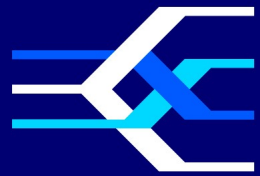


# Роль систем накопления электрической энергии в распределительных электрических сетях

Кононенко Владимир Юрьевич  
Россети Научно-технический центр (АО «ФИЦ»)

2023 / 5–6 июля



Москва / Конгресс-центр ЦМТ

VIII Международная  
научно-техническая конференция

«Развитие и повышение надежности  
распределительных электрических сетей»

ОРГАНИЗАТОРЫ



# СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (СНЭЭ) – ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ

## Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г.

Системы накопления электрической энергии относятся к технологиям, применение которых может повлечь за собой организационные и технологические изменения в управлении и функционировании электроэнергетических систем и способствовать переходу энергетики на новый технологический базис (так называемый «энергетический переход»).

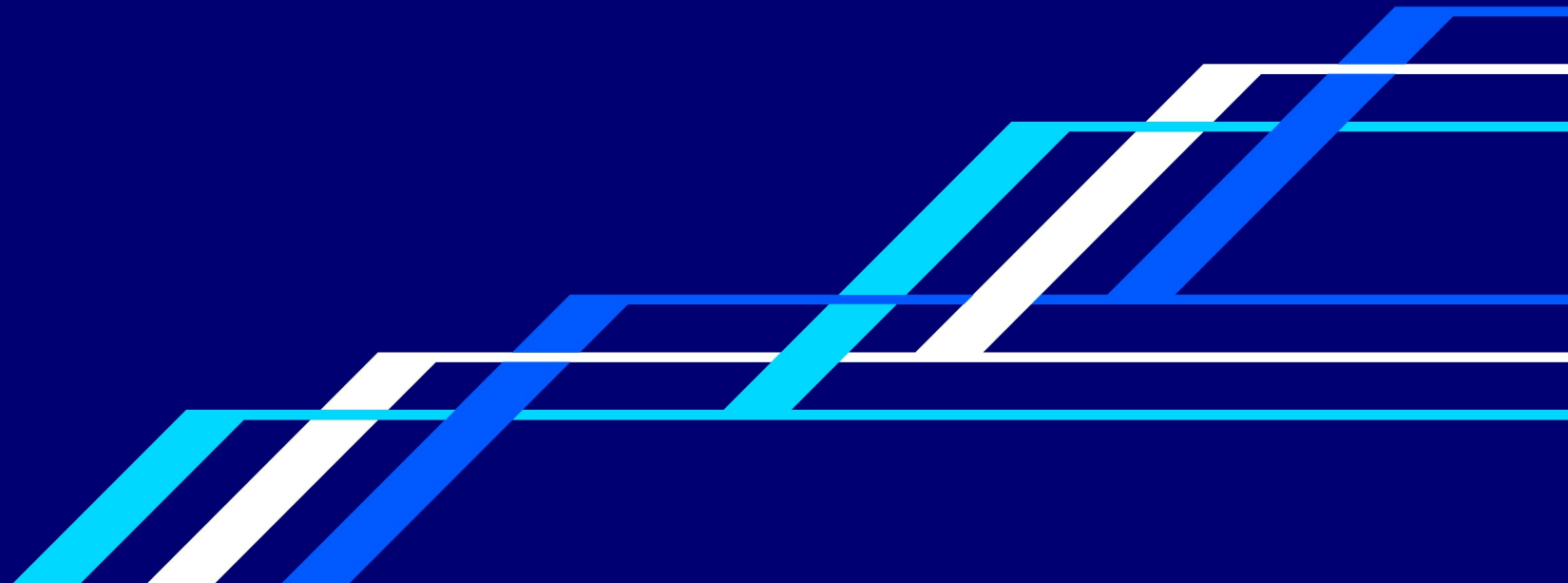
**«Дорожная карта» развития высокотехнологичного направления «Системы накопления электроэнергии»** утверждена решением межведомственной рабочей группы по развитию в Российской Федерации водородной энергетики (Протокол от 28.12.2022 г. № 3).

## Положением ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе»

СНЭЭ классифицируется как перспективная технология для применения в электросетевом комплексе и относится к следующим Технологическим приоритетам ПАО «Россети»:

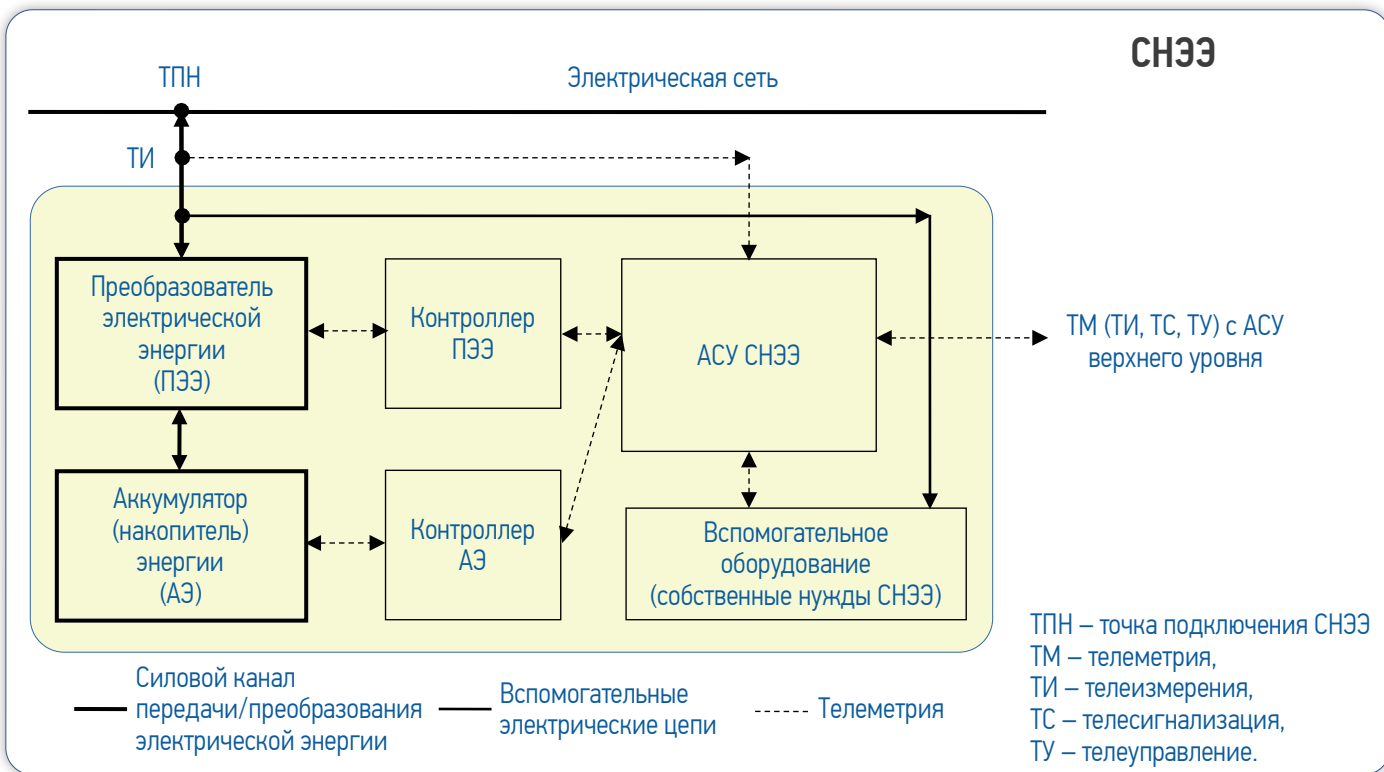
- применение «необслуживаемого», энергоэффективного оборудования,
- построение интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной сетью (Smart Grid),
- внедрение «цифровых» элементов электрической сети,
- применение «активных» элементов сети (FACTS, СНЭЭ и т. д.).

# 1. Система накопления электрической энергии



# СНЭЭ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**Система накопления электрической энергии (СНЭЭ)** — электроустановка, представляющая собой активно-адаптивное устройство, состоящее из основного и вспомогательного оборудования, комплекса компьютерных программ, которые совокупно обеспечивают выполнение технологического цикла СНЭЭ.



**Технологический цикл СНЭЭ** — рабочий цикл **прямого преобразования** электрической энергии из электрической сети в форму или вид, который может быть аккумулирован в накопителе энергии, **аккумулирование** преобразованной энергии и **хранение** аккумулированной энергии в накопителе энергии, последующие **выдача** сохранённой энергии из накопителя энергии, **обратное преобразование** энергии в электрическую энергию с её выдачей в электрическую сеть.

**Цикл заряда/разряда СНЭЭ** — технологический цикл СНЭЭ без этапа хранения аккумулированной энергии в накопителе энергии.

**Активно-адаптивное устройство** — электротехническое устройство, способное автоматически изменять режим своей работы и параметры по определённому закону.

**Основное оборудование СНЭЭ** — оборудование силового канала СНЭЭ, а также оборудование систем: автоматики и телемеханики (контроллеры, АСУ); кибер- и информационной безопасности.

**Силовой канал СНЭЭ** — электрическая цепь, физически реализующая технологический цикл СНЭЭ, в составе: преобразователь электрической энергии; аккумулятор (накопитель) энергии; устройства защиты и аварийной автоматики; а также коммутирующее оборудование, и управляемая единой АСУ СНЭЭ.

**Вспомогательное оборудование СНЭЭ** — инженерные системы собственных нужд СНЭЭ: телекоммуникации, связи, электроснабжения основного и вспомогательного оборудования СНЭЭ; заземления; молниезащиты; термостатирования (вентиляция, кондиционирование, обогрев); пожаротушения и пожарной сигнализации; видеонаблюдения; физической защиты; внутреннего, наружного и аварийного освещения.

# СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ √ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

## Технологии аккумулирования (накопления) энергии

ФОРМА ИЛИ ВИД АККУМУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ	НАИМЕНОВАНИЕ И ОБОЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ
Магнитная	Сверхпроводящий накопитель SMES
Тепловая Теплохимическая	Водород H <sub>2</sub>
	Расплавы солей MS
	Накопитель энергии на тепловой энергии STES
	Накопитель энергии на материалах с фазовым переходом PCM
	Термохимическая TCS
Механическая	Гидроаккумуляция PHS, PHES
	Пневмоаккумуляция CAES, ACAES, LAES
	Гравитационные накопители GS
	Кинетические накопители KES

ФОРМА ИЛИ ВИД АККУМУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ	НАИМЕНОВАНИЕ И ОБОЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ
Электрохимическая	Натриево-серные аккумуляторы SSB
	Свинцово-кислотные аккумуляторы LAB
	Натрий-хлорид-никеля аккумуляторы SNCB
	Литий ионные аккумуляторы (ЛИА) LIB: LFP, NMC, NCA, LMO, LTO, LCO
	Литий сера LSB
	Литий металл-полимерные аккумуляторы LMP
	Металл-воздушные аккумуляторы MAB
	Никель-кадмиевые батареи Ni-Cd
	Никель-магниевые батареи Ni-MH
	Натрий ионные аккумуляторы NaI
	Проточные накопители RZnFe, RV, RZnBr
	Суперконденсаторы SC

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ – ОСНОВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНЭЭ

## Режимы работы СНЭЭ в РЭС

(совокупность условий, определяющих состояние или работу СНЭЭ)

- Ведущий.
- Ведомый.
- Автономный.
- Ожидание.
- Гибернация.

## Функции СНЭЭ

(характеристика, определяющая назначение СНЭЭ в РЭС)

- Хранение энергии.
- Балансирование потоками энергии (мощности).
- Фильтрация и компенсация возмущений.
- Опорная – формирование опорной синусоиды напряжения.

ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА СНЭЭ	РЕЖИМЫ РАБОТЫ СНЭЭ				
	Ведущий	Ведомый	Автономный	Ожидание	Гибернация
Прямое преобразование	–	+	–	–	–
Аккумуляция	–	+	–	–	–
Хранение	–	+	+	+	+
Выдача	+	+	+	–	–
Обратное преобразование	+	+	+	–	–

# СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ √ ОБЪЕКТ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

## Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-Ф

### «Об электроэнергетике»

35-ФЗ закрепляет несколько терминов:

- Процесс производства электрической энергии,
- Производство электрической энергии,
- Производитель электрической энергии,
- Объекты электроэнергетики,
- Объект по производству электрической энергии,
- Генерирующее оборудование объекта по производству электрической энергии.

## Стадии технологического цикла СНЭЭ

- Преобразование электрической энергии из электрической сети в форму или вид, который может быть аккумулирован в накопителе энергии.
- Аккумуляция преобразованной энергии в накопителе энергии.
- Хранение аккумулированной энергии в накопителе энергии (при необходимости).
- Выдача аккумулированной/сохранённой энергии из накопителя энергии.
- Преобразование энергии, выданной из накопителя энергии, в электрическую энергию, которая далее выдаётся в электрическую сеть.

ПРОИЗВОДСТВО – процесс превращения вещества природы в блага, необходимые людям.

Васильев Д.А. Словарь экономических терминов. Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)

ПРОИЗВОДСТВО – производство материалов, процесс создания материальных благ, необходимых для существования и развития общества. Главный критерий материального производства – воздействие на вещество природы при помощи средств труда.

БСЭ (в 30 томах) Гл. ред. А.М. Прохоров. Изд. 3-е. М.: Советская энциклопедия, 1975 г. т.21. Проба-Ременсы. 1975 г. 640 с.

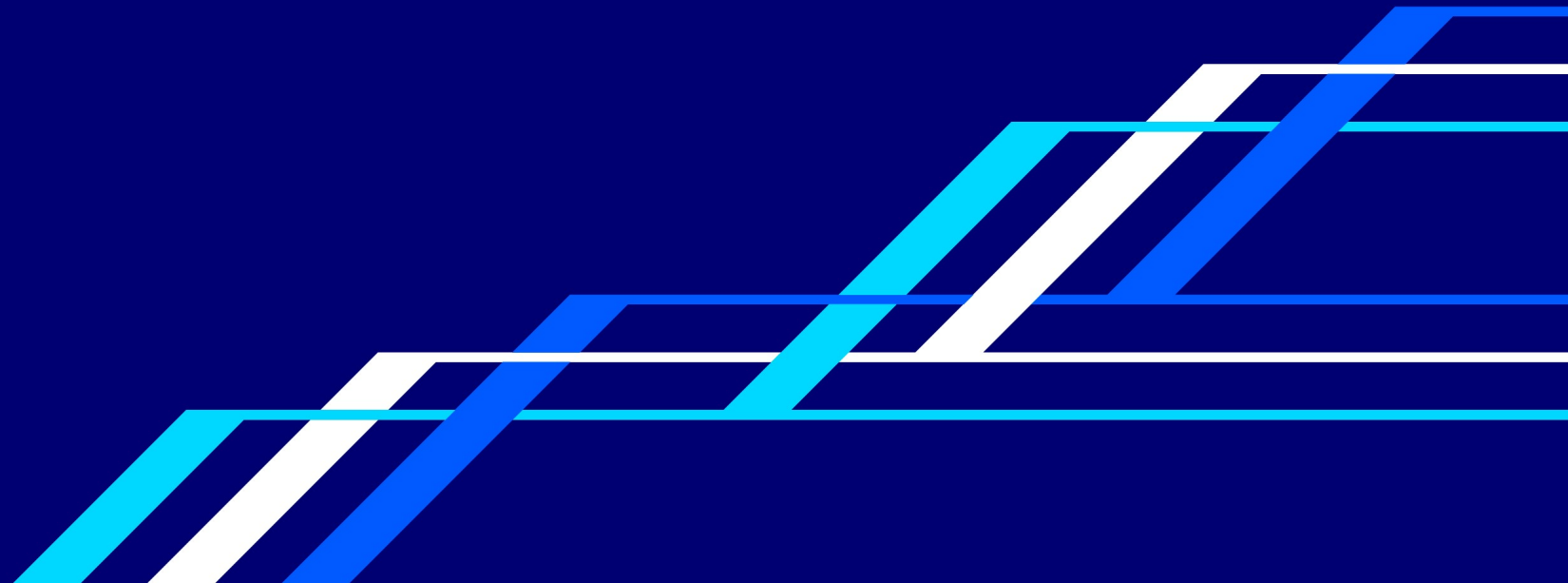
ПРОИЗВОДСТВО – процесс превращения сырья и материалов в готовые к потреблению изделия.

Новый англо-русский банковский и экономический словарь. 2006. Федоров Б.Г.

Таким образом, **ПРОИЗВОДСТВО** – это специфически человеческий тип обмена веществ между человеком и природой, или, более точно, – **процесс активного преобразования людьми природных ресурсов в какой-либо продукт**, в случае электроэнергетики, – в **электрическую энергию**.

Таким образом, **СНЭЭ – это самостоятельный объект электроэнергетики наравне с объектами, непосредственно используемыми в процессе производства, передачи электрической энергии, оперативно-диспетчерском управлении в электроэнергетике и сбыте электрической энергии, в том числе объекты электросетевого хозяйства.**

## 2. Опыт применения СНЭЭ в РЭС ПАО «Россети»





# ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СНЭЭ В ПАО «РОССЕТИ»

- 1) В настоящее время в Группе компаний «Россети» в «опытной» эксплуатации находится 35\* СНЭЭ (34 стационарные установки, 1 мобильная установка).
- 2) СНЭЭ, эксплуатируемые в Группе компаний «Россети», реализованы на основе литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) с NMC или LFP электрохимическими системами.
- 3) СНЭЭ установлены в распределительных электрических сетях 0,4 кВ.
- 4) Основные направления применения СНЭЭ:
  - компенсация «медленных» отклонений напряжения в сети от нормативного значения на 10 ÷ 20 % (повышение качества электрической энергии) (рисунок 1),
  - автономный и/или резервный источник электропитания (повышение надёжности электроснабжения) (рисунки 2 и 3).



Рисунок 1



Рисунок 2



Рисунок 3

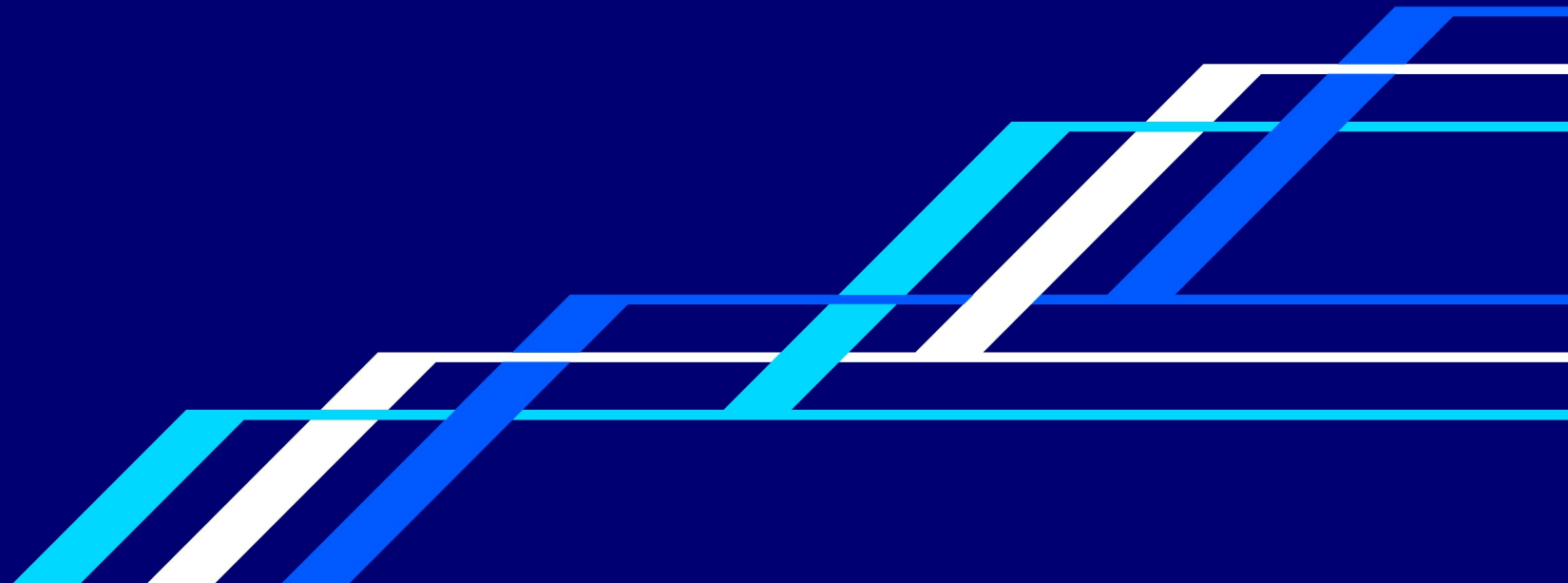
\* Здесь и далее не учитываются и не рассматриваются системы оперативного постоянного тока.

# НИР И ОКР ПО НАПРАВЛЕНИЮ СНЭЭ

В период с 2019 г. по 2025 г. в Группе компаний «Россети» выполняется комплекс НИР и ОКР с целью определения функциональных, технических и экономических требований к СНЭЭ, применяемым в РЭС.

- НИОКР «Разработка программного комплекса электросетевого контроллера для присоединения просьюмеров к распределительной электрической сети 0,4 кВ» (2021).
- НИОКР «Разработка блочно-модульной СНЭЭ со сменными батарейными блоками для автономного энергоснабжения удалённых потребителей малой мощности» (2022).
- НИР «Разработка стандарта организации «Системы накопления электрической энергии. Типовые технические требования» (2022).
- НИР «Разработка технико-экономического обоснования и методики оценки экономической эффективности применения систем накопления электрической энергии в электрических сетях» (2022).
- НИОКР «Разработка опытного образца электросетевого контроллера распределительной сети 0,4 кВ, насыщенной просьюмерами и объектами микрогенерации» (2023).
- НИОКР «Разработка АСУ многофункционального СНЭЭ для параллельной работы с распределительной электрической сетью 0,4 кВ на примере опытного образца системы накопления электрической энергии, в том числе разработка виртуальной модели СНЭЭ» (2023).

### **3. СНЭЭ в распределительных электрических сетях**



# НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭЭ В РЭС

## 1. Включение в рынок системных услуг

- сглаживание пиков мощности, выравнивание профиля нагрузки и оптимизация тарифов — балансирующие СНЭЭ,
- обеспечение нормативного качества электроснабжения потребителей, в том числе, удалённых потребителей со слабыми связями (компенсация «медленных» просадок напряжения) — компенсирующие СНЭЭ.

## 2. Автономное электроснабжение потребителей

- альтернатива строительству новых ЛЭП, реконструкции и модернизации действующих ЛЭП — СНЭЭ в составе комплексных (гибридных) источников электрической энергии (электростанций).

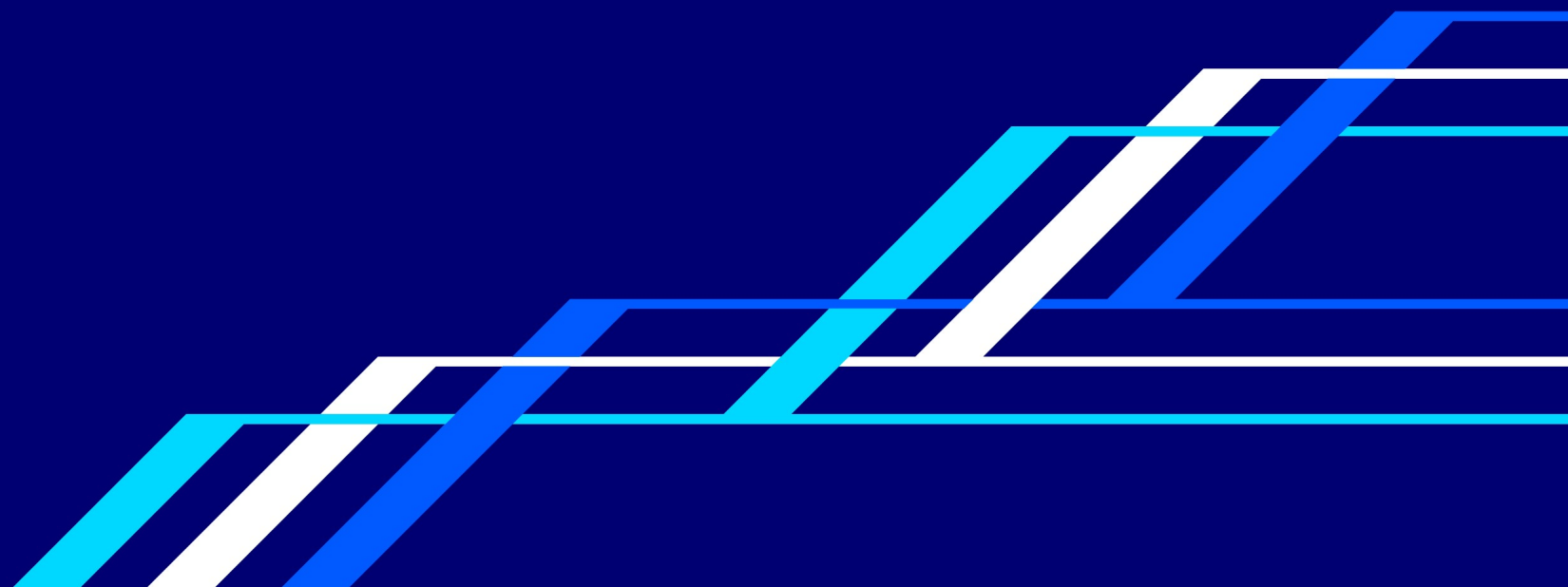
## 3. Источник второго питания для потребителей 1 и 2 категории

- резервный источник электроснабжения — СНЭЭ в роли ИБП, АБП.

4. Обеспечение стабильного функционирования распределительных электрических сетей среднего и низкого напряжения, насыщенных активно-адаптивными устройствами, распределённой генерацией, микрогенерацией, в качестве которых уже сегодня выступают ВИЭ (СФЭС, ВЭС), СНЭЭ, а в перспективе зарядная инфраструктура для электротранспорта (V1G, V2G и V2V), — сетеобразующие (опорные) СНЭЭ.

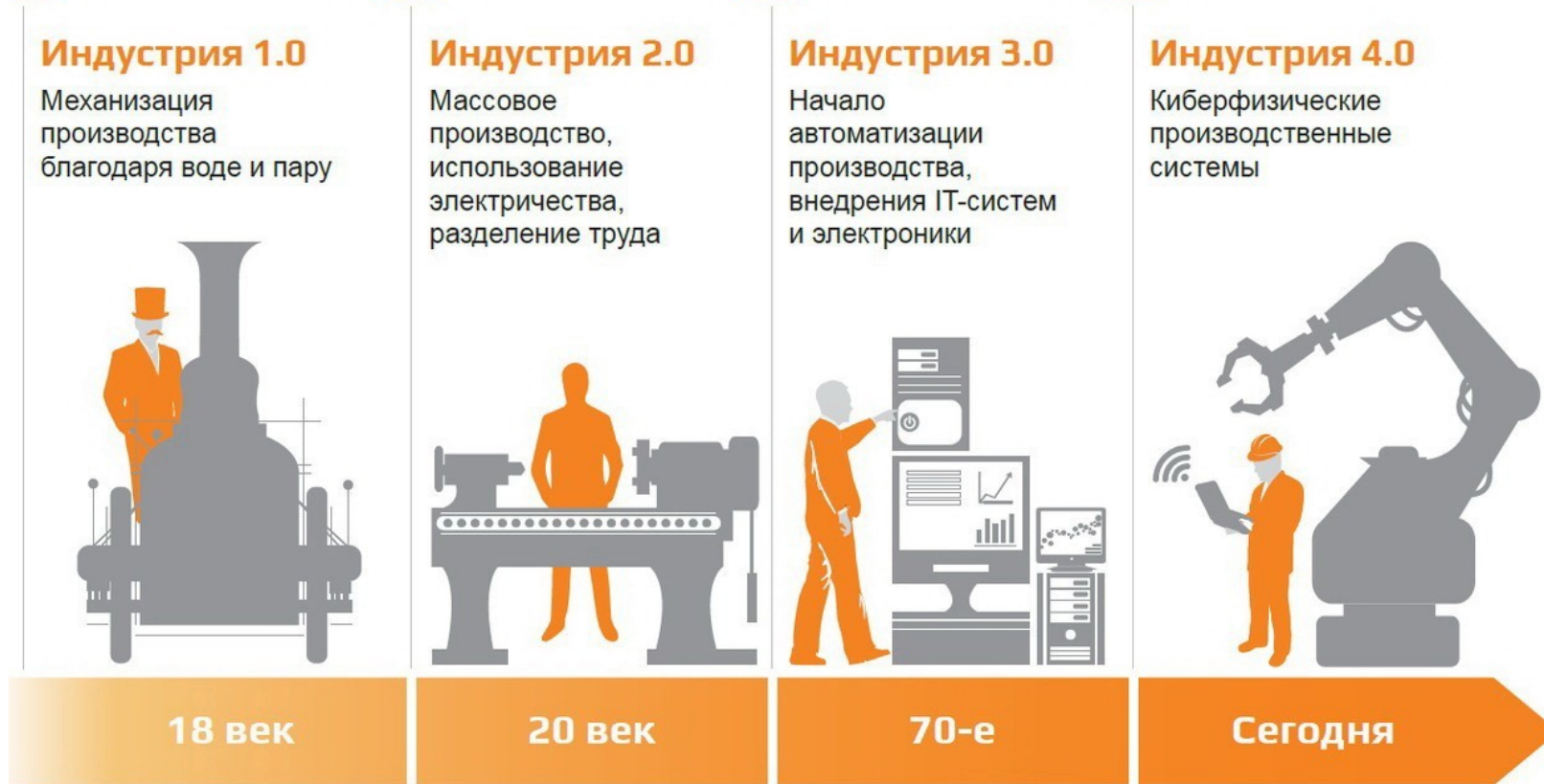
ТРЕБУЕТСЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЙ  
БАЗЫ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭЭ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

## 4. Опорная СНЭЭ



# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД – РОСТ АВТОМАТИЗАЦИИ РЭС

## Самонастройка, Самоорганизация, Самовосстановление



**30-е гг XX в**

Первая квантовая революция. Рождение квантовой физики.

**1947**

Первый транзистор. Рождение полупроводниковой электроники

**1953**

Первый транзисторный компьютер. Рождение микроэлектроники

**90-е гг XX в**

Создание БТИЗ (IGBT). Рождение полупроводниковой силовой электроники

**2000-е**

Развитие силовых полупроводниковых преобразователей электрической энергии

Важной тенденцией развития электроэнергетики, присущая энергетическому переходу, является интенсивно нарастающая автоматизация электрических сетей.

Драйверы развития распределительных электрических сетей (РЭС) — электроустановки с «инверторным подключением»:

- возобновляемые источники энергии (ВИЭ) (СФЭС, ВЭС и др.),
- распределённая и микрогенерация на основе ВИЭ,
- разные виды СНЭЭ,
- зарядная инфраструктура для электротранспорта (V2X, V2G, V2V).

К 2035 году совокупная установленная мощность вышеозначенных электроустановок (без учёта зарядной инфраструктуры для электротранспорта) может приблизиться к 15 ГВт (пессимистичная экспертная оценка).

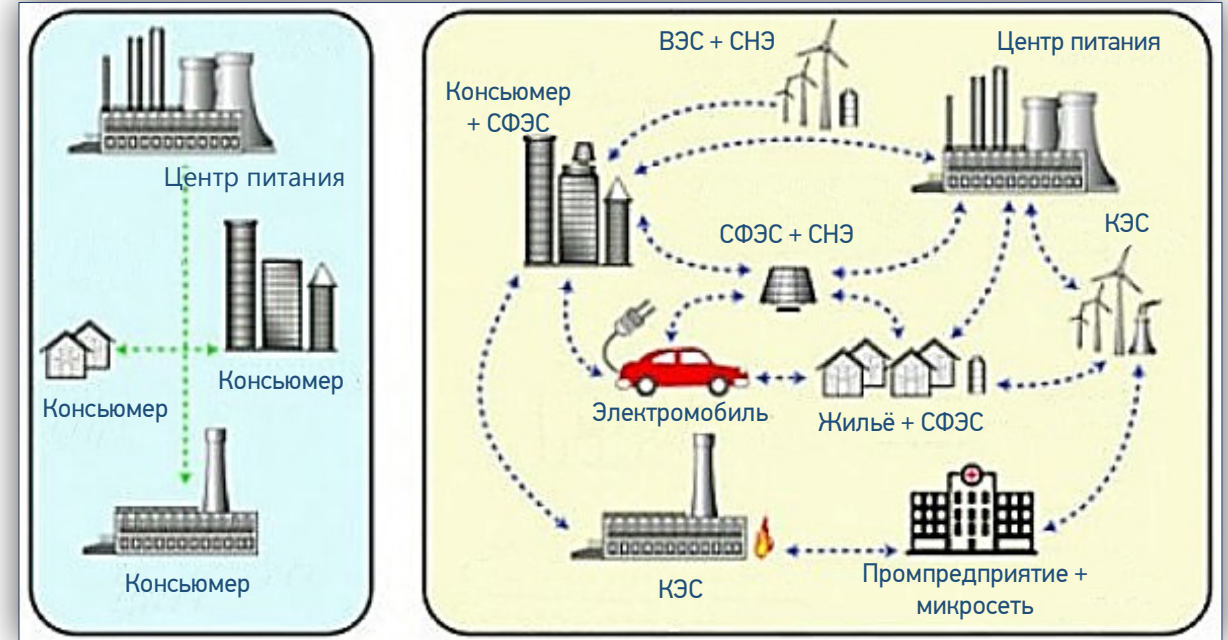
# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД – СНИЖЕНИЕ ИНЕРЦИИ РЭС

Наличие полупроводниковых преобразователей электрической энергии («инверторное» подключение) придаёт электроустановкам безынерционный характер работы (время смены режима работы может составлять менее 1,0 мс).

1. Электроустановки обладают высокой «гибкостью» (маневренностью), имеют возможность участвовать в обеспечении надёжности и устойчивости функционирования РЭС.

2. Кардинально изменяется характер работы РЭС с инерционного и однонаправленного — передача электрической энергии строго от генерирующего объекта к потребителю — на безынерционный и разнонаправленный.

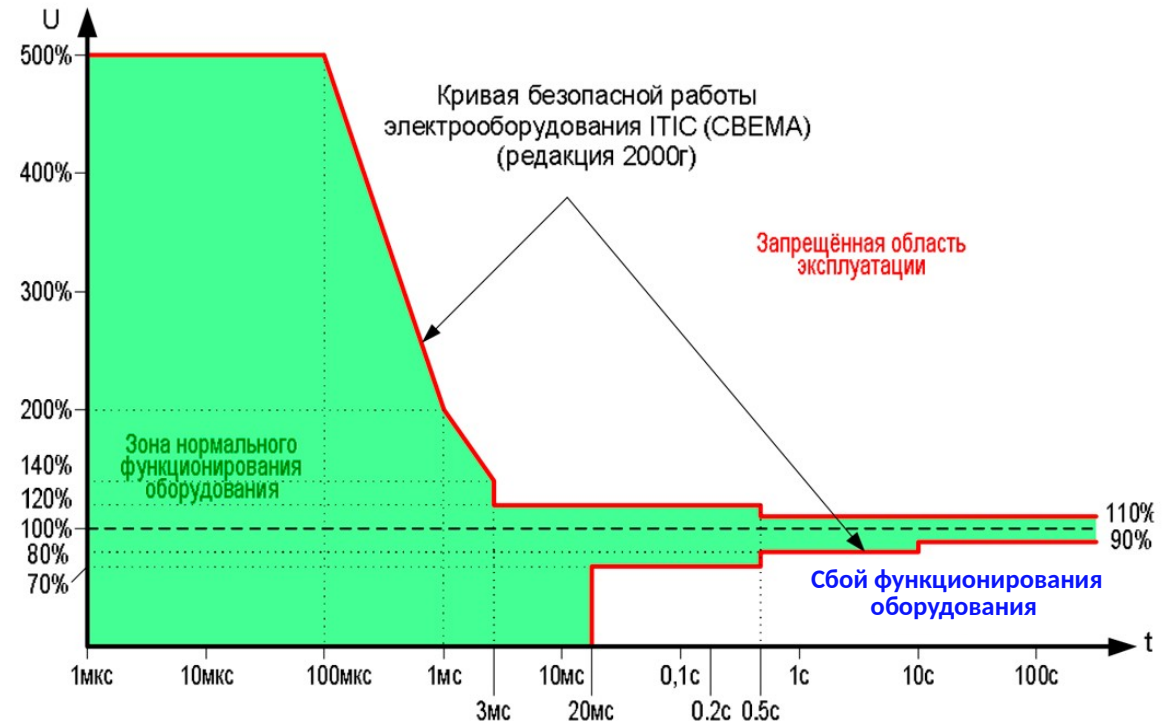
Меняется идеология и методология управления РЭС с простого наблюдения и контроля за режимами работы РЭС на активное управление РЭС.



# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД – НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Опыт показал, что «объекты генерации, работающие на ВИЭ, не способны обеспечить стабильную работу при ненормативных возмущениях в электрических сетях».

Действующие нормативные значения не отвечают требованиям технологического оборудования потребителей к параметрам качества электрической энергии.



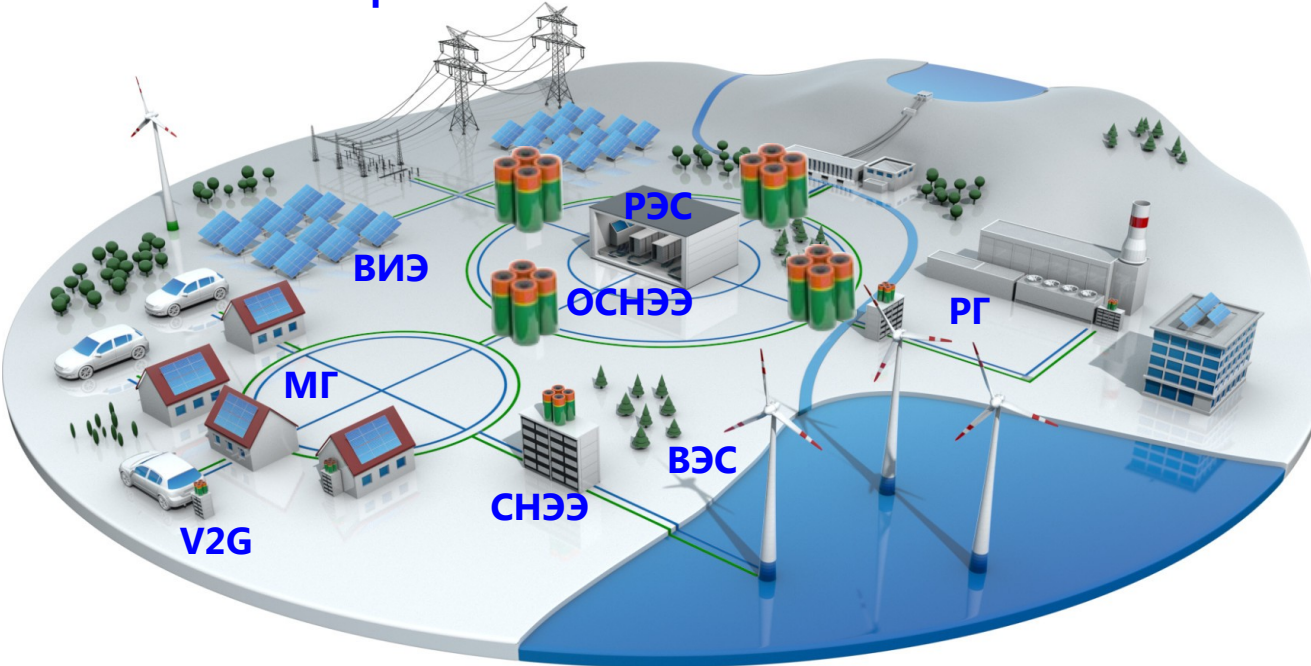
Кривые безопасной работы микропроцессорной техники и оборудования по версии ассоциации СВЕА (Computer and Business Equipment Manufacturers Association) — кривые ITIC (Information Technology Industry Council)



# ОПОРНАЯ СНЭЭ – ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РЭС

**Сетеобразующая (опорная) СНЭЭ** — вид многофункциональной СНЭЭ, обеспечивающая в точке своего подключения опорное напряжение, отвечающее нормативным параметрам качества, путём реализации основных функций СНЭЭ (балансирующей, фильтр-компенсирующей и опорной), а также путём управления параметрами активно-адаптивных устройств в распределительной электрической сети.

## Магистральные сети



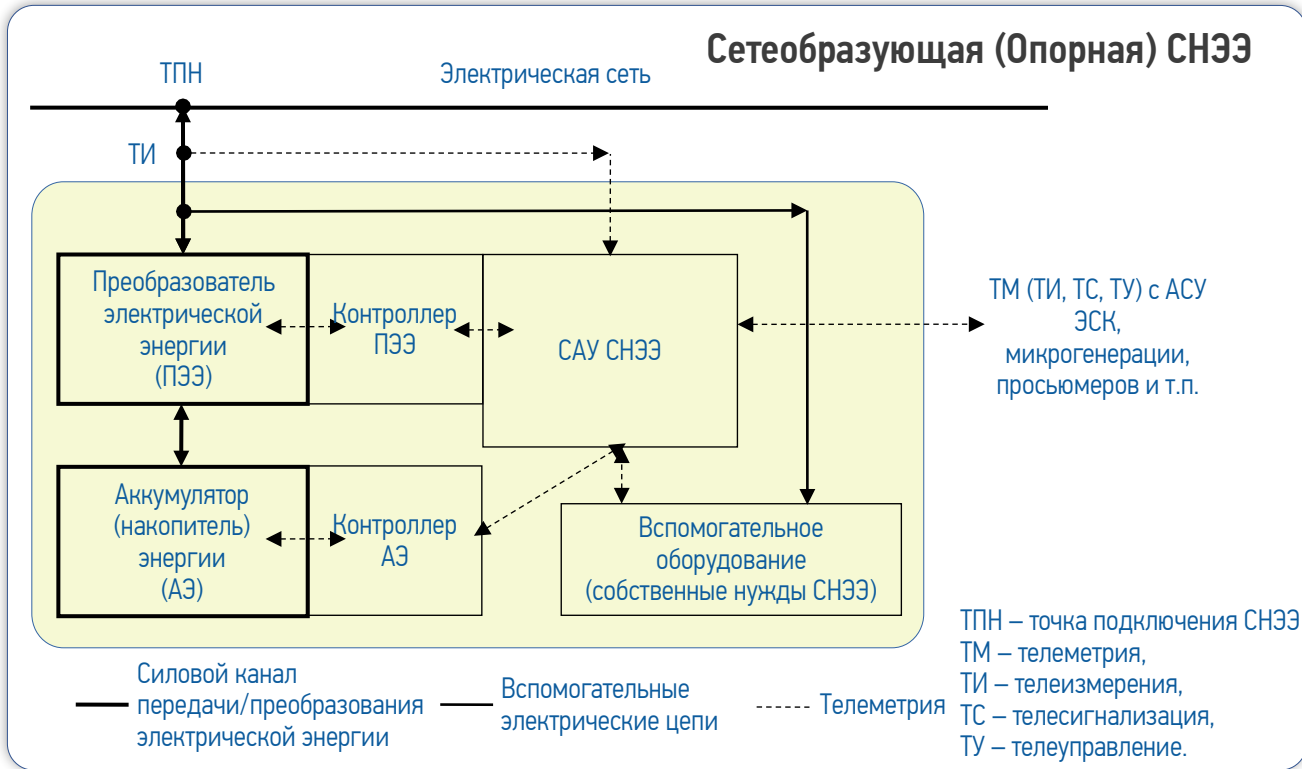
**Основное назначение сетеобразующих СНЭЭ** заключается в обеспечении синхронной динамической или статической устойчивости или **сохранении результирующей устойчивости функционирования** участка (района) **распределительной электрической сети**, насыщенного **активно-адаптивными устройствами**, в первую очередь, объектами, имеющими **инверторное подключение** к распределительной электрической сети: объекты микрогенерации, распределённой генерации, ВИЭ (СФЭС, ВЭС), зарядной инфраструктуры на основе технологии V2G, активные потребители и другие виды «просьюмеров».

**Сетеобразующая СНЭЭ** представляет собой **элемент** быстродействующего (режим реального времени), сетевцентрически и иерархически построенного **комплекса противоаварийной автоматики (ПАА)** предотвращения нарушения устойчивости и ликвидации возникающего асинхронного режима работы для распределительных электрических сетей (**аналог АПНУ и АЛАР для магистральных электрических сетей**).

Комплекс ПАА состоит из распределённых по узлам электрической сети НН и СН сетеобразующих СНЭЭ и ЭСК (при необходимости), связанных быстродействующими каналами обмена информации.

**Функционирование комплекса ПАА** для распределительной электрической сети происходит на основе результатов постоянных, проводимых циклически **в режиме реального времени** расчётов устойчивости. При этом для каждого вида возмущающих воздействий в распределительной электрической сети вырабатываются и немедленно реализуются необходимые управляющие воздействия на полупроводниковые преобразователи сетеобразующих СНЭЭ и/или активно-адаптивных устройств в электрической сети.

# ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОПОРНОЙ СНЭЭ



- 1) Установленная мощность  $50 \div 100$  % от величины потребляемой мощности участка РЭС.
- 2) Номинальная энергоёмкость должна обеспечивать 30 мин автономной работы.
- 3) Номинальная энергоёмкость с учётом сглаживания стохастической выработки ВИЭ должна обеспечивать порядка  $3 \div 4$  часов автономной работы.
- 4) Высокое быстродействие (время срабатывания СНЭЭ в диапазоне  $10^{-4} \div 10^{-3}$  с).
- 5) Бесступенчатое (плавное), безуставочное (без ограничений) изменение параметров во всём номинальном диапазоне.
- 6) Автоматическое переключение между режимами работы (функциональными возможностями) без токовой паузы.
- 7) Высокая добротность (минимальные потери электрической энергии на преобразование и собственные нужды).
- 8) Измерение параметров режимов работы распределительной сети в ТПН в режиме реального времени с высокими частотой дискретизацией по времени и квантованием по уровню, а также с широкой полосой пропускания.
- 9) Отечественное изделие (не менее 80 % компонентов СНЭЭ и 100 % активных компонентов СНЭЭ (САУ СНЭ, контроллеры, ПЭЭ, ПО, etc) – отечественные изделия).

# РЫНОК ОПОРНЫХ СНЭЭ В ПЕРСПЕКТИВЕ 2035 г

**ВИЭ**

**11,6 ГВт\***



**Стационарные СНЭЭ**

**1,5 – 3,0 ГВт\*\***



**Микрогенерация**

**0,5 – 1,5 ГВт\*\*\***



Оценка	Мощность, ГВт	Энергоёмкость, ГВт*ч	Энергоёмкость с учётом сглаживания стохастической выработки ВИЭ, ГВт*ч
Пессимистическая	6,8 – 13,6	3,3 – 6,8	20,4 – 40,8
Оптимистическая	8,0 – 16,1	4,0 – 8,0	24,0 – 48,3

\* Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики на период до 2035 года.

\*\* Прогноз на перспективу 2035 г. на основе данных «дорожной карты» развития высокотехнологичного направления «Системы накопления электроэнергии».

\*\*\* Прогноз на перспективу 2035 г. на основе фактической скорости прироста установленной мощности 50 – 60 МВт/год (данные 2020 г.) и ожидаемой на уровне 150 МВт/год.

**Спасибо за внимание!**

