



## **ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИЙ НТИ на базе НИУ "МЭИ"**

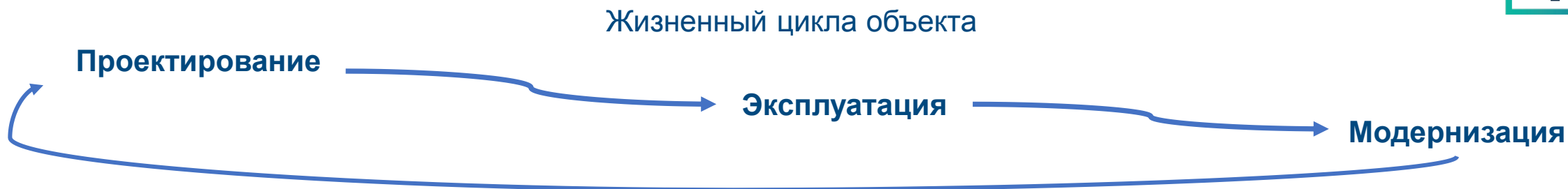
ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Применение ПАК «ЦДЭС» для расчета  
надежности электрической сети с учетом  
надежности РЗА**

**Иванов Антон Алексеевич**

Инженер Центра НТИ МЭИ  
Системный аналитик

[WWW.NTI.MPEI.RU](http://WWW.NTI.MPEI.RU)



## Надежность

свойство системы сохранять заданные режимы функционирования при изменении условий, отказах элементов и внезапных возмущениях

### Цели расчета показателей надежности:

1. Определение энергообъектов (**Выявление «узких мест»**) и оценка соответствия целевым показателями
2. Сравнение и анализ схмотехнических решений
3. Комплексная оценка эффективности решений по РЗА
4. Необходимость регулярного повышения показателей надежности ЭС

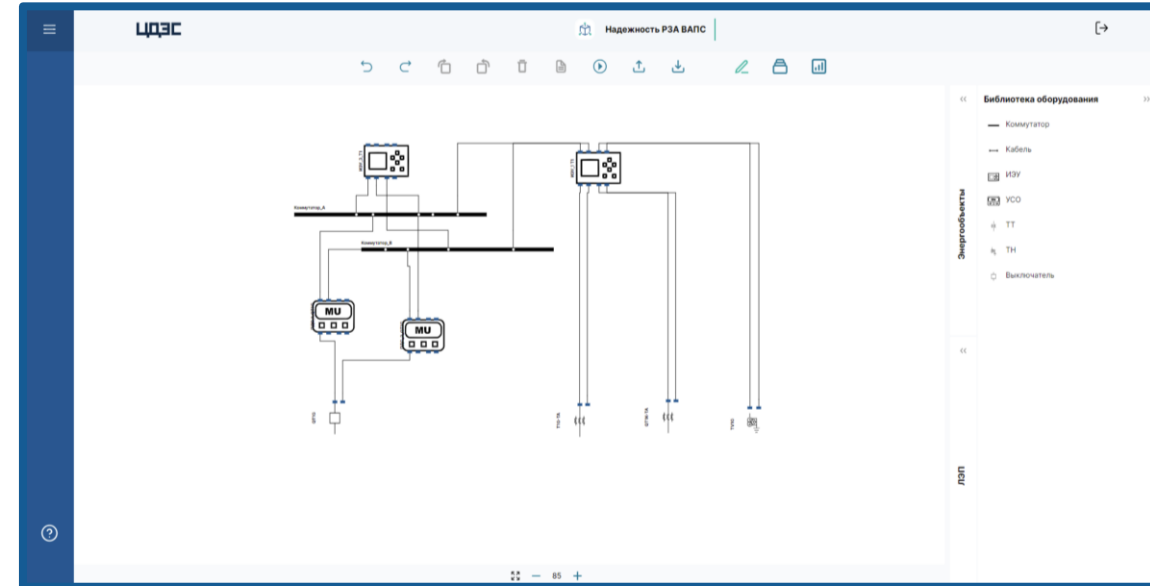
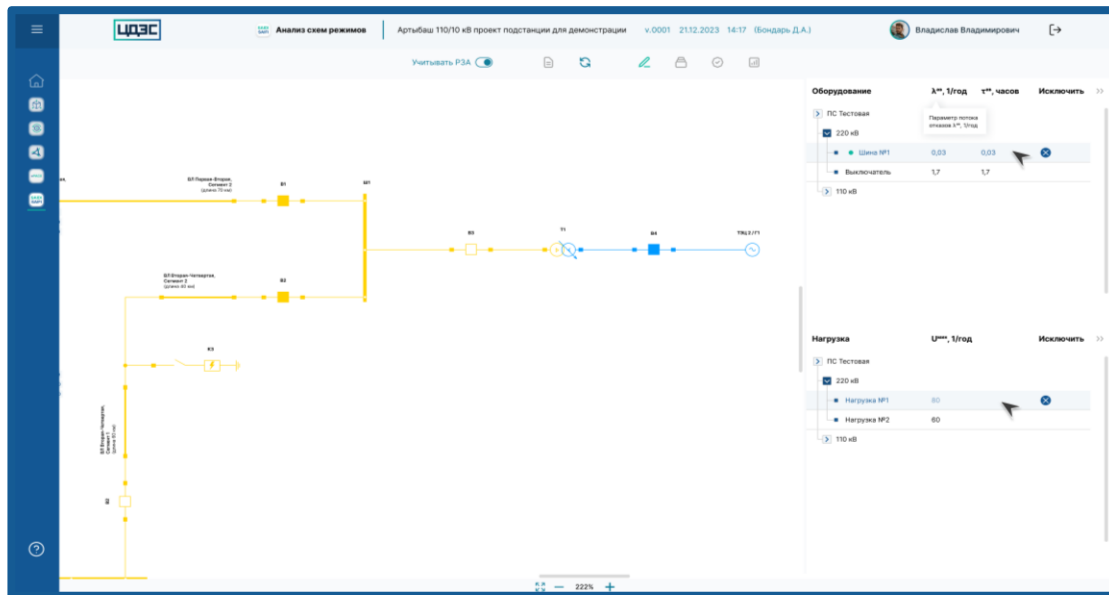
**! Отсутствие единого средства для комплексного расчета надежности → некачественные результаты расчета показателей надежности**

## Анализ схем и режимов

Расчет интегральных показателей надежности электрических сетей

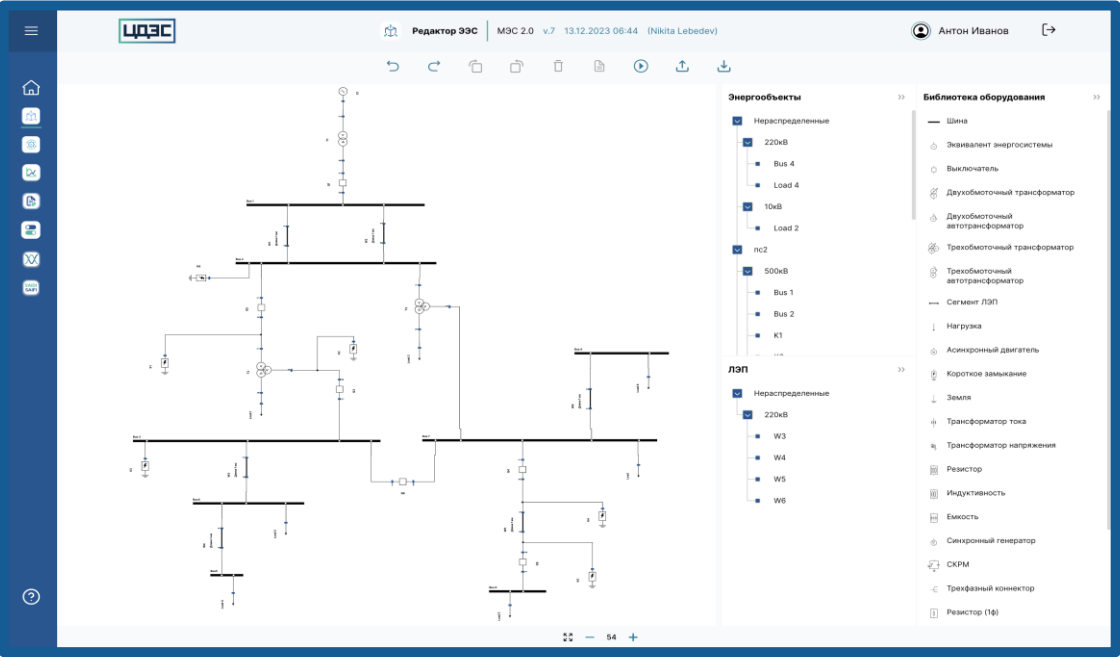
## Анализ решений РЗА

Расчет параметров надежности различных архитектур систем защиты, автоматики и управления



# Этапы расчета показателей надежности электрических сетей

## Редактор ЭЭС

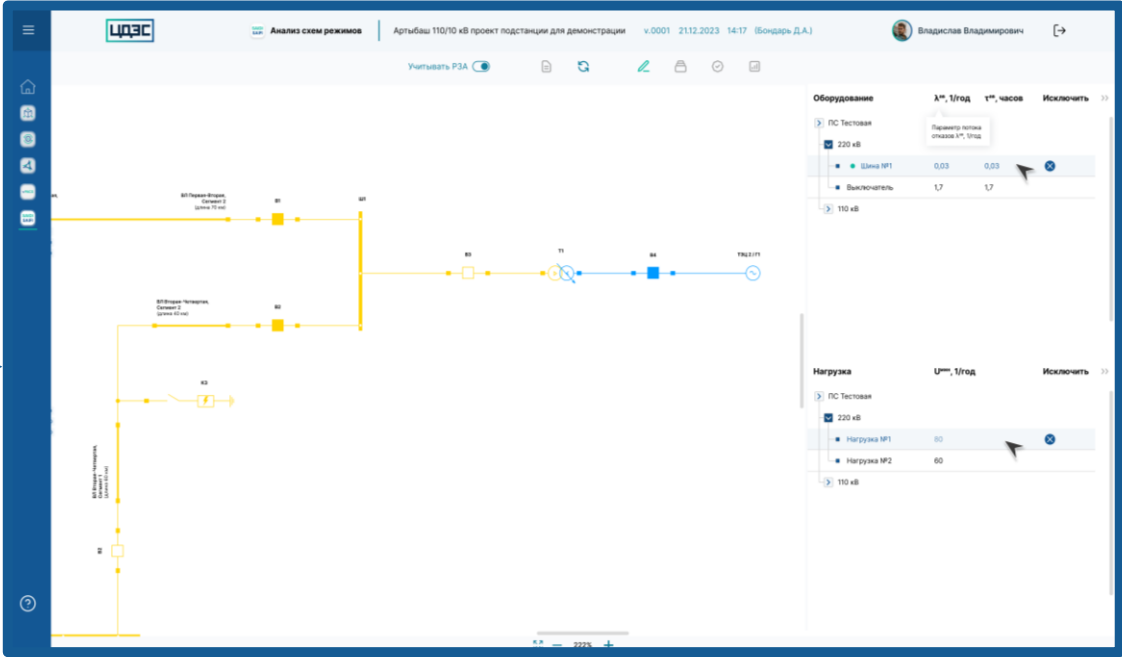


SSD

CIM

Схема

## Анализ схем и режимов



Разработка/импорт схемы энергосистемы  
Валидация схемы

Внесение параметров надежности оборудования и/или P3A

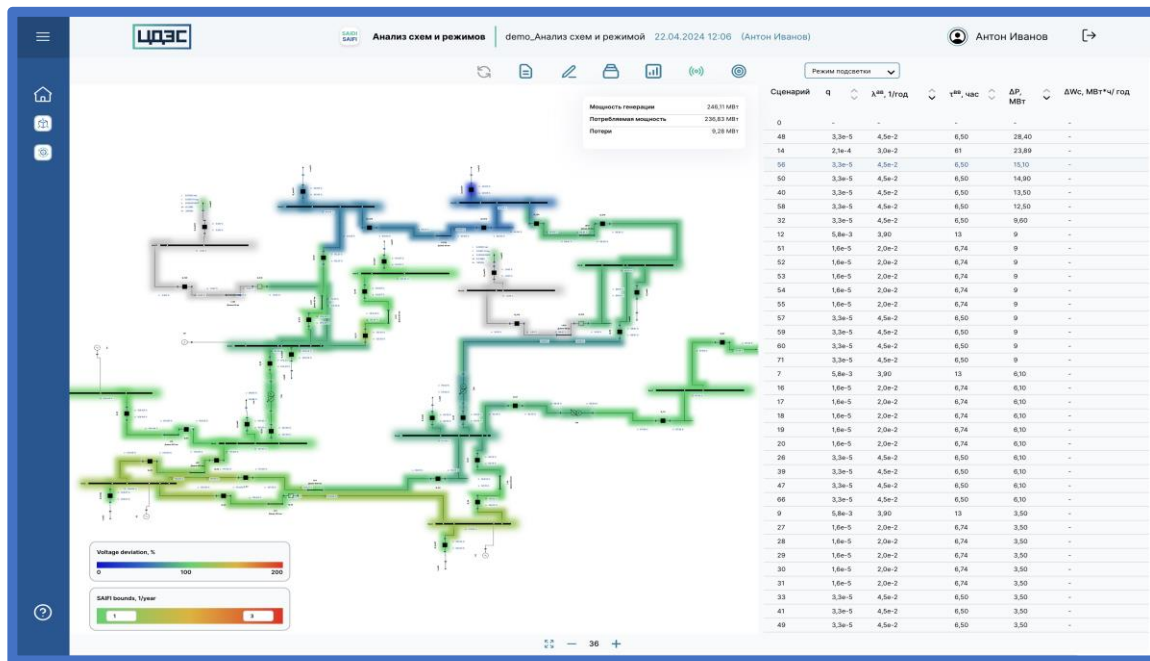
## Генерация и расчет сценариев

## Отображение параметров потребителей в разных сценариях и показателей надежности

Заполнение параметров генерации сценариев  
Генерация сценариев по критерию N-k

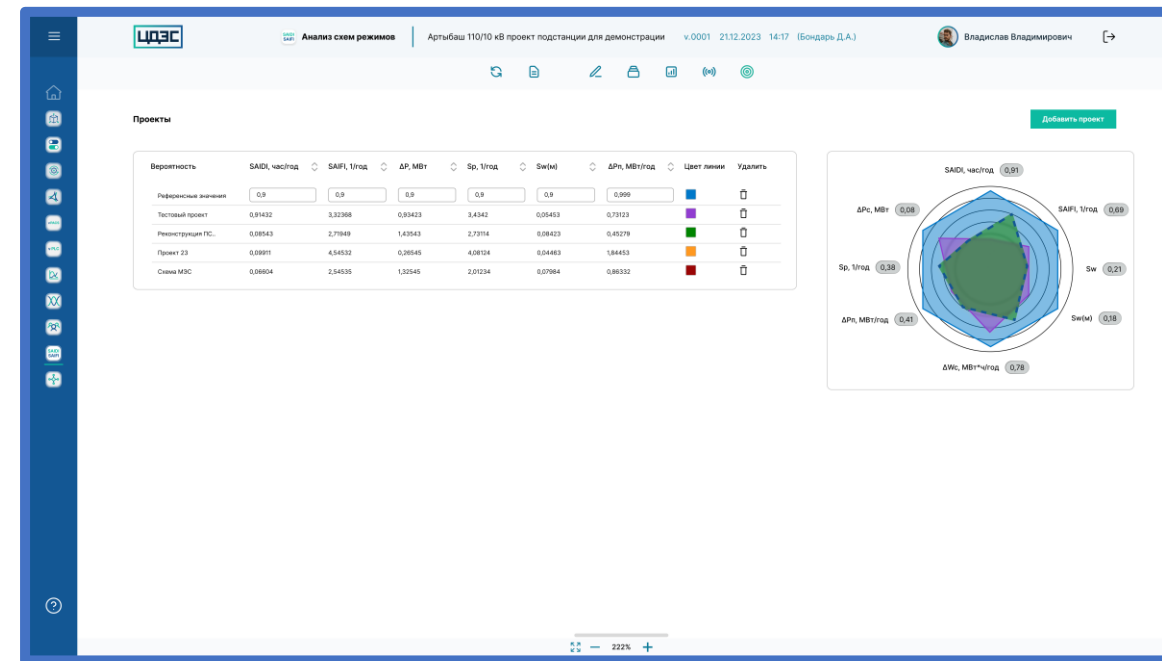
Анализ режимов электроснабжения потребителей  
Экспорт результатов расчетов

## Отображение результатов расчета сценариев

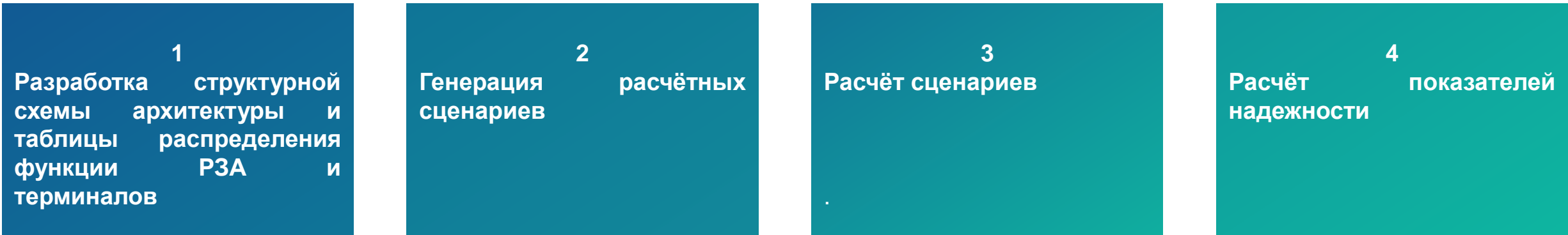


Отображение тепловой карты по перегрузке оборудования и по интегральным показателям надежности потребителей.  
Просмотр схем всех сгенерированных сценариев

## Сравнение вариантов реализации



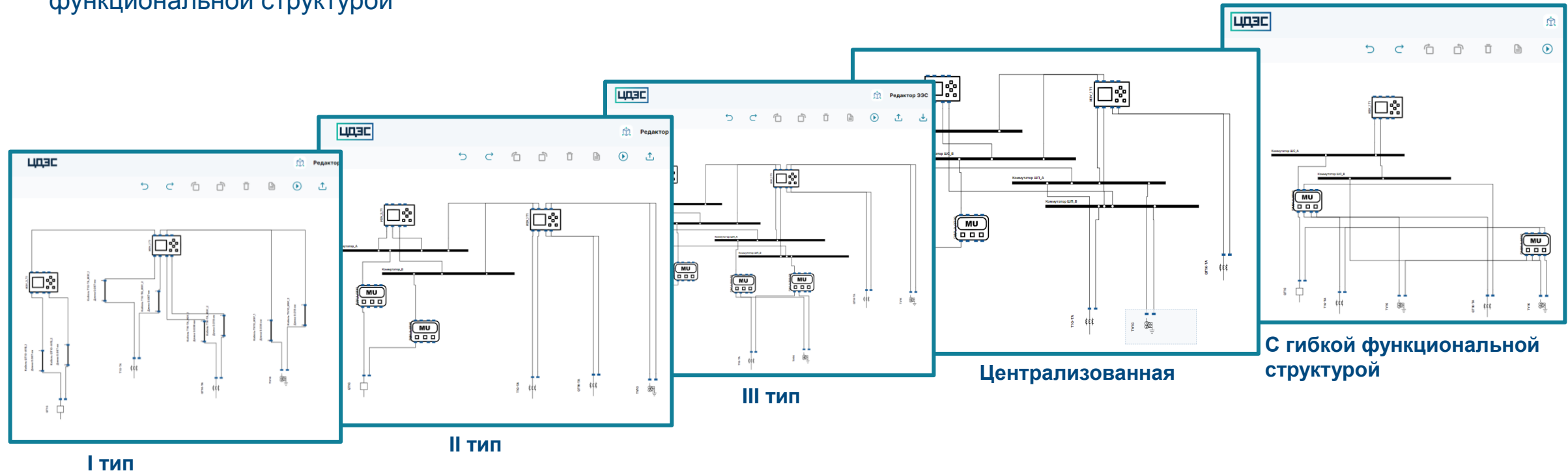
Сравнение интегральных показателей надежности разных проектов  
Определение референсных значений



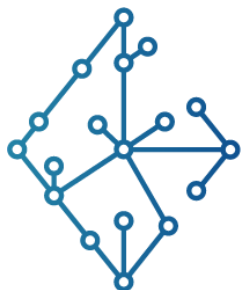


## Результаты:

- Проведено сравнительное исследование расчета показателей надежности схемы электроснабжения в ПАК «ЦДЭС» и PSS Sincal. Разница значений показателей надежности **несущественна**.
- Выполнен анализ надежности различных архитектур построения комплексов РЗА: I/II/III/Централизованная /С гибкой функциональной структурой







## ЦЕНТР КОМПЕТЕНЦИЙ НТИ на базе НИУ «МЭИ»

ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Спасибо за внимание!**

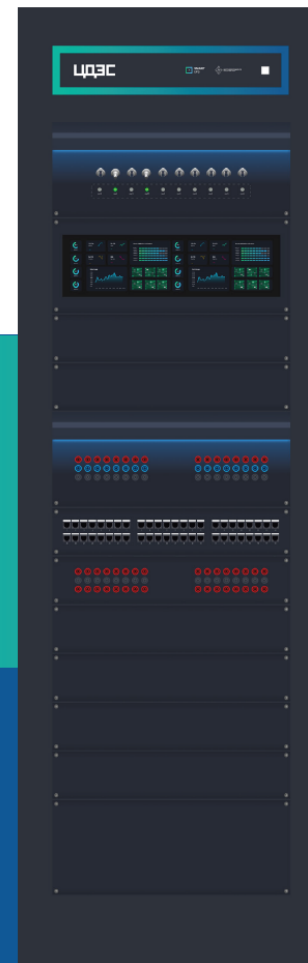
**Иванов Антон Алексеевич**  
Инженер Центра НТИ МЭИ

ivanovmpei@ya.ru

Наши соц. сети:  
[https://t.me/nti\\_cc\\_nrumpei](https://t.me/nti_cc_nrumpei)



ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭНЕРГОСИСТЕМЫ



## Цифровой двойник энергосистемы

Российский  
моделирующий  
комплекс  
реального  
времени

Центр компетенций НТИ  
«Технологии транспорти-  
ровки электроэнергии и  
распределенных интел-  
лектуальных энергосистем»

НИУ «МЭИ»

ООО «Интеллектуальные  
электроэнергетические  
системы»

## «Цифровой двойник энергосистемы (ПАК «ЦДЭС»)

**проведение научно-исследовательских работ**, связанных с моделированием поведения энергосистемы в реальном времени при возникновении различных возмущений в энергосистеме

**проведения инженерных работ**, связанных с тестированием оборудования систем релейной защиты, противоаварийной автоматики, систем управления и др.





РОССИЙСКИЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС  
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЭНЕРГОСИСТЕМЫ



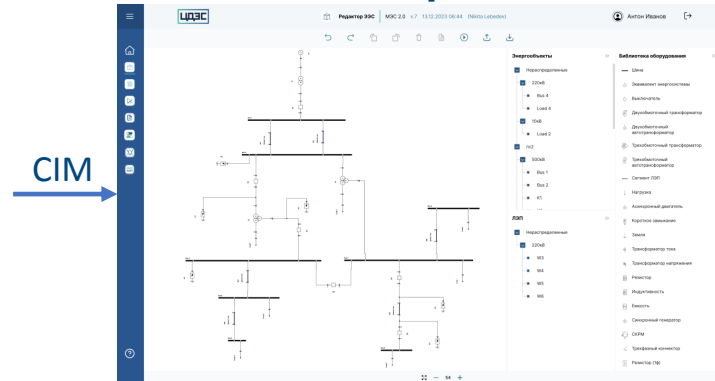
- 1. для чего считать надежность и кому это нужно
- 2. пак цдэс позволяет рассчитывать надежность сети и ВАПС
- Проведено исследование

# Результаты приемо-сдаточных испытаний



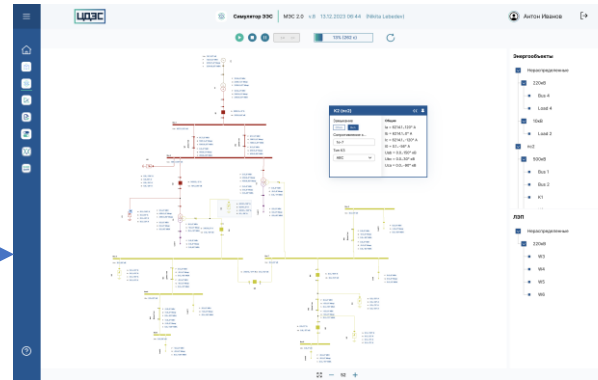
## Проверка работоспособности и функциональности приложения

### Редактор ЭЭС



SSD  
CIM  
Схема

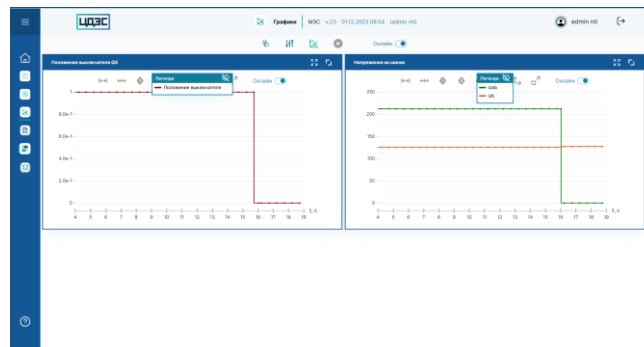
### Симулятор ЭЭС



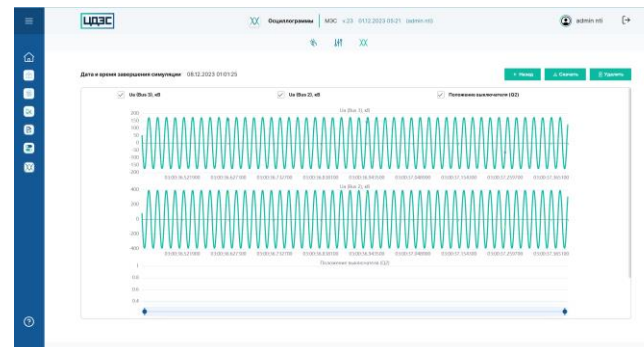
### Журнал событий

Время	Описание события	Статус	Инициатор
15:03:54.891	Сервис запущен	Старт	Преобразователь действующих значений
15:03:54.891	Симуляция запущена	Старт	Система
15:04:53.523	Q5: Значение поля "Положение выключателя" изменилось на "ОТКЛ"	Окна	admin:nt
15:05:24.756	Q5: Значение поля "Положение выключателя" изменилось на "ВКЛ"	Вкл	admin:nt
15:07:17.828	Сервис остановлен	Стоп	Преобразователь действующих значений
15:07:17.835	Симуляция остановлена	Стоп	Система

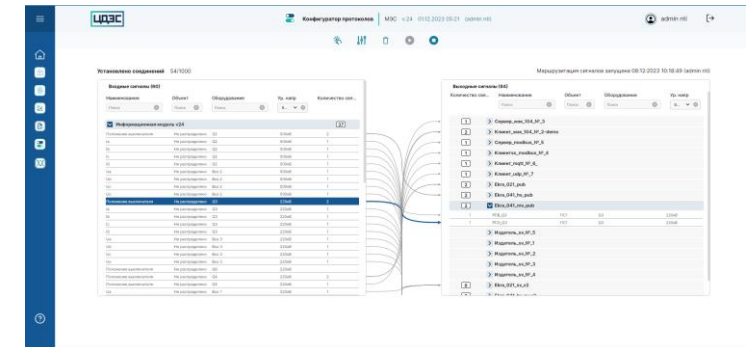
### Графики



### Осциллограммы



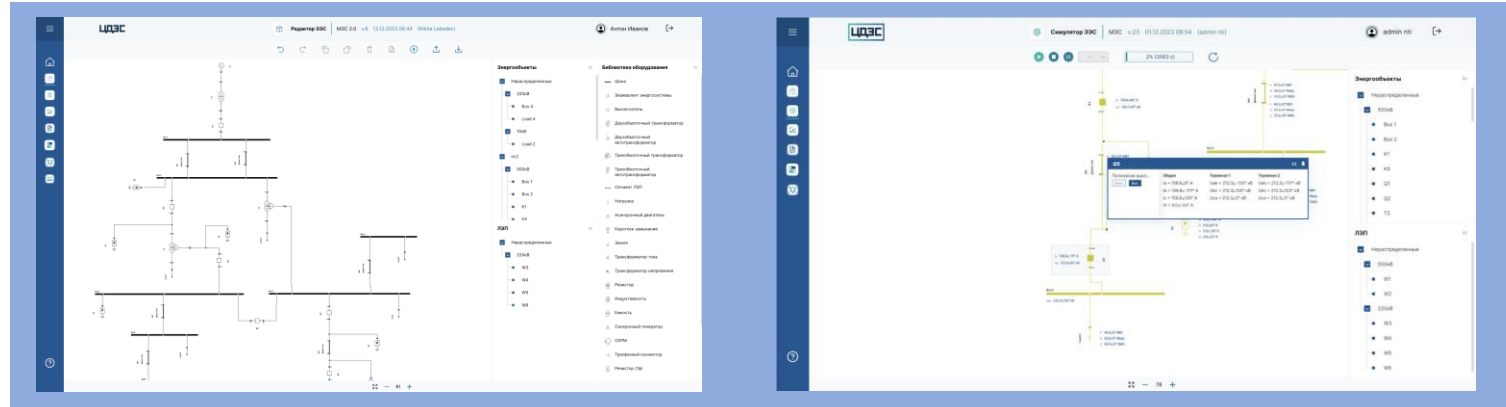
### Конфигуратор протоколов



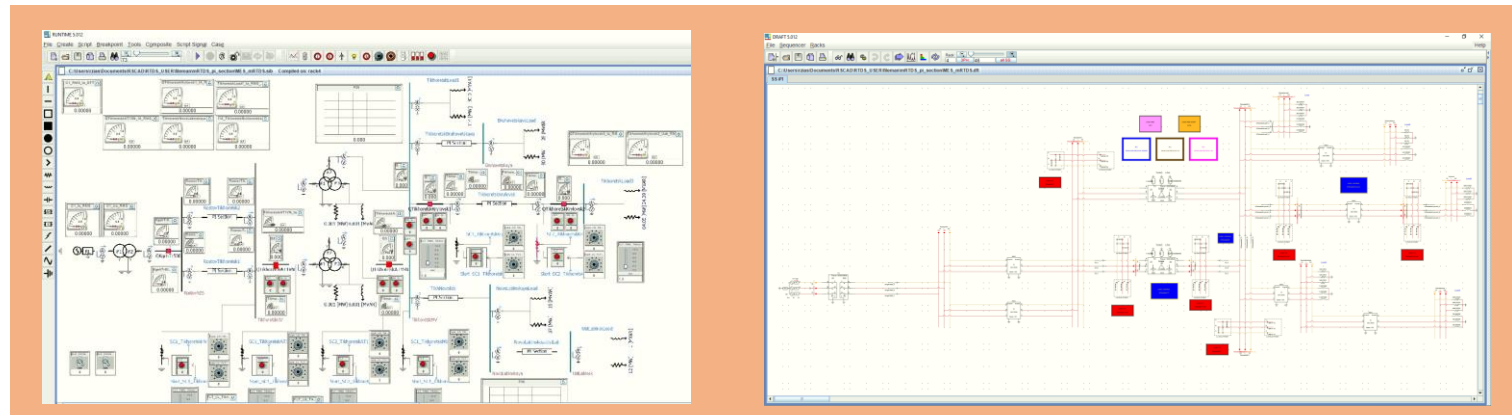
# Результаты приемо-сдаточных испытаний

Подтверждение шага расчета (50 мкс) модуля расчета режима реального времени ПАК «ЦДЭС»

## ПАК «ЦДЭС»



## ПАК «RTDS»



GOOSE

SV, GOOSE

GOOSE



Осциллограммы

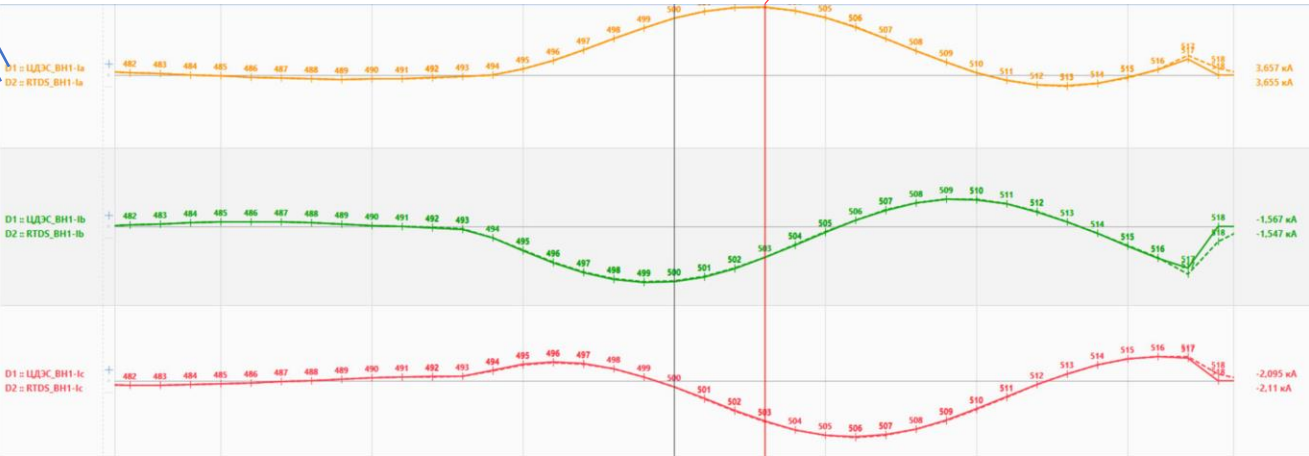
Результаты приемо-сдаточных испытаний



Подтверждение шага расчета (50 мкс) модуля расчета режима реального времени ПАК «ЦДЭС»

I<sub>A</sub> – значения с RTDS

I<sub>A</sub> – значения с ЦДЭС



$$\delta = \frac{|3657 - 3655|}{3655} * 100 = 0,054\%$$

Время	ВН- <i>I<sub>A</sub></i> _ЦДЭС	ВН- <i>I<sub>A</sub></i> _RTDS	ВН- <i>I<sub>B</sub></i> _ЦДЭС	ВН- <i>I<sub>B</sub></i> _RTDS	ВН- <i>I<sub>C</sub></i> _ЦДЭС	ВН- <i>I<sub>C</sub></i> _RTDS	Разность <i>I<sub>A</sub></i> _rtds - <i>I<sub>A</sub></i> _цдэс	(Разность/ <i>I<sub>A</sub></i> _rtds)*100	Среднее значение
	A	A	A	A	A	A	A	%	%
14:34:36.845	238,5	238,5	-78,12	-74,01	-164,5	-166,5	0	0	0
14:34:36.846	211,8	209,7	-2,056	2,056	-213,8	-213,8	2,1	0,057424118	0
14:34:36.847	164,5	160,4	74,01	78,12	-240,5	-240,5	4,1	0,112113754	0
14:34:36.848	98,68	96,63	141,9	146	-244,6	-244,6	2,05	0,056056877	0
14:34:36.849	24,67	22,61	197,4	199,4	-226,1	-224,1	2,06	0,056330325	0
14:34:36.850	-51,4	-55,51	232,3	232,3	-183	-180,9	4,11	0,112387203	0
14:34:36.851	-123,4	-125,4	244,6	244,6	-125,4	-121,3	2	0,054689636	0
14:34:36.852	-183	-185	232,3	230,3	-53,45	-49,34	2	0,054689636	0
14:34:36.853	-224,1	-226,1	197,4	195,3	24,67	26,73	2	0,054689636	0
14:34:36.854	-244,6	-244,6	143,9	139,8	98,68	100,7	0	0	0
14:34:36.855	-240,5	-240,5	76,07	71,96	162,4	164,5	0	0	0
14:34:36.856	-213,8	-211,8	0	-4,112	211,8	211,8	-2	0,054689636	0
14:34:36.857	-166,5	-162,4	-76,07	-80,18	238,5	238,5	-4,1	0,112113754	0
14:34:36.858	-100,7	-98,68	-143,9	-148	242,6	242,6	-2,02	0,055236533	0
14:34:36.859	-26,73	-24,67	-199,4	-201,5	224,1	222	-2,06	0,056330325	0
14:34:36.860	49,34	53,45	-234,4	-234,4	180,9	178,9	-4,11	0,112387203	0
14:34:36.861	121,3	123,4	-246,7	-246,7	123,4	119,2	-2,1	0,057424118	0
14:34:36.862	180,9	183	-234,4	-232,3	51,4	47,29	-2,1	0,057424118	0
14:34:36.863	222	224,1	-199,4	-197,4	-26,73	-28,78	-2,1	0,057424118	0
14:34:36.864	242,6	242,6	-146	-141,9	-100,7	-102,8	0	0	0
14:34:36.865	238,5	238,5	-78,12	-74,01	-164,5	-166,5	0	0	0
14:34:36.866	211,8	209,7	-2,056	2,056	-213,8	-213,8	2,1	0,057424118	0
14:34:36.867	164,5	160,4	74,01	78,12	-240,5	-240,5	4,1	0,112113754	0
14:34:36.868	98,68	96,63	141,9	146	-244,6	-244,6	2,05	0,056056877	0
14:34:36.869	24,67	22,61	197,4	199,4	-226,1	-224,1	2,06	0,056330325	0
14:34:36.870	-51,4	-55,51	232,3	232,3	-183	-180,9	4,11	0,112387203	0
14:34:36.871	-123,4	-125,4	244,6	244,6	-125,4	-121,3	2	0,054689636	0
14:34:36.872	-183	-185	232,3	230,3	-53,45	-49,34	2	0,054689636	0
14:34:36.873	-224,1	-226,1	197,4	195,3	24,67	26,73	2	0,054689636	0
14:34:36.874	-244,6	-244,6	143,9	139,8	98,68	100,7	0	0	0
14:34:36.875	-240,5	-240,5	76,07	71,96	162,4	164,5	0	0	0
14:34:36.876	-213,8	-211,8	0	-4,112	211,8	211,8	-2	0,054689636	0
14:34:36.877	-166,5	-162,4	-76,07	-80,18	238,5	238,5	-4,1	0,112113754	0
14:34:36.878	-100,7	-98,68	-143,9	-148	242,6	242,6	-2,02	0,055236533	0
14:34:36.879	-26,73	-24,67	-199,4	-201,5	224,1	222	-2,06	0,056330325	0
14:34:36.880	49,34	53,45	-234,4	-234,4	180,9	178,9	-4,11	0,112387203	0
14:34:36.881	121,3	123,4	-246,7	-246,7	123,4	119,2	-2,1	0,057424118	0
14:34:36.882	180,9	183	-234,4	-232,3	51,4	47,29	-2,1	0,057424118	0
14:34:36.883	222	224,1	-199,4	-197,4	-26,73	-28,78	-2,1	0,057424118	0
14:34:36.884	242,6	242,6	-146	-141,9	-100,7	-102,8	0	0	0
14:34:36.885	238,5	238,5	-78,12	-74,01	-164,5	-166,5	0	0	0
14:34:36.886	211,8	209,7	-2,056	2,056	-213,8	-213,8	2,1	0,057424118	0
14:34:36.887	164,5	160,4	74,01	78,12	-240,5	-240,5	4,1	0,112113754	0
14:34:36.888	98,68	96,63	141,9	146	-244,6	-244,6	2,05	0,056056877	0
14:34:36.889	24,67	22,61	197,4	199,4	-226,1	-224,1	2,06	0,056330325	0

0,078226048

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{i_{rtds} - i_{цдэс}}{i_{rtdsmax}} \right| * 100}{n}$$

Средняя относительная разница мгновенных значений тока или напряжения составляет порядка 0,01%



## 1. МЭК 104

Клиент

QTester104

Сервер

ПАК «RTDS»

## 2. MODBUS TCP

Клиент

Modbus TCP

Сервер

Modbus Poll

## 3. MQTT

Клиент

Mosquitto

## 4. UDP

Клиент

Matlab

Сервер

Matlab

## 5. МЭК 61850 GOOSE

Издатель

МПТ РЗ «ЭКРА»

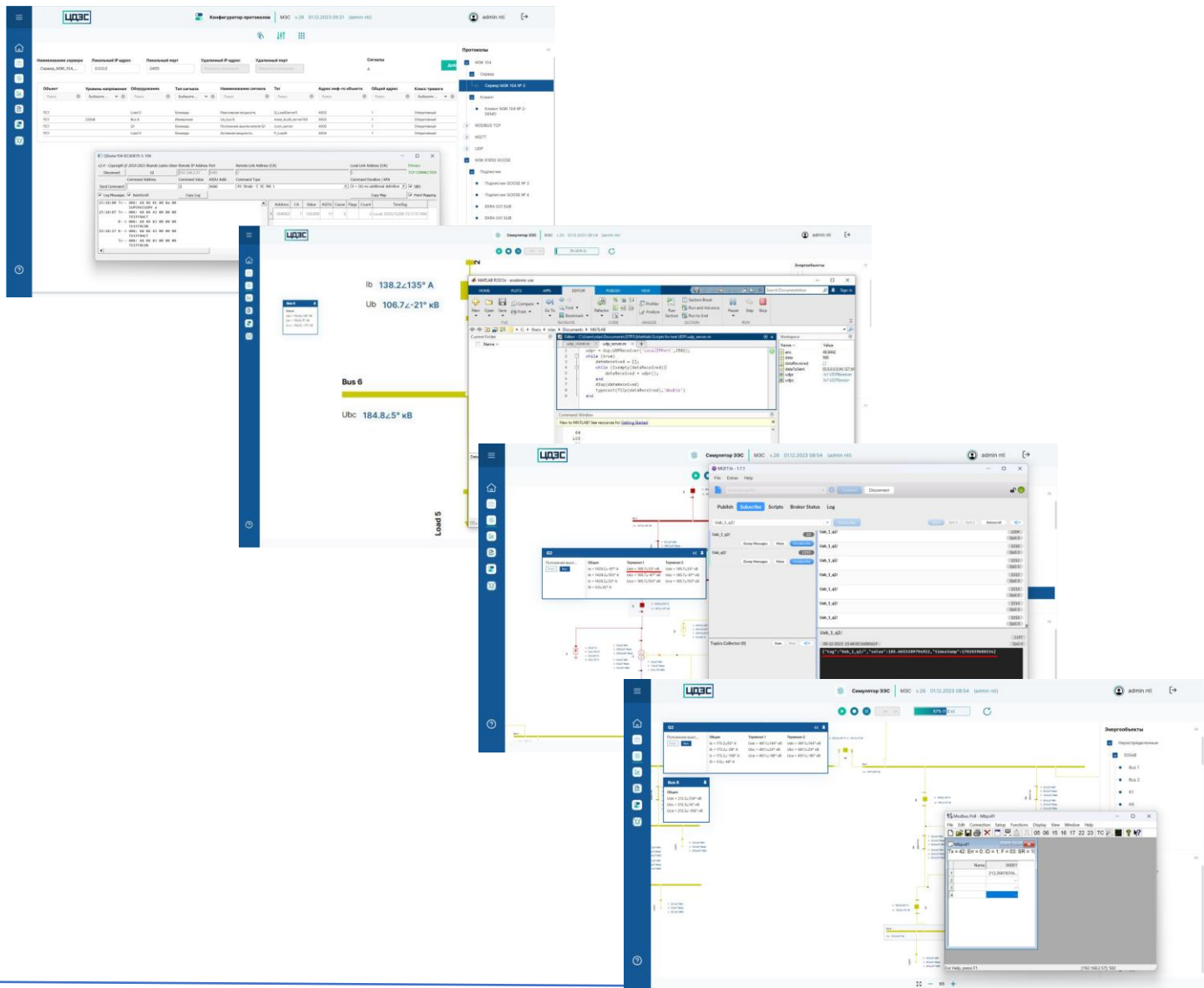
Подписчик

МПТ РЗ «ЭКРА»

## 6. МЭК 61850 SV

Издатель

МПТ РЗ «ЭКРА»



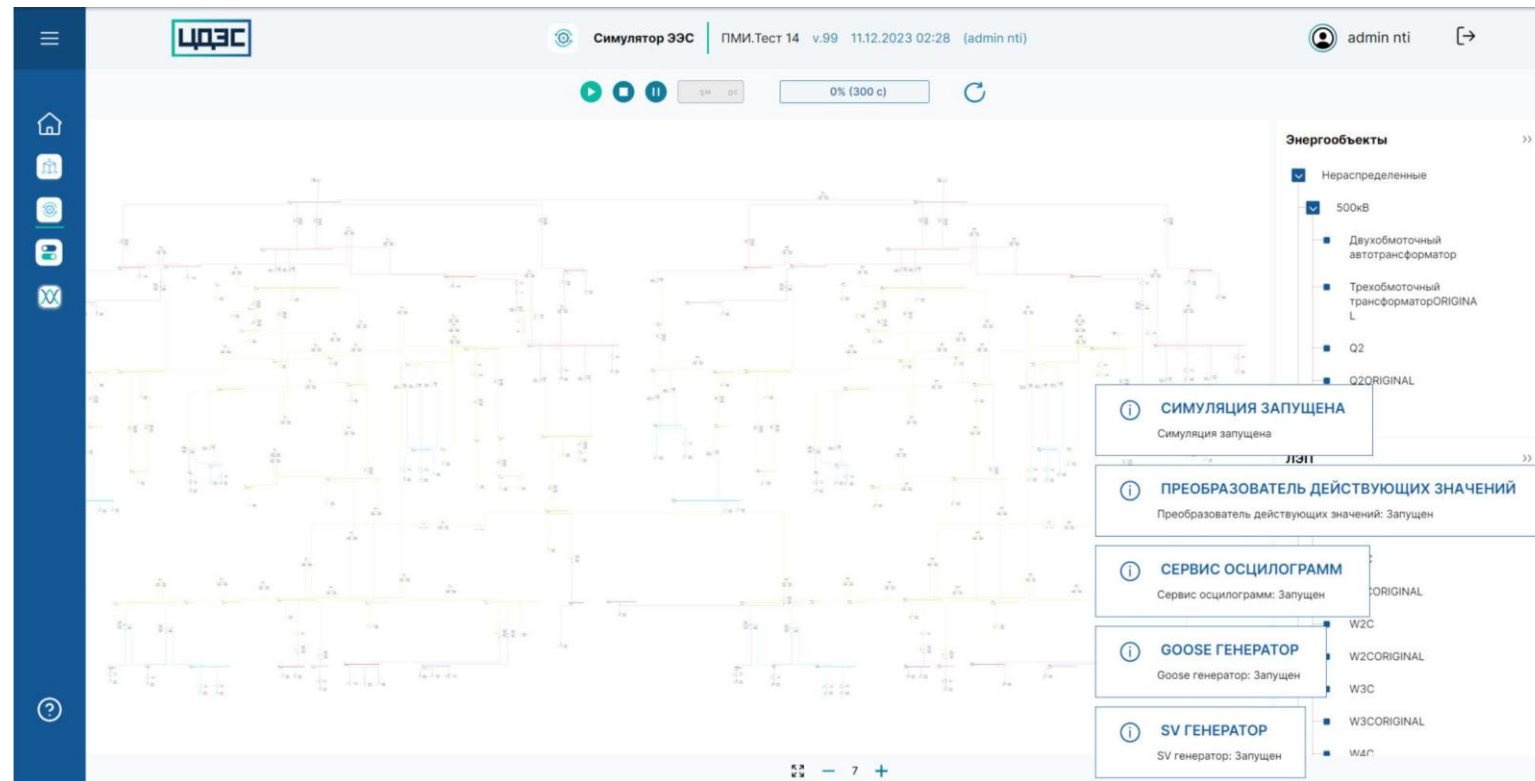
# Подтверждение расчета 600 электрических однофазных узлов на одном расчетном модуле

## Параметры:

- 600 топологических однофазных узлов
- Схема содержит: ТТ с насыщениям, СКРМ, СГ, АД, АТ, ТН и другие элементы
- Запуск схемы < 10 секунд

## Результаты испытания:

1. Загрузка 600% CPU, что соответствует использованию 6 аппаратных поток ОС или 3х ядер ОС.
2. На терминале МПТ РЗ ЭКРА отсутствует сигнал «Неисправность SV 9.2 LE»;
3. МПТ РЗА ЭКРА отключил аварийный режим и записал осциллограмму аварийного режима;
4. Осциллограмма аварийного режима из МПТ РЗА ЭКРА соответствует текущему режиму;
5. Шаг расчета аварийного режима равен 50 мкс;



## Результаты приемо-сдаточных испытаний

- Получены рекомендации по доработке
- Все 19 испытаний пройдены без замечаний
- Результаты работ в рамках первого этапа разработки ПАК «ЦДЭС» в полном объеме соответствует предъявленным требованиям

**ПРОТОКОЛ**  
испытаний ПАК «ЦДЭС» в рамках выполнения первого этапа договора поставки оборудования и программного обеспечения

**1. Объект испытаний**  
ПАК «ЦДЭС»

**2. Место проведения испытаний**  
г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, Центр коллективного пользования «Испытательный полигон технологий транспортировки электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем»

**3. Продолжительность испытаний**  
Испытания проводятся 12.12.2023 г.

**4. Цель испытаний**  
Целью испытаний является подтверждение соответствия технических характеристик и реализованных функциональных возможностей ПАК «ЦДЭС» требованиям, предъявляемым в Техническом задании, в рамках выполнения первого этапа договора поставки оборудования и программного обеспечения.

**5. Порядок испытаний**  
Испытания проводятся в соответствии с Программой и методикой испытаний ПАК «ЦДЭС».

**6. Результаты испытаний**  
Результаты испытаний приведены в таблице 1 к настоящему Протоколу.

Таблица 1 - Результаты испытаний

№	Наименование испытания	Оценка результата испытания (Соответствует/не соответствует)	Примечание
1.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Интеграционная платформа» в части функционала управления пользователями	Соответствует	
2.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Интеграционная платформа» в части функционала управление проектами	Соответствует	Рекомендации по доработке: 1. Добавить для всех приложений ПАК название приложения в заголовке на вкладке браузера.

№	Наименование испытания	Оценка результата испытания (Соответствует/не соответствует)	Примечание
			2. Добавить для приложения «Симулятор ЭЭС» индикацию о статусе симуляции.
3.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Редактор ЭЭС»	Соответствует	Рекомендации по доработке: Добавить вывод статистики по количеству топологических одноконтурных узлов схемы.
4.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Симулятор ЭЭС»	Соответствует	Рекомендации по доработке: Добавить выбор отображаемых измерений элемента на схему.
5.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Журнал событий»	Соответствует	Рекомендации по доработке: 1. При поиске событий сделать найденные события кликабельными: после клика выводить событие и отображать его в полном перечне событий.
6.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Радианс»	Соответствует	Добавить возможность выбор отображения значения угла на графиках
7.	Проверка работоспособности и функциональности приложения «Осциллограммы»	Соответствует	
8.	Подтверждение шага расчета модуля расчета режима реального времени ПАК «ЦДЭС»	Соответствует	
9.	Проверка работоспособности и	Соответствует	Рекомендации по

№	Наименование испытания	Оценка результата испытания (Соответствует/не соответствует)	Примечание
	функциональности приложения «Конфигуратор протоколов»		доработке: 1. Добавить поддержку стандарта Россетей для валидации протокола МЭК 61850 SV. 2. Добавить управление качеством протокола SV.
10.	Программный модуль поддержки протокола GOOSE	Соответствует	
11.	Программный модуль поддержки протокола SV	Соответствует	
12.	Подтверждение технических характеристик модуля расчета режима реального времени (РМРВ) ПАК «ЦДЭС»	Соответствует	
13.	Демонстрация вычислительной мощности ПАК «ЦДЭС» при расчете с использованием многоконтурности.	Соответствует	Рекомендации по доработке: Изменить отображение загрузки на терминале в шкафу для более быстрого отображения изменения загрузки CPU.
14.	Подтверждение способности ПАК «ЦДЭС» рассчитывать схему, содержащую более 600 топологических одноконтурных узлов на одном расчетном модуле	Соответствует	
15.	Программный модуль «Протокол МЭК 60870-5-104»	Соответствует	
16.	Программный модуль «Протокол ICDP»	Соответствует	
17.	Программный модуль поддержки протокола Modbus TCP	Соответствует	
18.	Программный модуль поддержки протокола MQTT»	Соответствует	
19.	Испытания аппаратной платформы	Соответствует	

№	Наименование испытания	Оценка результата испытания (Соответствует/не соответствует)	Примечание
19.	Испытания аппаратной платформы	Соответствует	

**7. Замечания**

**8. Заключение**  
Результаты работ в рамках первого этапа договора поставки оборудования и программного обеспечения, необходимого для создания ПАК «ЦДЭС» соответствует / соответствует с замечаниями/ не соответствует предъявленным требованиям.

От ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Директор Центра НИИ МЭИ  
Зам. директора по науке

Подпись  
Подпись

ФИО  
ФИО

От: Руководитель клиентской службы

Подпись  
Подпись  
Подпись  
Подпись  
Подпись  
Подпись

ФИО  
ФИО  
ФИО  
ФИО  
ФИО  
ФИО

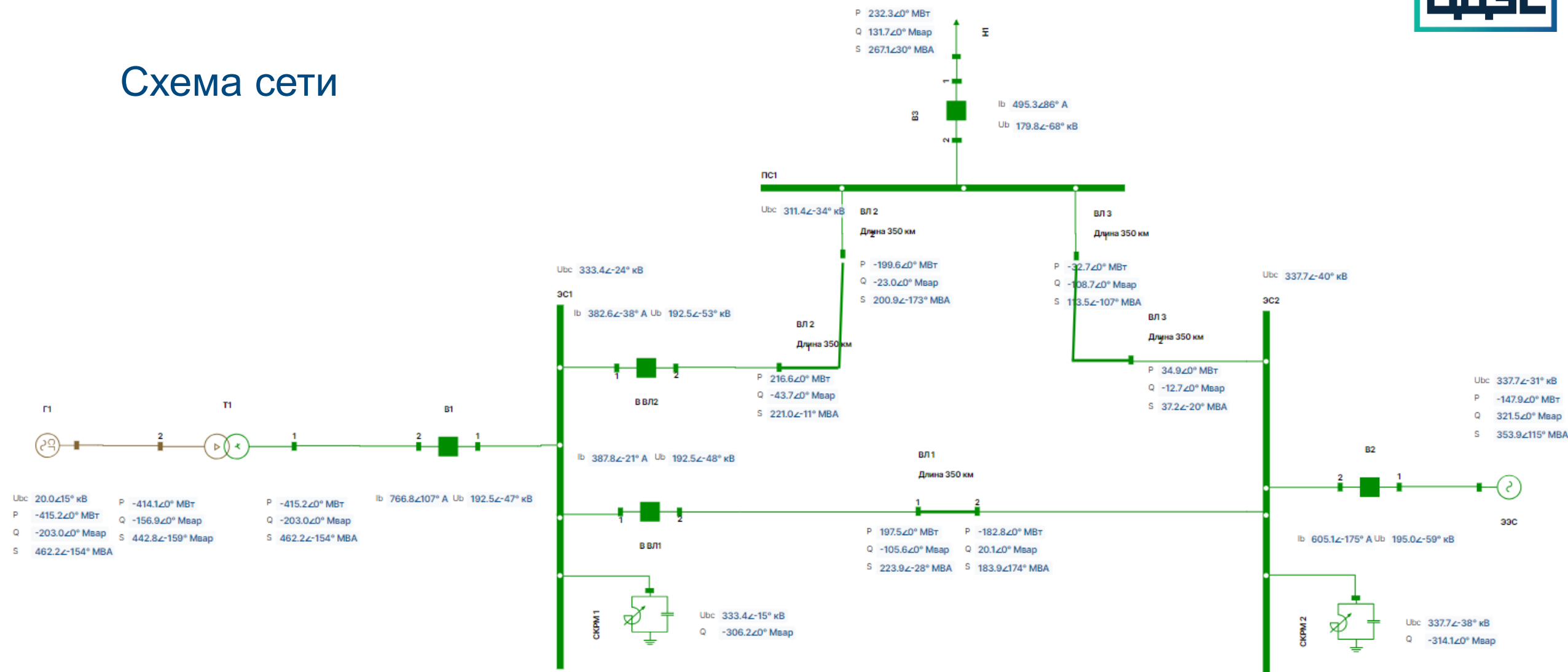
Подпись  
Подпись

ФИО  
ФИО

## Модель синхронного генератора



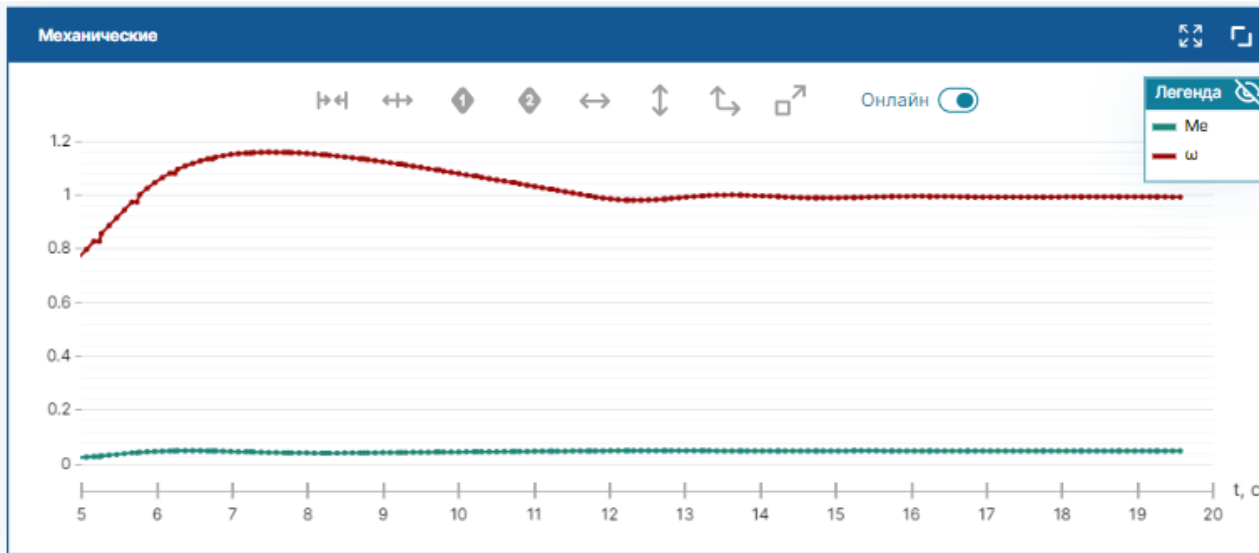
# Схема сети



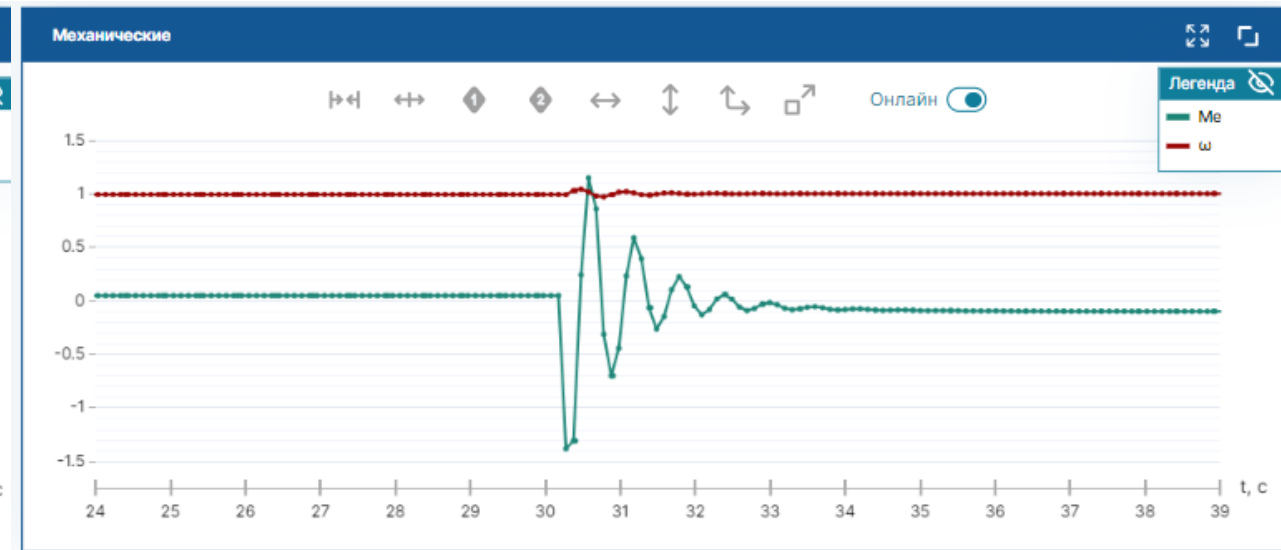
Подстанция	Наименование
ЭС1	Г1
Общие	Автоматика
Номинальная частота, Гц	Номинальное линейное напряжение, кВ
50	20
Номинальная мощность, МВА	Постоянная инерции, с
500	3
Реактивное сопротивление рассеяния статора, о.е.	Коэффициент вязкого трения, о.е.
0,102	0,1
Активное сопротивление статора, о.е.	Реактивное сопротивление взаимоиנדукции ротора и статора по q-оси, о.е.
0,02	1,58
Реактивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, о.е.	Реактивное сопротивление рассеяния первой демпферной обмотки по q-оси, о.е.
6.1789e-2	0,32928
Активное сопротивление обмотки возбуждения, о.е.	Активное сопротивление первой демпферной обмотки по q-оси, о.е.
1.4068e-3	1.4145e-2
Реактивное сопротивление взаимоиנדукции ротора и статора по d-оси, о.е.	Активное сопротивление второй демпферной обмотки по q-оси, о.е.
1,66	8.1942e-2
Активное сопротивление демпферной обмотки по d-оси, о.е.	Реактивное сопротивление взаимоиנדукции демпферных обмоток по q-оси, о.е.
4.0699e-3	0
Реактивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки по d-оси, о.е.	Реактивное сопротивление рассеяния второй демпферной обмотки по q-оси, о.е.
5.4581e-3	9.4199e-2
Реактивное сопротивление взаимоиנדукции обмотки возбуждения и демпферной обмотки по d-оси, о.е.	
0	

Подстанция	Наименование
ЭС1	Г1
<div>ОбщиеАвтоматика</div>	
<input checked="" type="checkbox"/> Автоматическое регулирование возбуждением	
Постоянная времени интегрирования канала по отклонению напряжения (TU), с	Коэффициент усиления канала по отклонению напряжения (KOU)
0,5	25
Постоянная времени канала стабилизации по скорости изменения напряжения (TaIU), с	Коэффициент усиления канала стабилизации по скорости изменения напряжения (KIU)
0,06	-10
Постоянная времени канала стабилизации по скорости изменения тока возбуждения (TaIf), с	Коэффициент усиления канала стабилизации по скорости изменения тока возбуждения (KIIf)
0,15	0,01
Коэффициент усиления системы возбуждения (Ke)	Постоянная времени системы возбуждения (Te), с
1	0,06
Нижний предел системы возбуждения, о.е.	Верхний предел системы возбуждения, о.е.
-100	100
<input checked="" type="checkbox"/> Автоматическое регулирование частоты вращения	Уставка по напряжению, о.е.
Относительная мощность турбины, о.е.	1
1	Постоянная времени турбины, с
Коэффициент усиления реле скорости, о.е.	1
20	Начальное состояние турбины, о.е.
Нижний предел положения заслонки, о.е.	0
0	Верхний предел положения заслонки, о.е.
<input checked="" type="checkbox"/> Регулирование активной мощности	1
Постоянная интегрирования регулятора мощности, с	Уставка по частоте, о.е.
20	1
	Уставка по мощности, о.е.
	1

# Механические характеристики



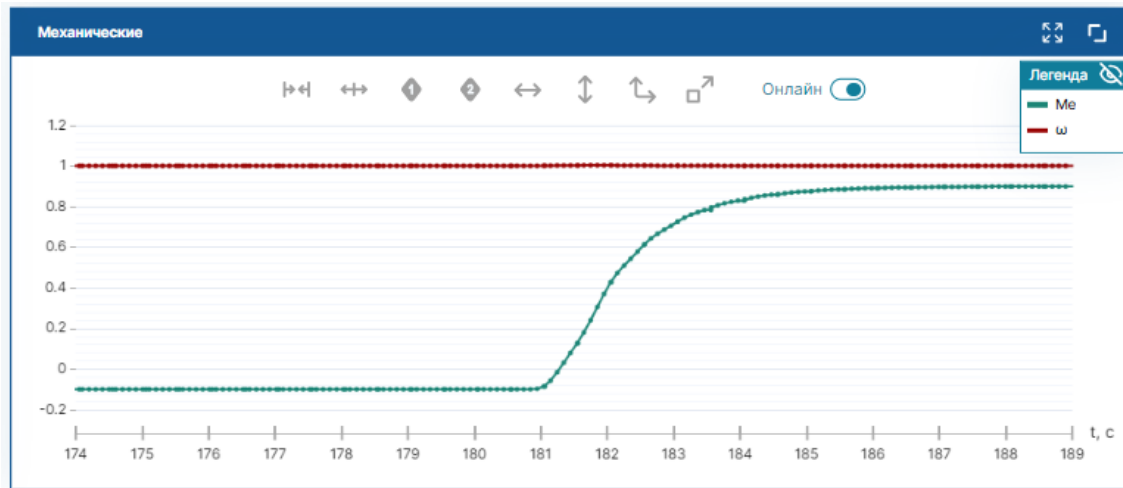
Пуск генератора



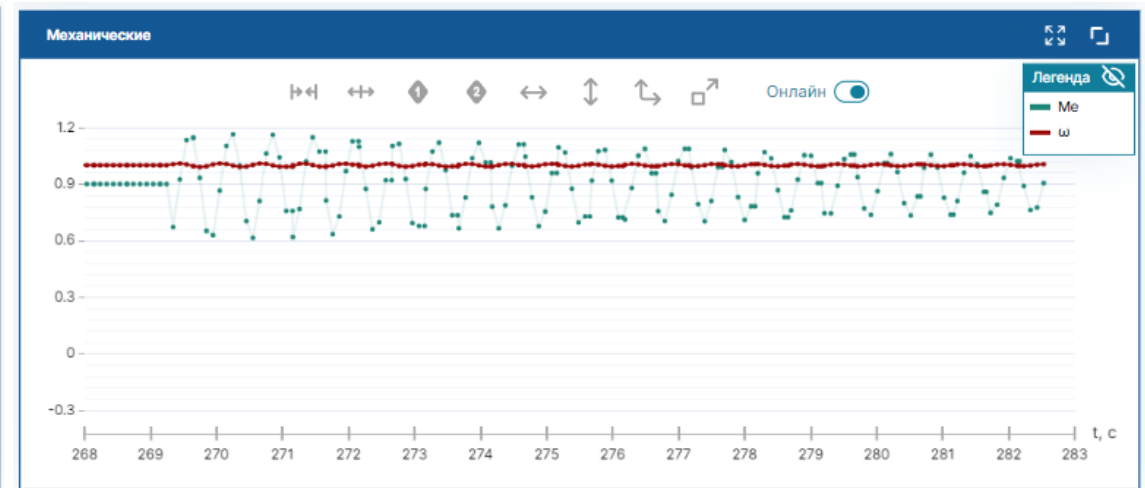
Успешная синхронизация



# Механические характеристики

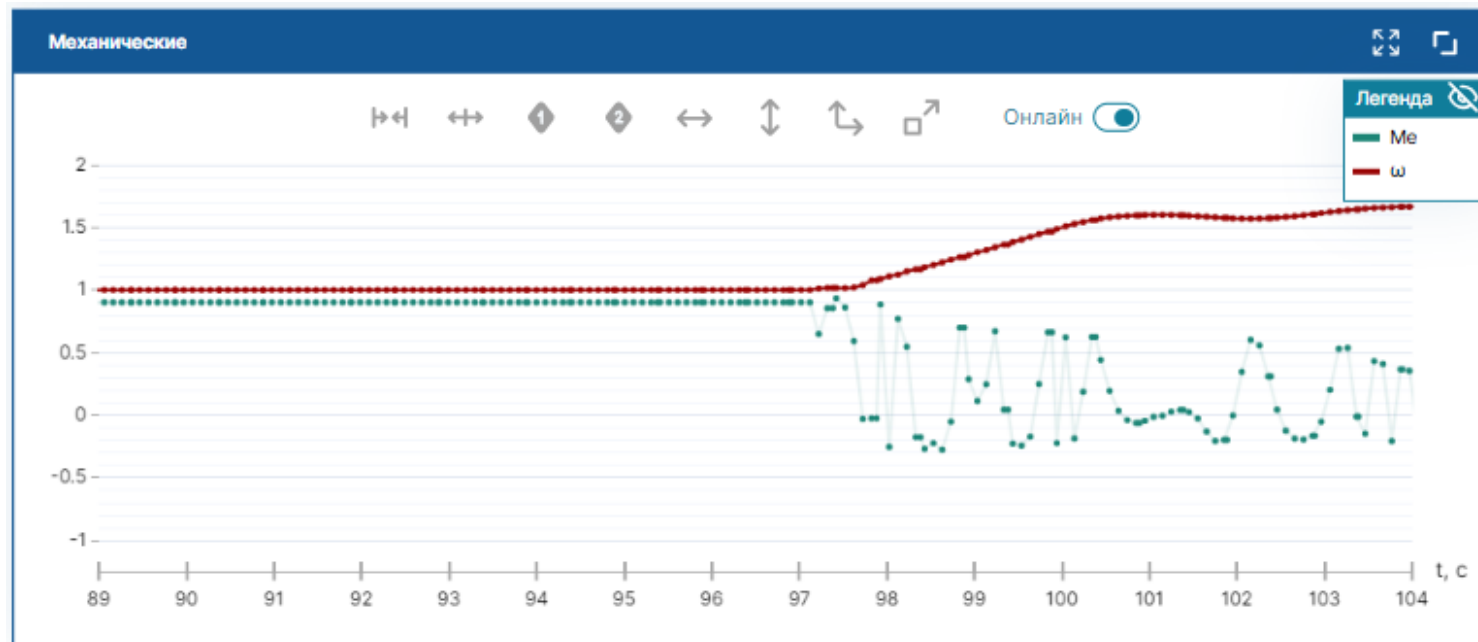


Набор мощности



Отключение линии ВЛ2

# Механические характеристики

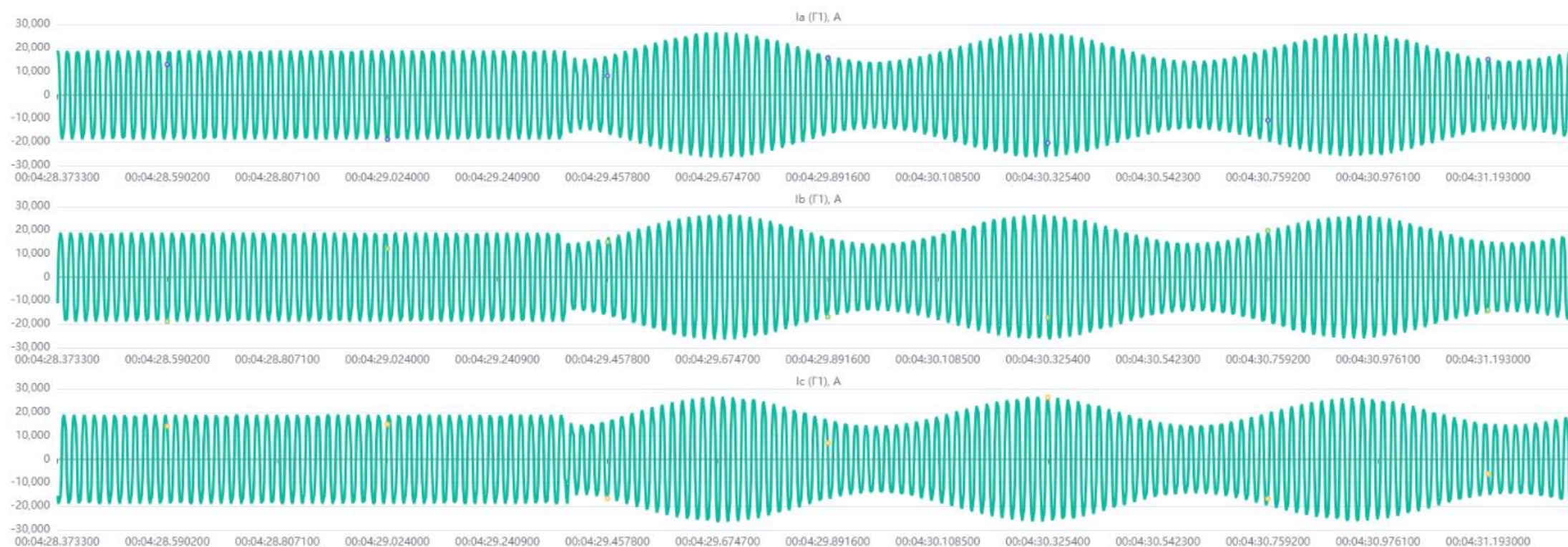


Отключение линии ВЛ1, асинхронный ход

# Осциллограмма токов генератора при включении его в сеть



# Осциллограмма токов генератора при отключении линии ВЛ2





# Осциллограмма токов генератора при отключении линии ВЛ1, асинхронный ход

