



**ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ  
СУПЕРКОНДЕНСАТОРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ  
МОЩНОСТЬЮ 7 МВТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ  
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

Сергей Шавловский  
25.11.2025

# В 2024 ГОДУ ВВЕДЕНА В РАБОТУ СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛ. ЭНЕРГИИ (СНЭЭ)

## ПРЕДПОСЫЛКИ К УСТАНОВКЕ СНЭЭ



Высокая маржинальность установок и высокая стоимость простоя



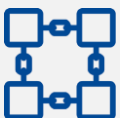
60% провалов напряжения происходит из-за возмущений во внешней сети



На ГПП, к шинам которой присоединена по проекту СНЭЭ, происходили инциденты в среднем 2 раза в год



Системы БАВР не эффективны при потере напряжения по 2 вводам или если они электрически близки

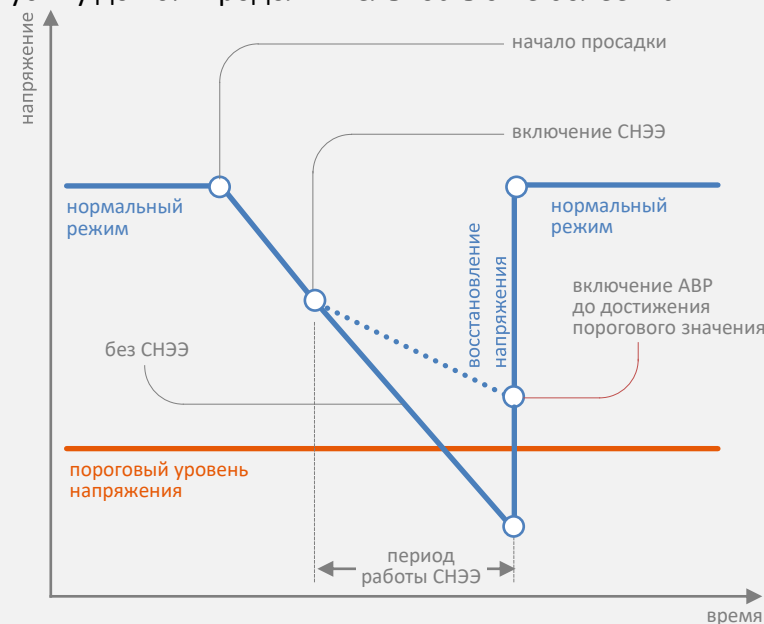
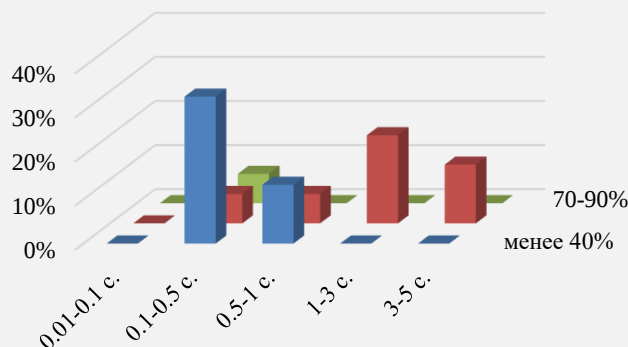


Ремонт, реконструкция, цифровизация собственного оборудования не снижают отказы по причинам внешней сети

## АНАЛИЗ ПРОВАЛОВ НАПЯЖЕНИЯ

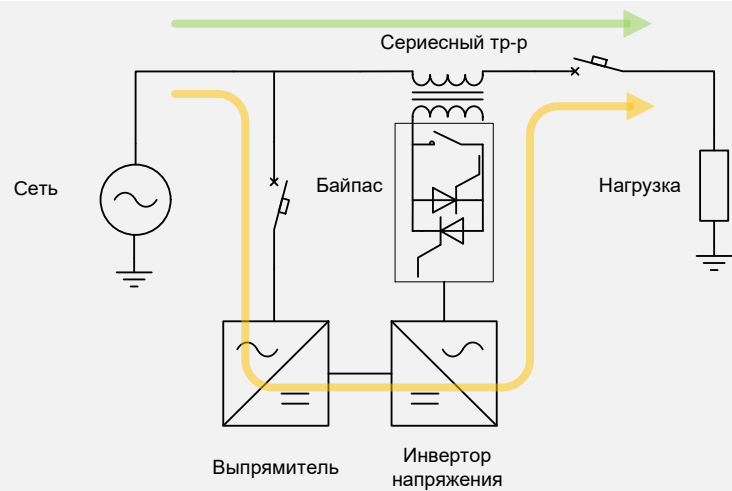
Повышение надежности энергоснабжения технологических установок через предотвращение критического провала напряжения за счет мгновенной кратковременной выдачи электрической энергии в сеть

- 40 % всех событий составляют провалы глубиной до 40% от номинального напряжения и длительностью 0,1-0.5 секунд
- 25% событий имеет глубину от 40 до 70% и длительность от 1 до 5 секунд.
- Остальные 20% событий приходятся на глубину до 70% продолжительностью не более 1 с.

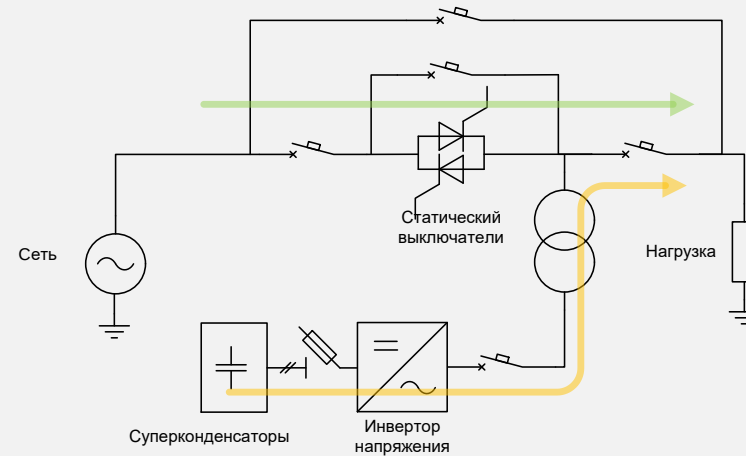


# ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

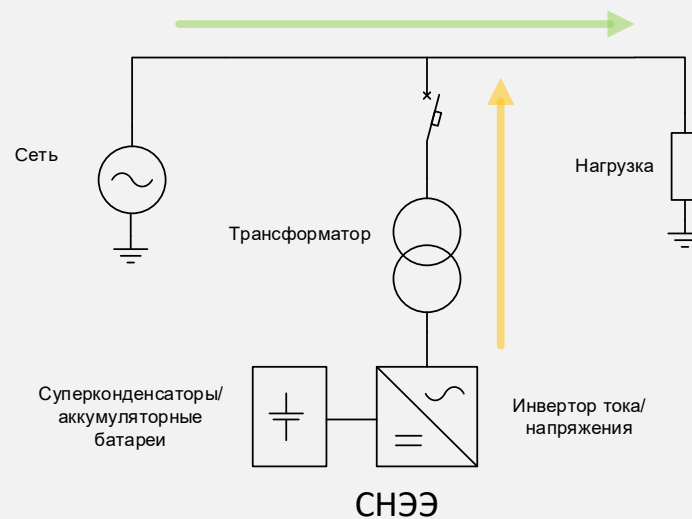
## ВАРИАНТЫ ОБОРУДОВАНИЯ



ДКИН последовательного включения

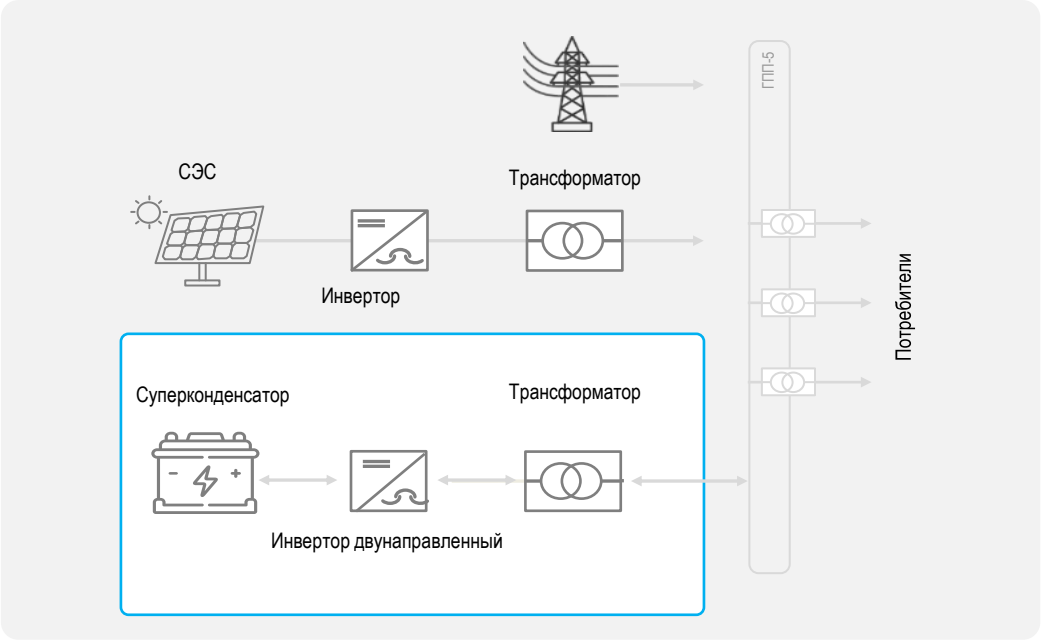


ДКИН последовательного включения



# ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

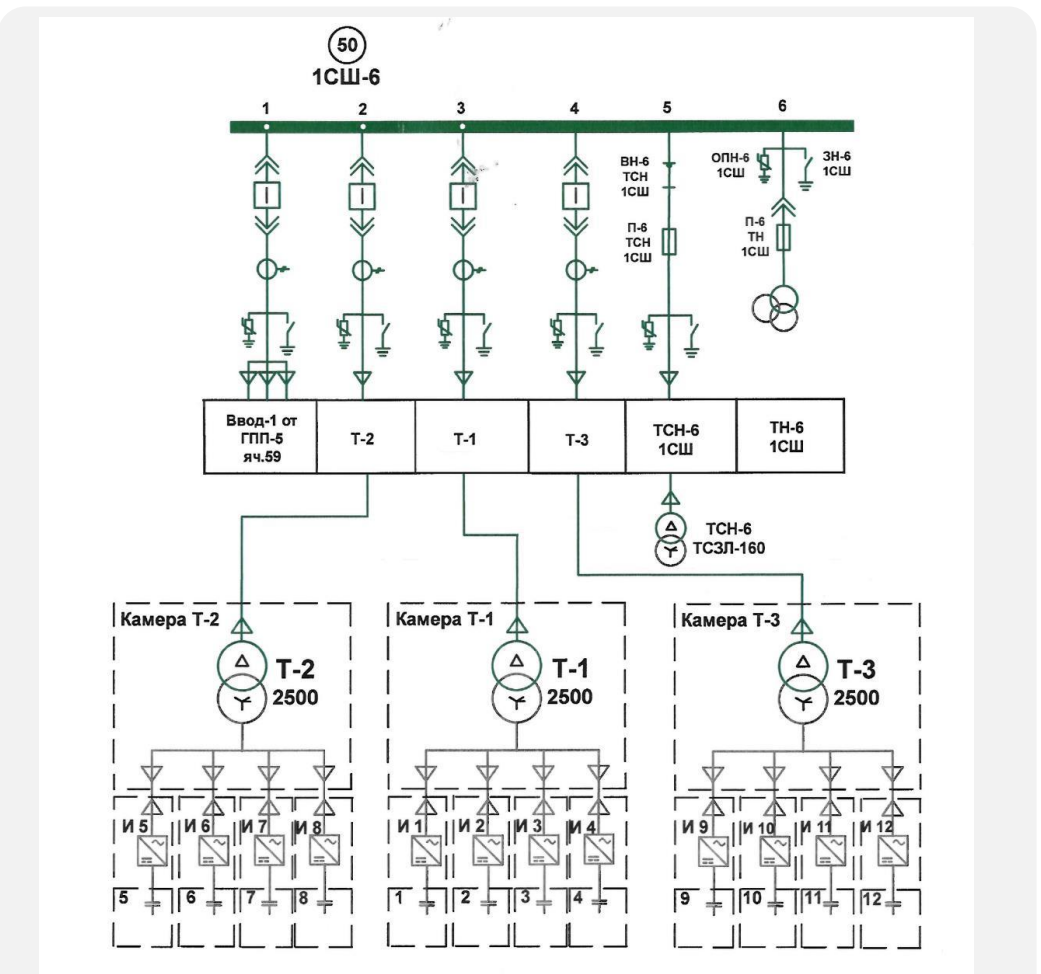
## СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ



## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

|                                           |                       |                      |
|-------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>7,5 МВ*А</b>                           | <b>0,1 сек</b>        | <b>2,3 сек</b>       |
| Установленная мощность суперконденсаторов | Время отклика системы | Длительность разряда |

## ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА



12 шкафов суперконденсаторов из 6 модулей по 48 элементов  
12 шкафов двунаправленных инверторов

## СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СНЭЭ

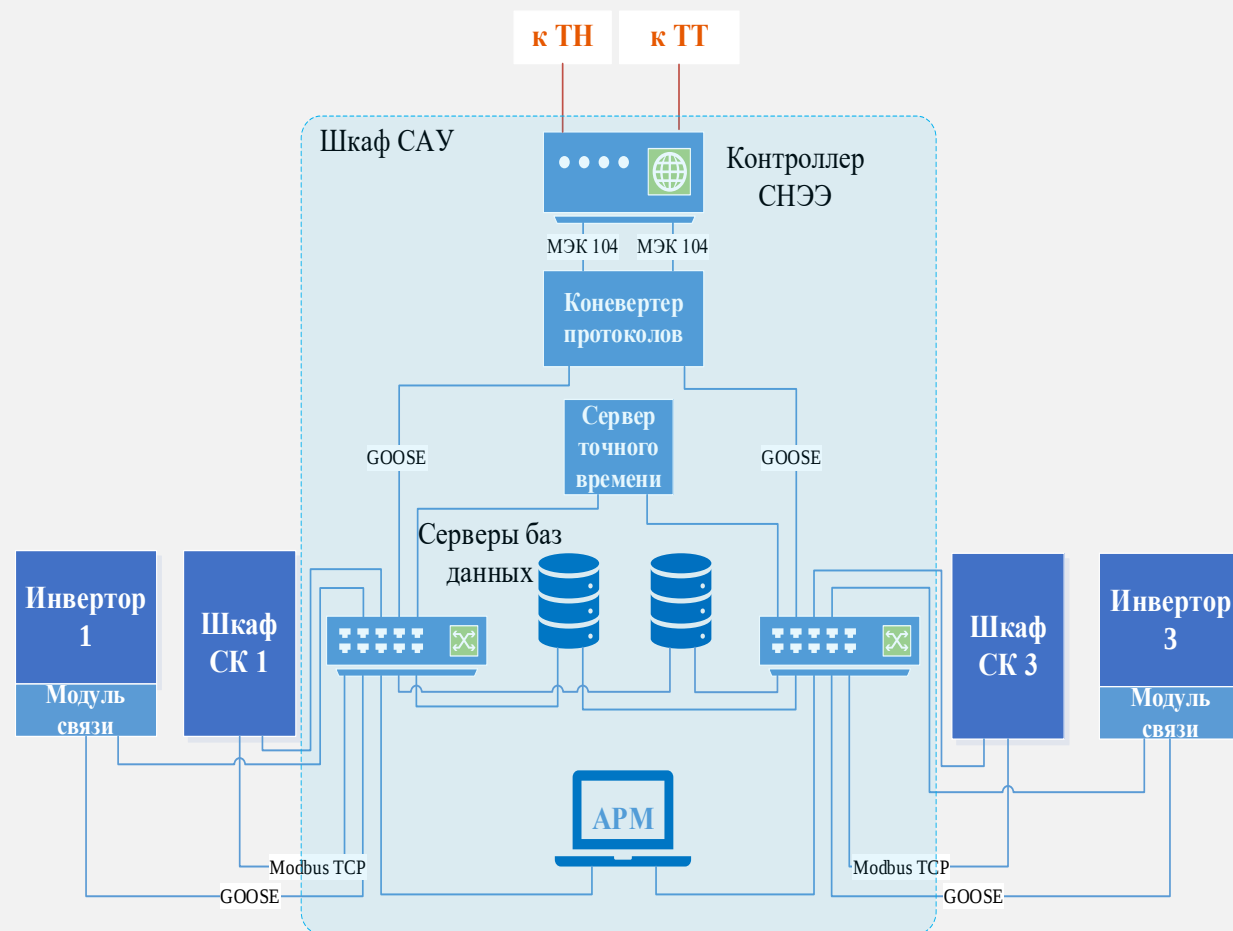
## COCTAB

- Контроллер СНЭЭ
- Преобразователь протоколов данных
- Коммутаторы
- Серверы базы данных
- Сервер точного времени
- АРМ
- Модуль связи (коммутатор) в инверторе

## ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА

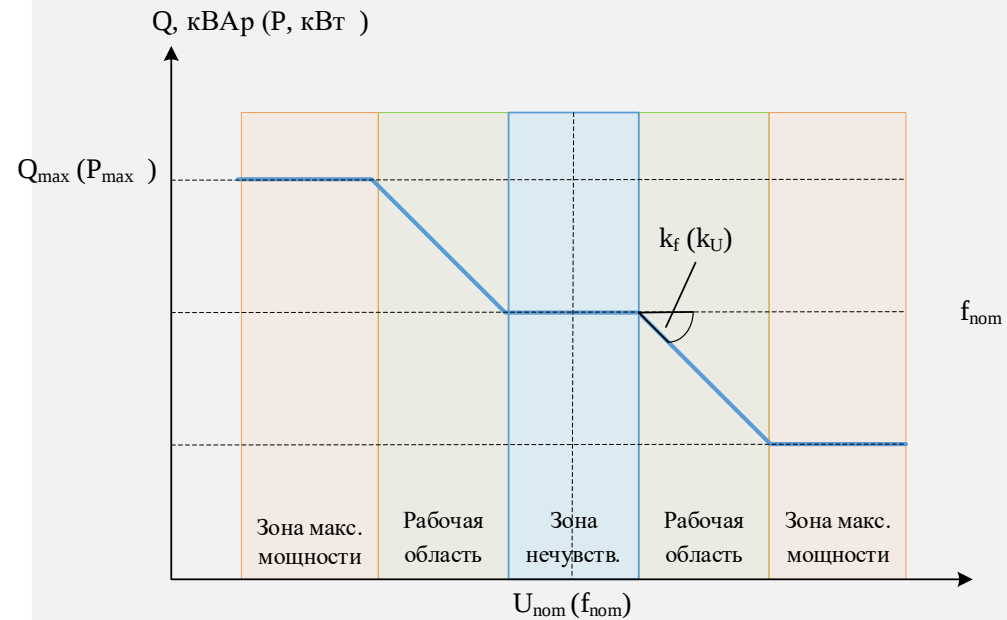
- Исходное быстродействие – 1200 мс
- Использование преобразований протоколов передачи данных
- Неоптимальные настройки регуляторов тока

## ЛОКАЛЬНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ



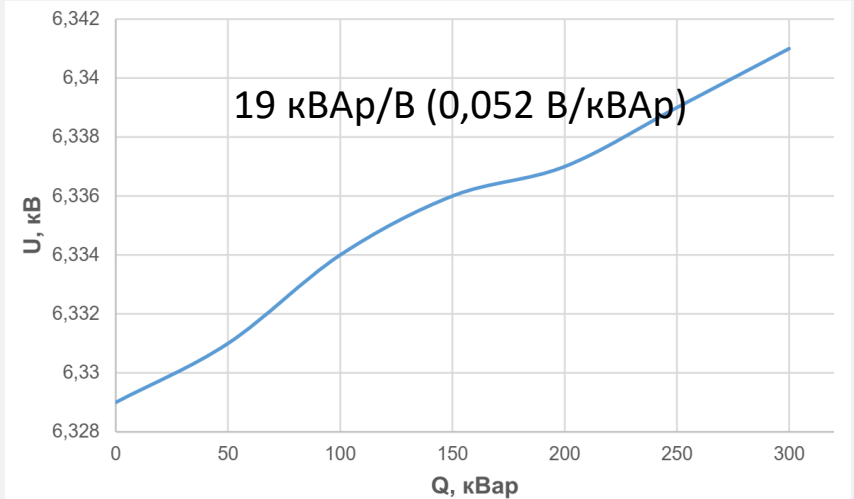
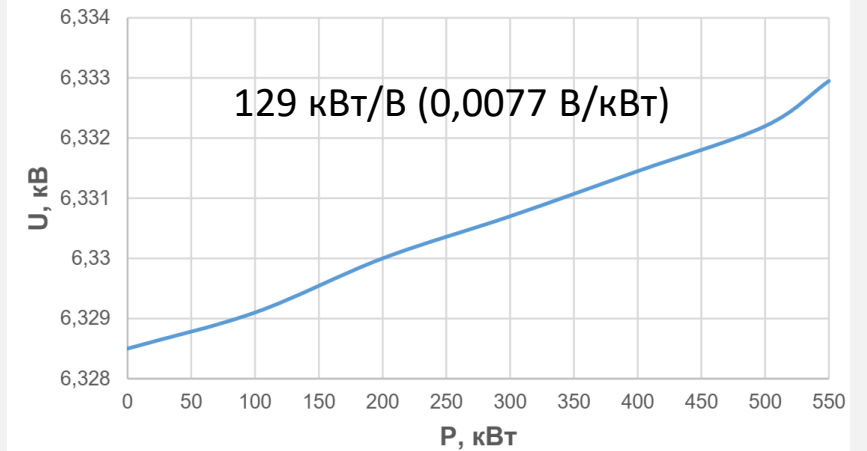
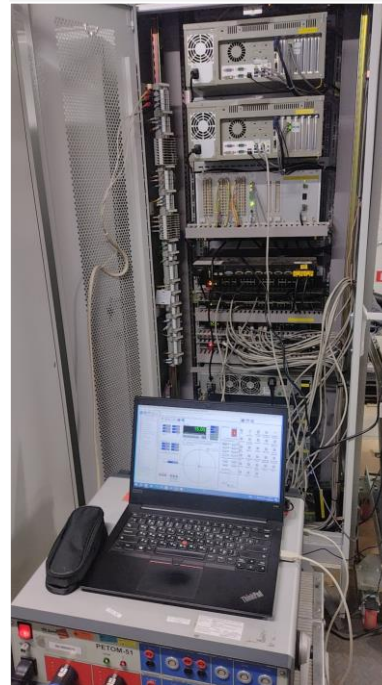
# ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ

## СОСТАВ



- Пропорциональное регулирование
- Наличие зоны нечувствительности
- Раздельное регулирование  $U(Q)$  и  $f(P)$

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ



# ПРОБЛЕМАТИКА

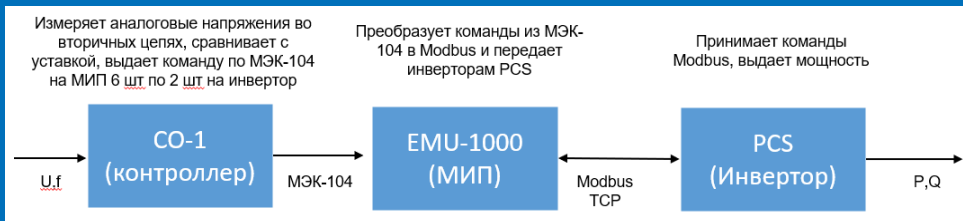
БАЗОВЫЙ (ЗАВОДСКОЙ, ИСХОДНЫЙ) АЛГОРИТМ РАБОТЫ СНЭЭ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НЕ СООТВЕТСТВОВАЛ ПОСТАВЛЕННЫМ ЗАДАЧАМ

1. СНЭЭ выдавала активную мощность при уменьшении частоты сети и реактивную - при уменьшении напряжения

$$f \downarrow \rightarrow P \quad \text{или} \quad U \downarrow \rightarrow Q$$

2. СНЭЭ инжектировала электрическую мощность ступенчато для контроля реакции сети.

3. «Медленные» протоколы передачи данных между элементами СНЭЭ



4. Отсутствие гистерезиса на отключение инжекции

5. Отключение инжекции мощности в сеть при уменьшении напряжения ниже 340 В согласно базовой LVRT-характеристике

Работа по оптимизации

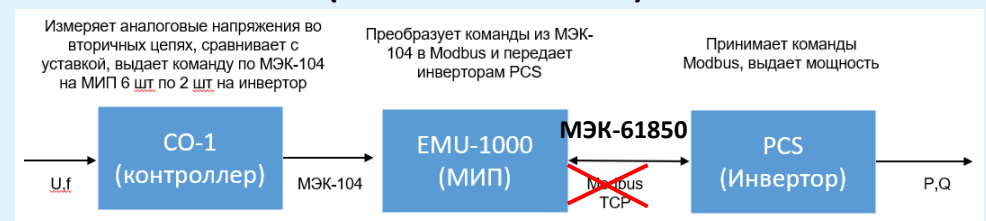


1. Изменения алгоритма в пользу гибридной инжекции мощности

$$U \downarrow \rightarrow (P + Q)$$

2. Инжектирование мощности одновременно всеми инверторами

3. «Быстрые» протоколы передачи данных между элементами СНЭЭ (МЭК 61850 GOOSE)



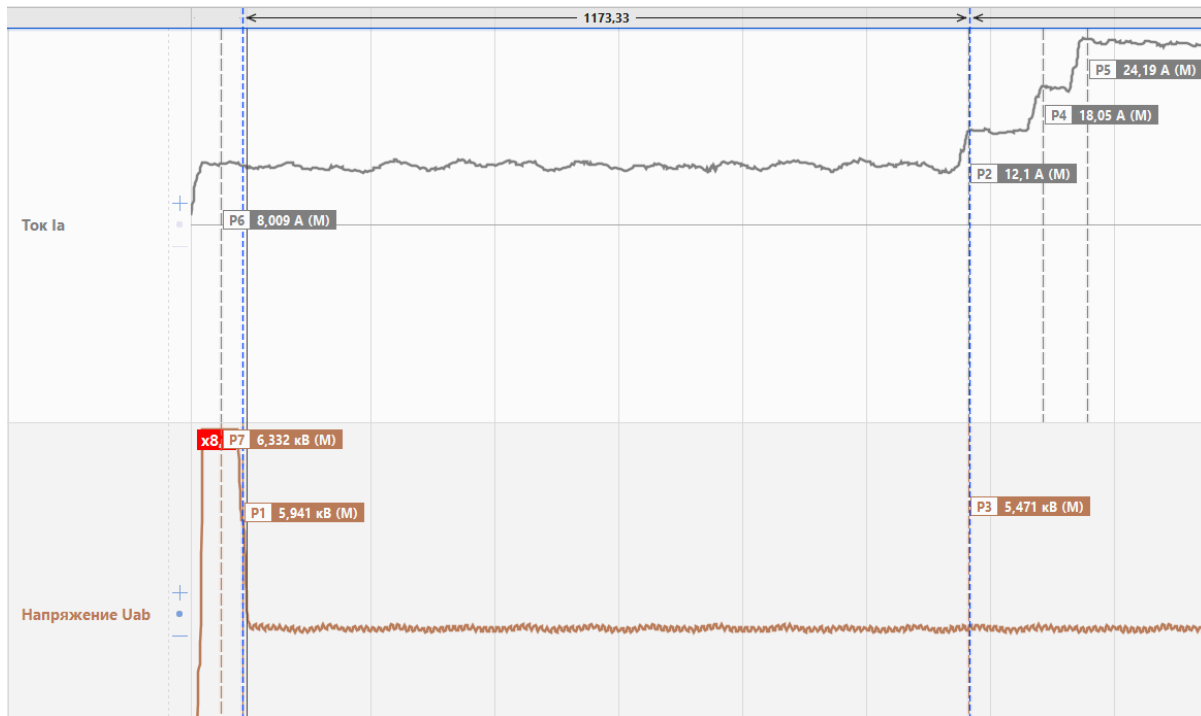
4. Изменение конфигурации контроллера на СНЭЭ работу с гистерезисом

5. Изменение LVRT-характеристики и защит по низкому напряжению инвертора

# ИЗМЕНЕНИЯ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА РАБОТЫ СНЭЭ

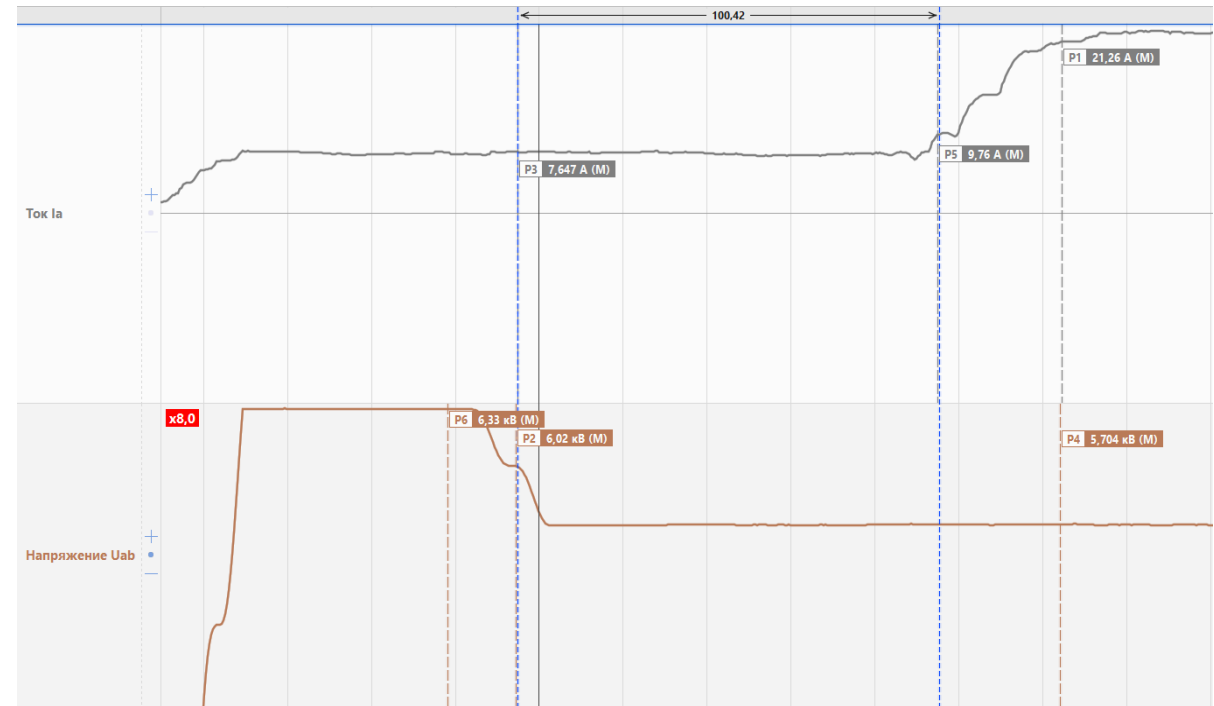
## ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СНЭЭ ДО ИЗМЕНЕНИЙ

- Время отклика СНЭЭ на единичное ступенчатое возмущение – **1,2 сек.**
- Передача команд от системы управления СНЭЭ до инверторов с **разными** временными задержками
- При провалах напряжений СНЭЭ работает в режиме **статического компенсатора**, задействована не вся мощность инвертора

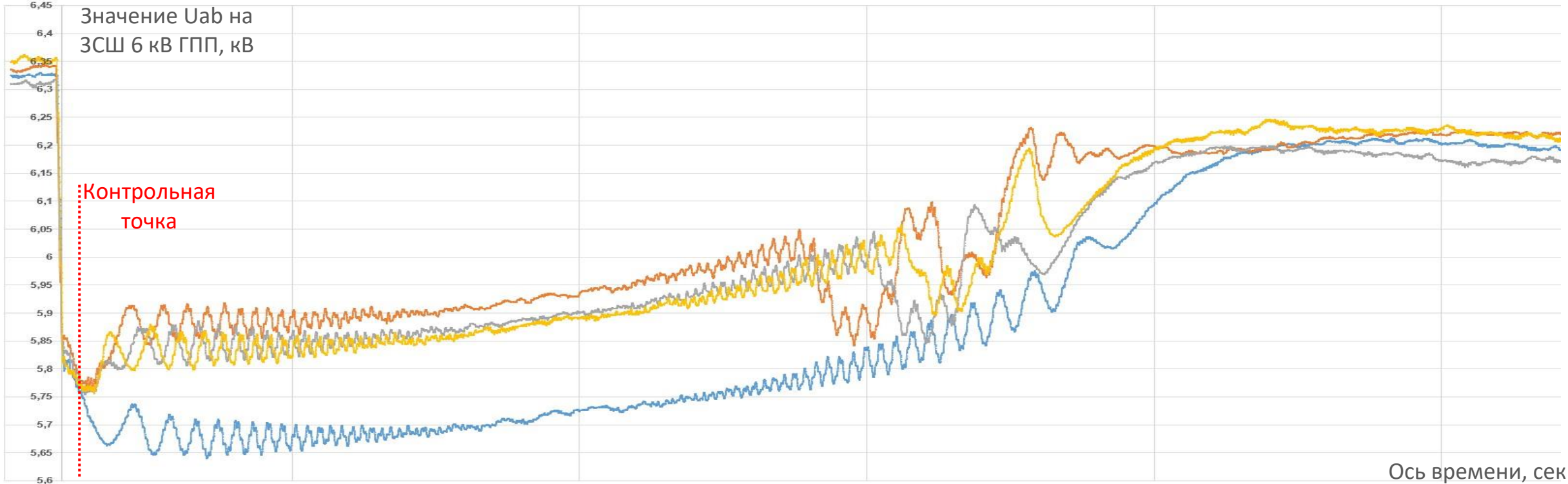


## ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СНЭЭ ПОСЛЕ ИЗМЕНЕНИЙ

- Время отклика СНЭЭ на единичное ступенчатое возмущение – **0,1 сек.**
- Передача команд от системы управления СНЭЭ до инверторов с **минимальными** временными задержками
- При провалах напряжений СНЭЭ работает в режиме инъекции **максимальной активной и реактивной мощности** в заданной пропорции

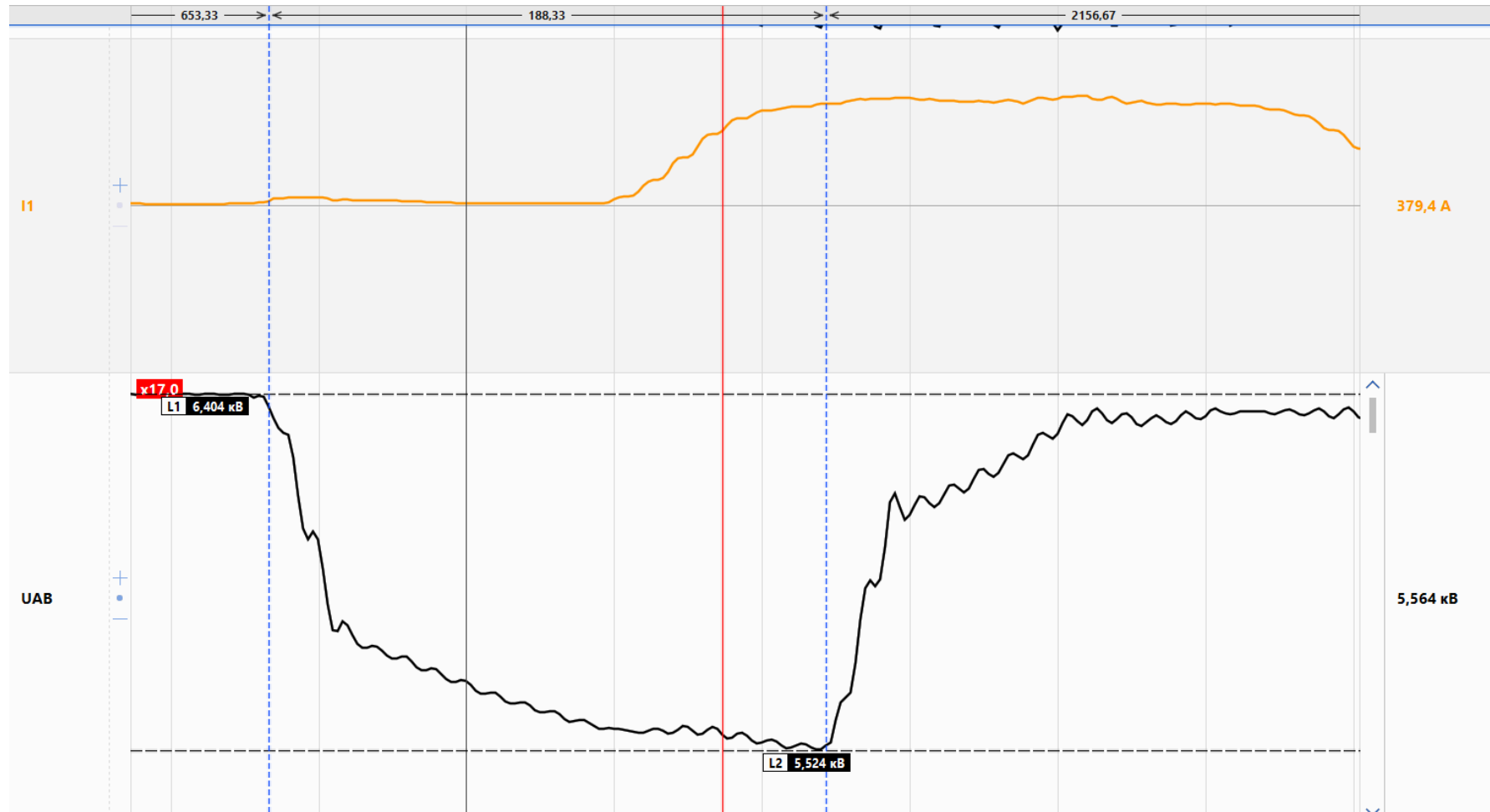


# РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СНЭЭ ПРИ ПУСКАХ ТК-3



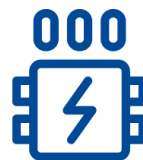
| № опыт а | Вид инъекции мощности      | Остаточное напряжение $U_{ab}$ в момент инъекции мощности, кВ | Длительность провала $U$ на ЗСШ 6 кВ ГПП-5, сек | Прирост напряжения при инъекции мощности $\Delta U$ , кВ | Уменьшение длительности провала напряжения $\Delta t$ , сек |
|----------|----------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1        | Без инъекции               | 5,644                                                         | 3,520                                           | —                                                        | —                                                           |
| 2        | $Q = 3,6$ МВАр             | 5,798                                                         | 2,752                                           | 0,154                                                    | 0,768                                                       |
| 3        | $P=3,6$ МВт и $Q=3,6$ МВАр | 5,810                                                         | 2,609                                           | 0,166                                                    | 0,911                                                       |
| 4        | $P=6,6$ МВт и $Q=3,6$ МВАр | 5,848                                                         | 2,321                                           | 0,204                                                    | 1,199                                                       |

# РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СНЭЭ ПРИ ВНЕШНИХ КЗ



К моменту выхода СНЭЭ на номинальную мощность, кратковременные КЗ длительностью 100-200 мс замыкание локализуется устройствами РЗА

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ



ПОДТВЕРЖДЕНА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ И  
ВОЗМОЖНОСТЬ ВВОДА ЕЁ В ОПЫТНО-  
ПРОМЫШЛЕННУЮ ЭКСПЛУАТАЦИЮ



СНЭ ПОКАЗАЛА ДОПУСТИМУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ  
ПУСКАХ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ,  
ОГРАНИЧЕННУЮ ЕЁ МОЩНОСТЬЮ, А БЫСТРОДЕЙСТВИЕ  
СНЭ БЫЛО НЕДОСТАТОЧНЫМ. В ИТОГЕ  
ИСПОЛЬЗОВАЛСЯ РЕЖИМ ФОРСИРОВКИ



ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НЕОБХОДИМО  
ПРИМЕНИТЬ ЕДИНЫЙ СКВОЗНОЙ ПРОТОКОЛ ПЕРЕДАЧИ  
ДАННЫХ, УСКОРИТЬ РАБОТУ КОНТРОЛЛЕРА СНЭ ЗА  
СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ БЫСТРЫХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЁТА  
НАПРЯЖЕНИЯ



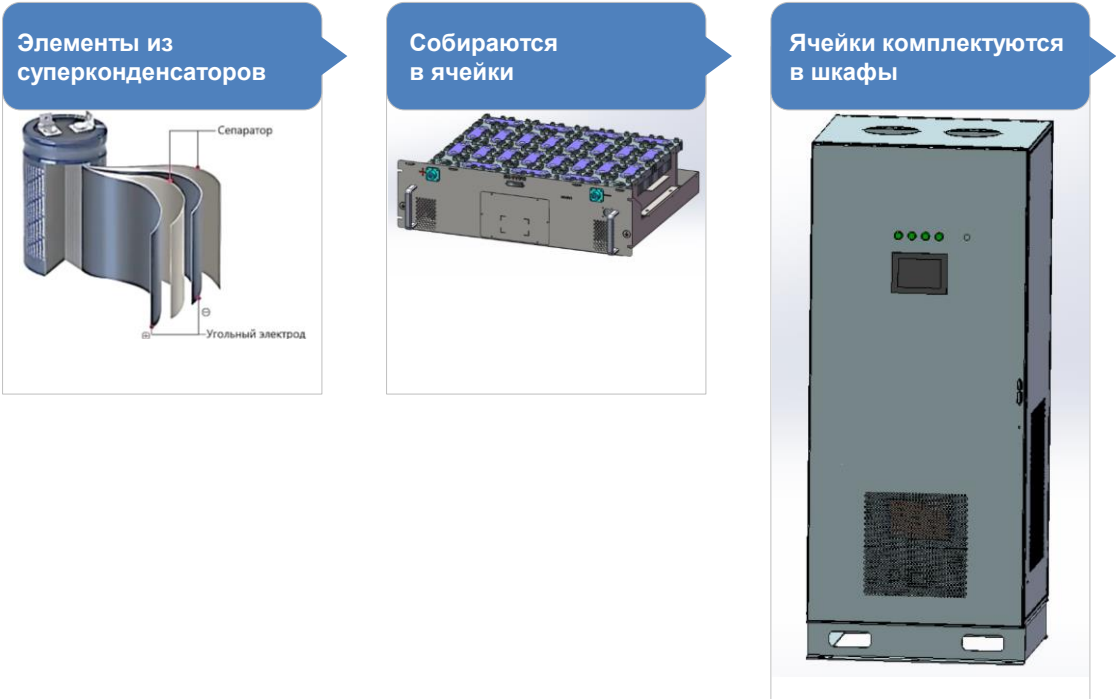
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЮ МЕР ПО  
ДАЛЬНЕЙШЕМУ УВЕЛИЧЕНИЮ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СНЭ,  
ДОЛЖЕН БЫТЬ ВЫПОЛНЕН ПОВТОРНЫЙ АНАЛИЗ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ

# ПРИЛОЖЕНИЯ

# ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СНЭЭ ВЫБРАН ТИП НАКОПИТЕЛЯ - СУПЕРКОНДЕНСАТОР

**Суперконденсатор (СК)** – накопитель энергии и источник тока, занимающий промежуточное положение между аккумуляторными батареями и традиционными конденсаторами.

Энергия сохраняется за счет поляризации заряженных частиц электролита. Суперконденсаторы являются источником импульсной, а не постоянной электрической мощности.



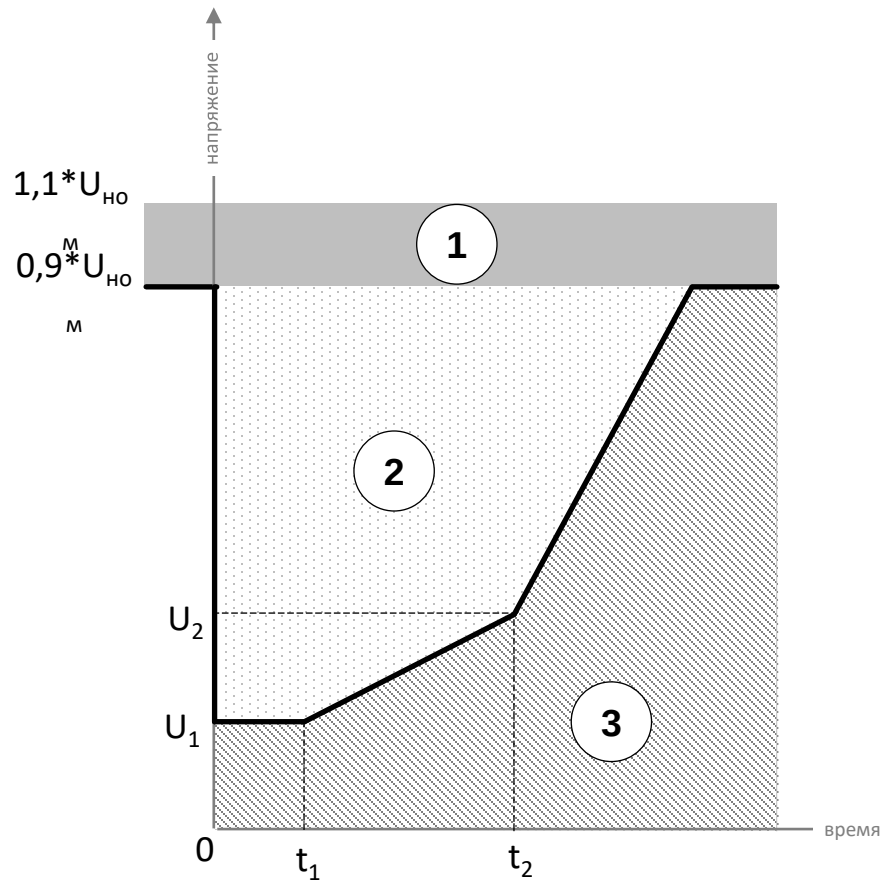
## СРАВНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА С ЛИТИЙ-ИОННЫМ ТИПОМ НАКОПИТЕЛЯ

| Параметр                         | Суперконденсатор                                                                            | Литий-ионный аккумулятор                                                   |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Быстродействие                   | ✓ Мгновенная выдача полной мощности с момента включения                                     | Плавная Мощность набирается постепенно и долго по сравнению с временем АВР |
| Количество циклов заряда-разряда | ✓ Более 1000 000 циклов заряда-разряда<br>✓                                                 | 3 000-10 000 циклов заряда-разряда                                         |
| Срок службы                      | Более 20 лет работы<br>✓                                                                    | Менее 10 лет работы                                                        |
| Условия эксплуатации             | ✓ Суперконденсаторы значительно надежнее переносят работу в условиях частого заряда-разряда |                                                                            |
| Емкость (время работы на разряд) | До 10 сек                                                                                   | От 0,5 часа и выше                                                         |
| Сфера применения-                | Повышение надежности энергоснабжения                                                        | Оптимизации графика потребления, интеграции ВИЭ и пр.                      |
| Удельный вес на ёмкость          | Средний. Не важно для промышленного использования                                           | Низкий. Важно для электромобилей                                           |

СНЭЭ комплектуется двунаправленными инверторами, КРУ-6 кВ, трансформаторами

# LVRT-ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ ИНВЕРТОРОВ

**LVRT (Low Voltage Ride Through)** - это способность инвертора отслеживать снижение напряжения и в зависимости от продолжительности снижения напряжения отключать или продолжать выдачу энергии в сеть.



Область 1 - Источник энергии остаётся подключенным к электрической сети и работает в нормальном режиме.

Область 2 - Источник энергии остаётся подключенным к электрической сети и поддерживает напряжение посредством выработки реактивной мощности.

Область 3 - Источник энергии отключается от сети. Значительное снижение напряжения ведет к увеличению тока через электронные ключи, что может привести к их перегоранию. Для защиты от таких режимов выдача тока в области 3 не допустима.

**Примечание:** область 1 и 2 объединены. В нормальном режиме система находится в режиме ожидания и постоянной подзарядки суперконденсаторов, в сеть энергия не выдается. При просадке напряжения СНЭЭ начинает выдавать в сеть электрическую мощность в определенной пропорции между активной и реактивной мощности