

## **Имитационные модели электроэнергетических объектов для исследования и разработки систем противоаварийной автоматики**

---

Тимофеев Даниил

/ Инженер ЦИТМ «Экспонента»

# Рассматриваемые вопросы:

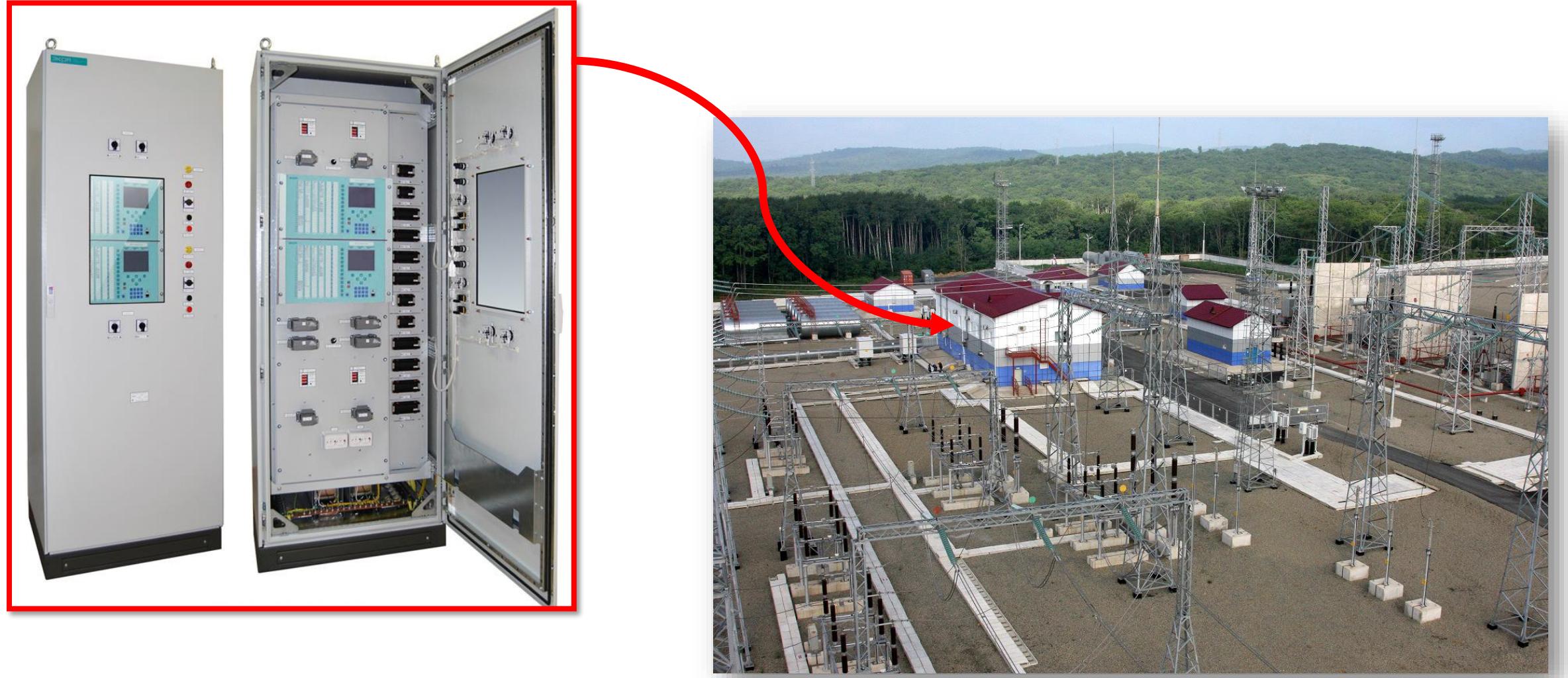
- Важность единой имитационной модели защищаемого объекта (ИМО)
- Инструменты для построения моделей и алгоритмов ПА на примере MATLAB/Simulink
- Проведение сертификационных испытаний устройств с помощью машин реального времени

# Противоаварийная автоматика

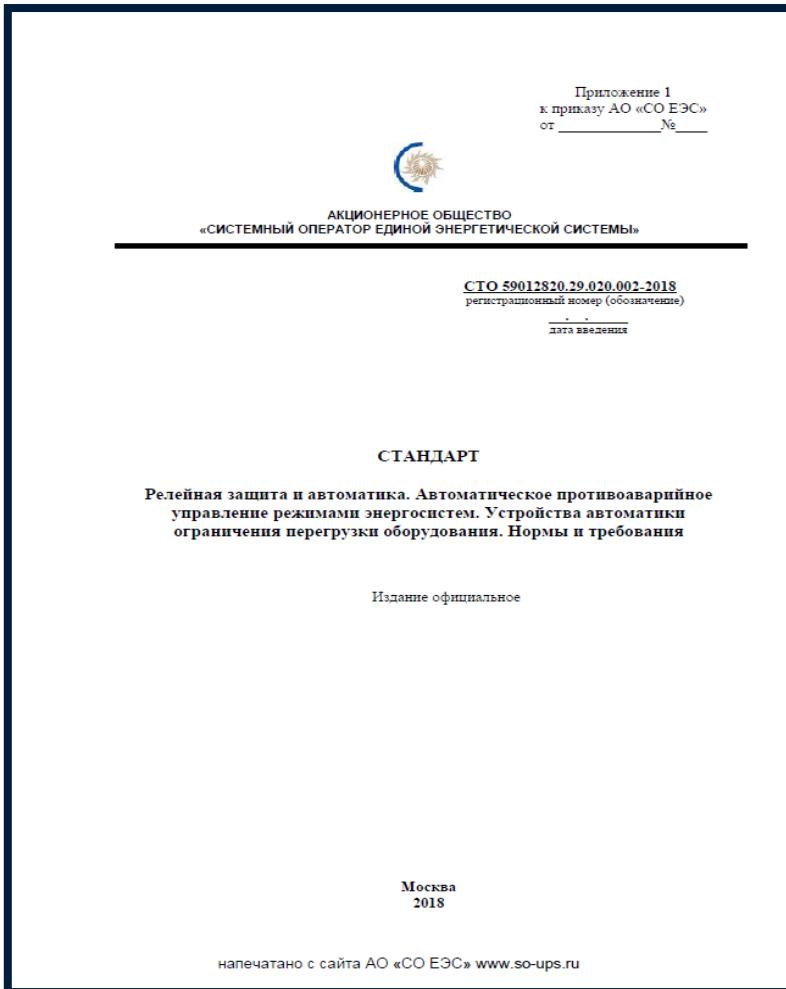
- (ПА) комплекс автоматических устройств, обеспечивающий измерение и обработку параметров электроэнергетического режима, передачу информации и команд управления и предназначенный для **выявления, ограничения развития и прекращения** аварийных режимов в энергосистемах с классом напряжения единицы и сотни киловольт (**6 – 750 кВ**).



# Противоаварийная автоматика



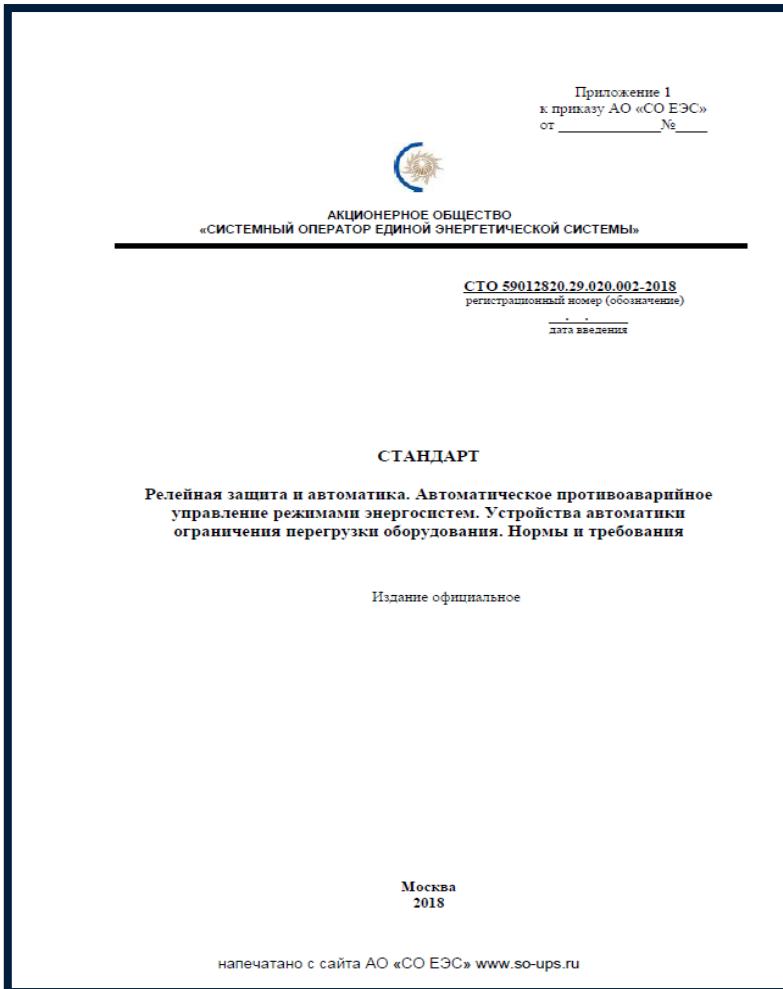
# Сертификация устройств ПА



Описывает:

- Требования к устройствам ПА (автоматики ограничения перегрузки оборудования);
- Требования к **средствам** проведения испытаний;
- Методику проведения **сертификационных испытаний**.

# Сертификация устройств ПА



## Испытания:

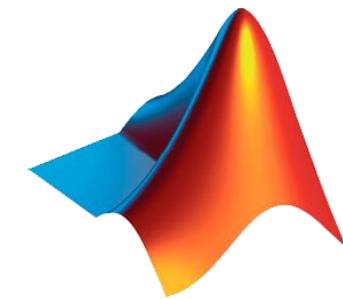
- Электромагнитные переходные процессы: **Короткие замыкания/замыкания на землю;**
- Электромеханические переходные процессы учитывающие **движения роторов машин;**
- Испытания в цепях **измерения и питания устройств.**

# Важность ИМО для нужд сертификационных испытаний ПА

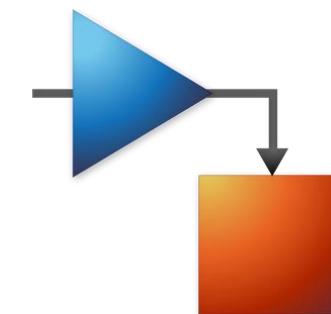
Необходимость иметь широкий набор наблюдаемых электрических величин

Моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов разной сложности

Необходимость единой среды для моделирования электроэнергетических объектов и управления ими без стороннего ПО



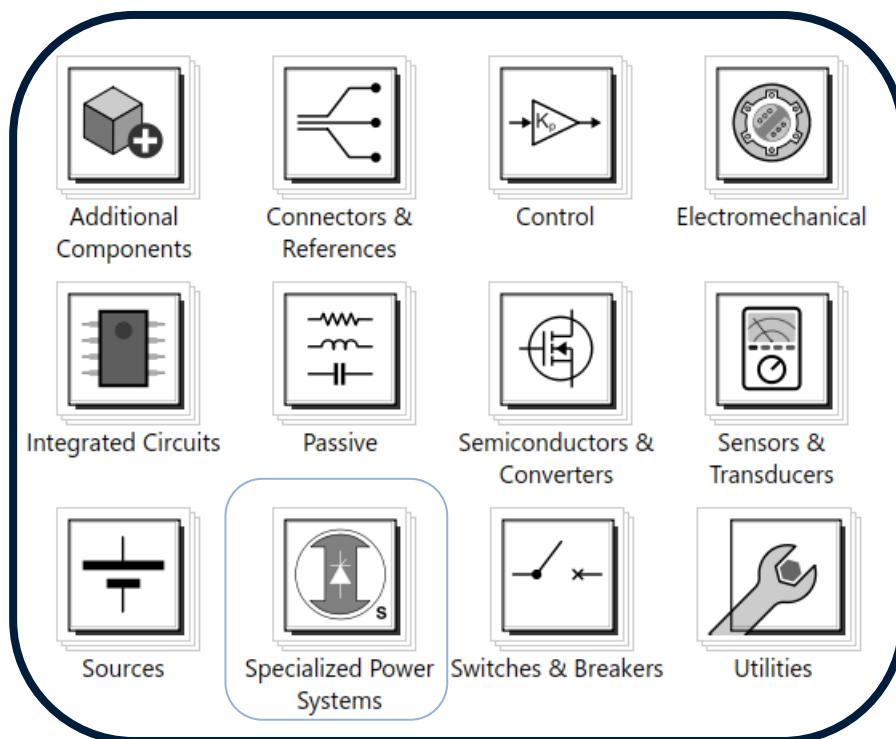
MATLAB



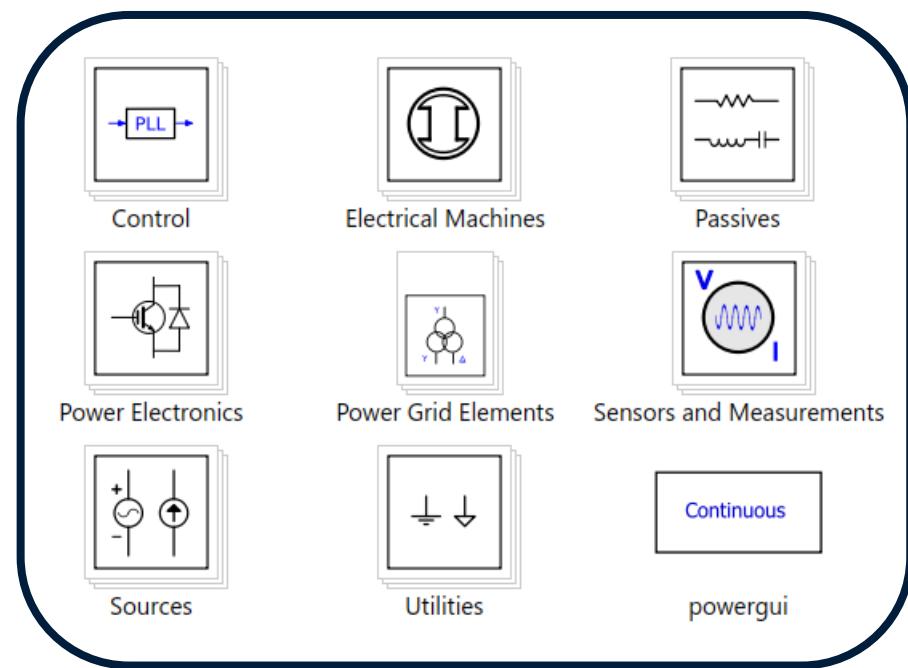
SIMULINK

# Библиотеки для построения ИМО электроэнергетических объектов

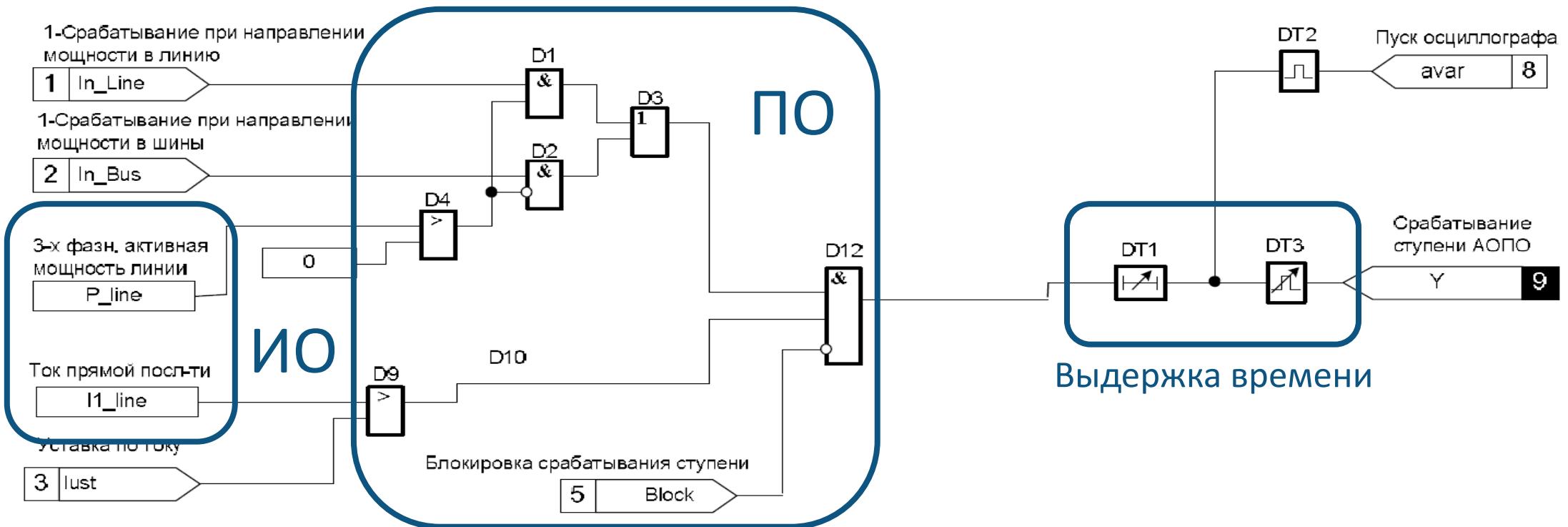
Simscape/Electrical



Simscape/Electrical/Specialized Power Systems



# Алгоритм АОПО



Типовой алгоритм одной ступени функции АОПО с учетом направления мощности по СТО ПАО «ФСК ЕЭС»

# Почему разработчику нужен свой собственный инструмент для тестирования и отладки?

Срочная наладка  
все РЕТОМы в «полях»



Центр моделирования



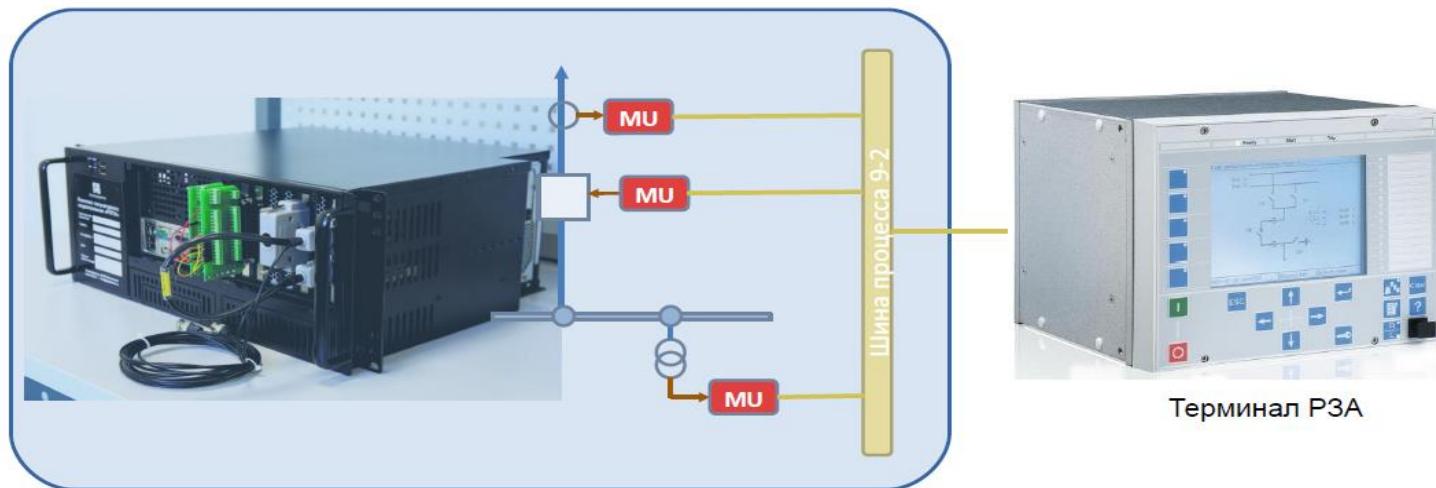
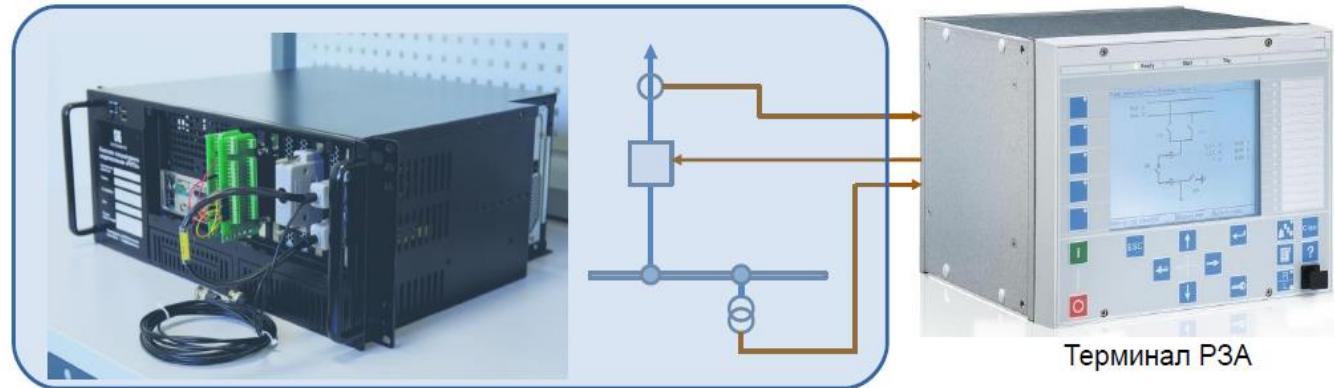
# Тестирование в реальном времени на КПМ РИТМ

- Исследование функционирования компонента или полной встраиваемой системы в реальных рабочих условиях:
  - Детерминизм выполнения задач
  - Учет частоты дискретизации
  - Синхронизация задач
  - Учет работы интерфейсов
- Распространенные виды тестирования:
  - **Быстрое прототипирование** алгоритмов управления (Rapid Prototyping) (Rapid Prototyping))
  - **Полунатурное моделирование** объекта управления (Rapid Prototyping) (Hardware-in-the-loop, HIL))
  - Сбор данных и обработка сигналов



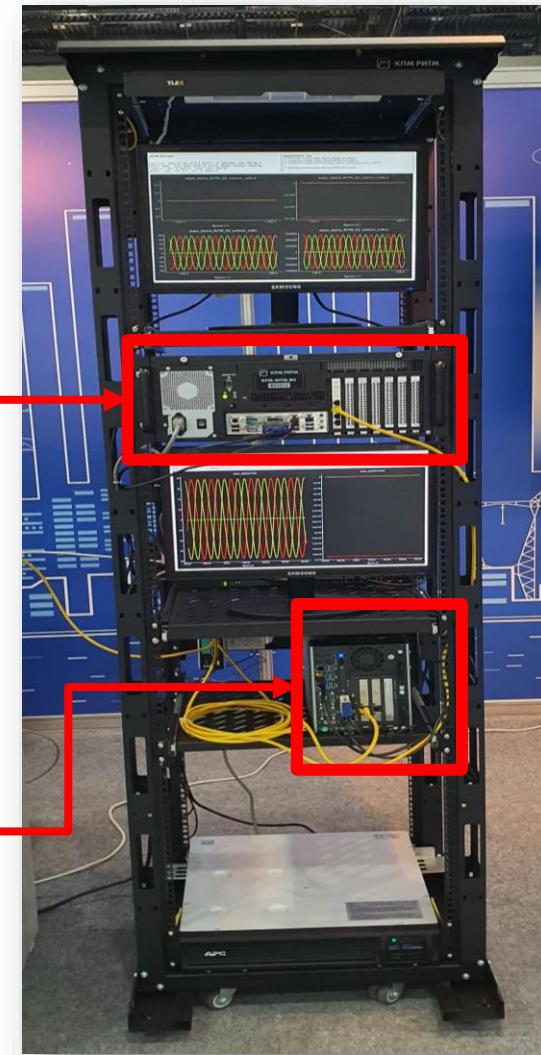
# Способы соединения устройств

- Подключение аналоговым по цепям тока и напряжения

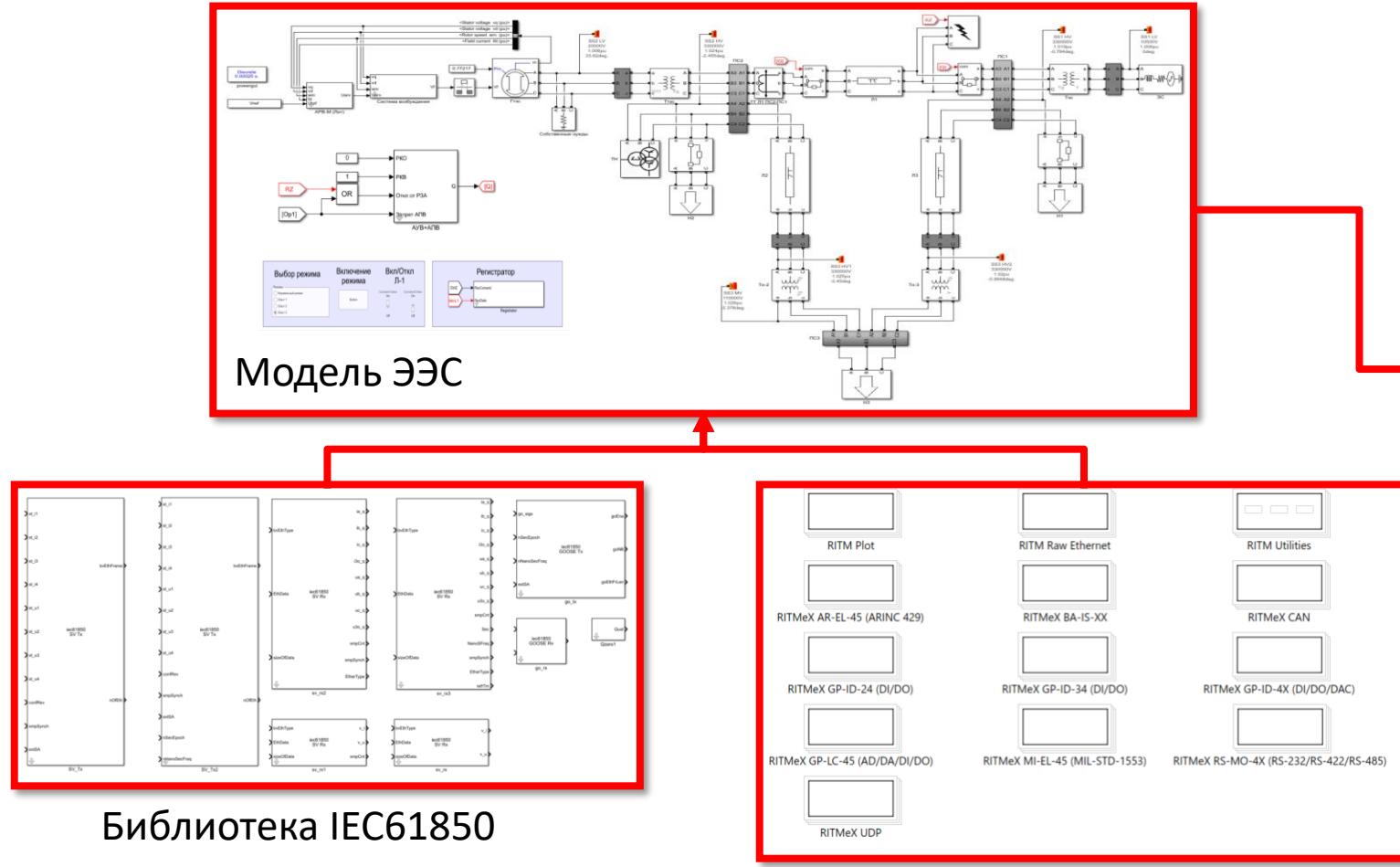


- Цифровой способ соединения на основе IEC61850

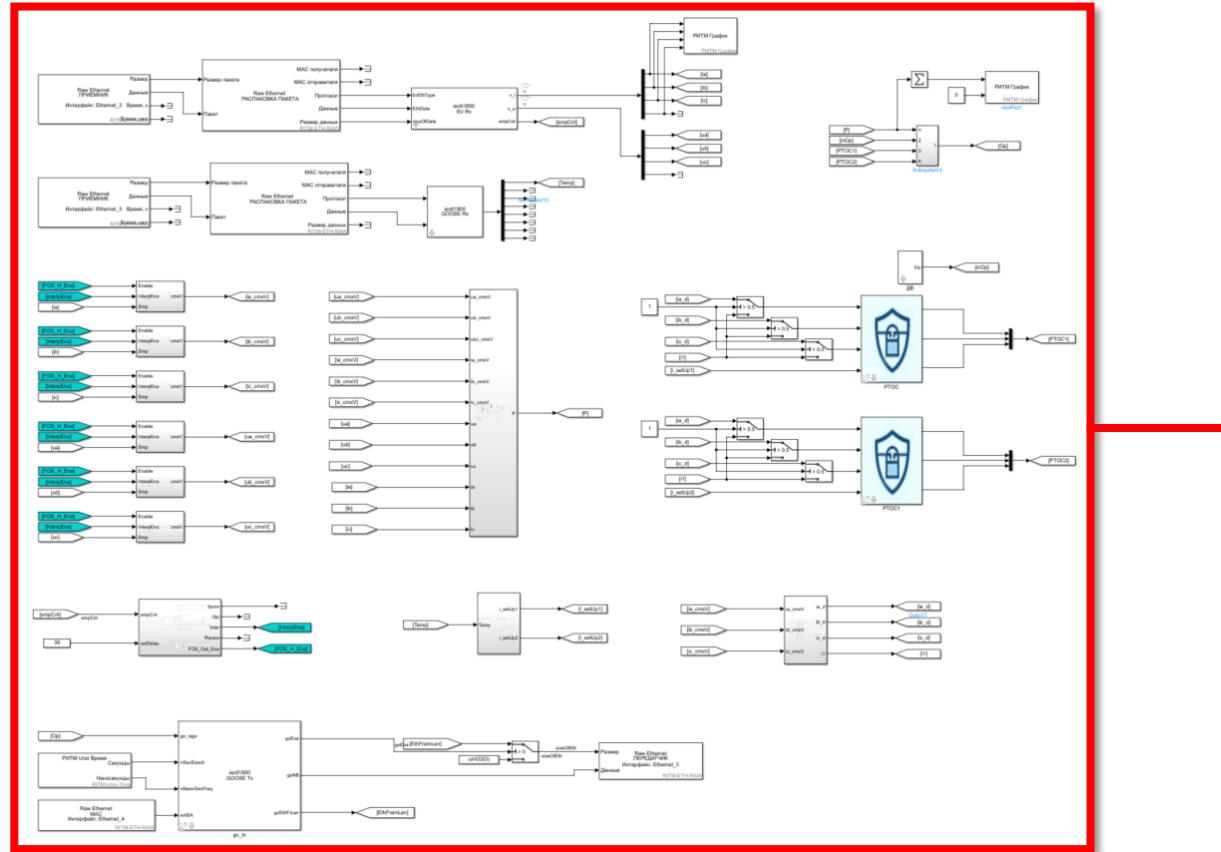
# Стенд двойника цифровой ПС для испытания ПА



# Стенд двойника цифровой ПС для испытания ПА

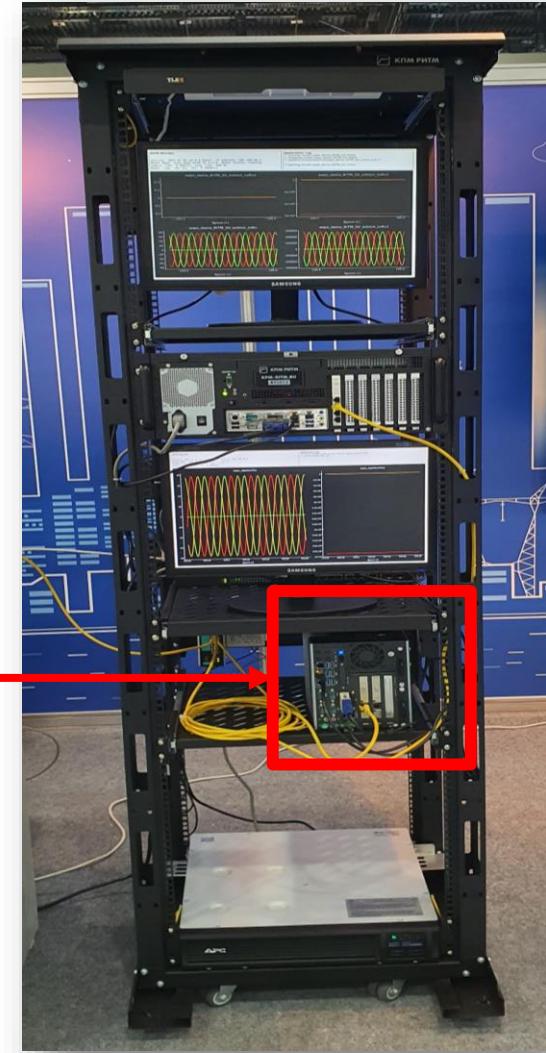


# Стенд двойника цифровой ПС для испытания ПА

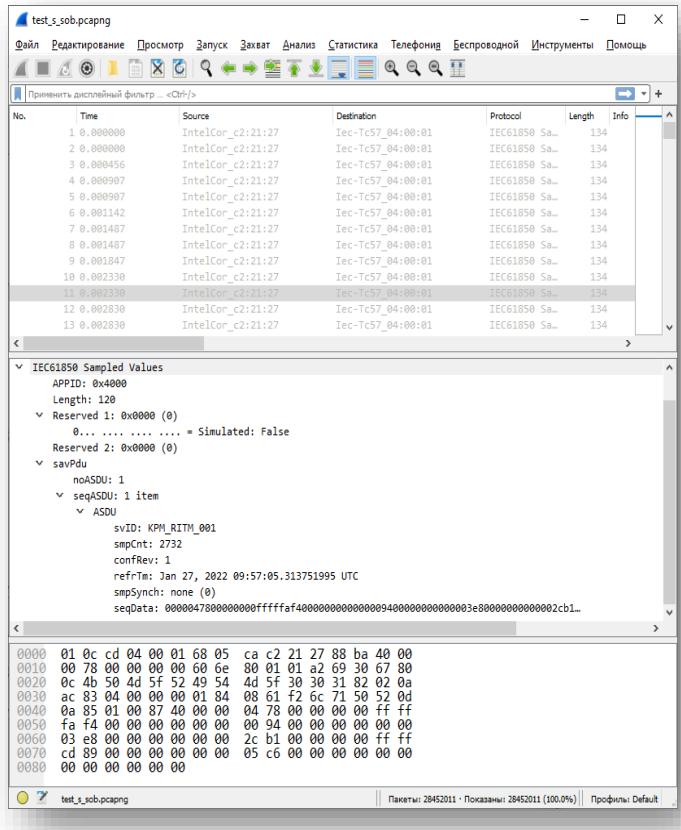


## Разработанный алгоритм

## Автоматики ограничения перегрузки оборудования



# Стенд двойника цифровой ПС для испытания ПА

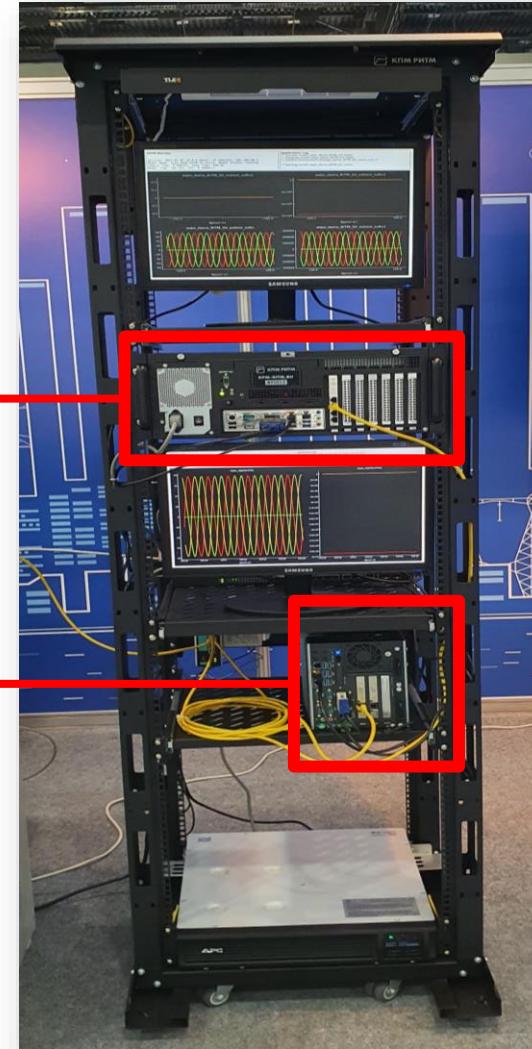
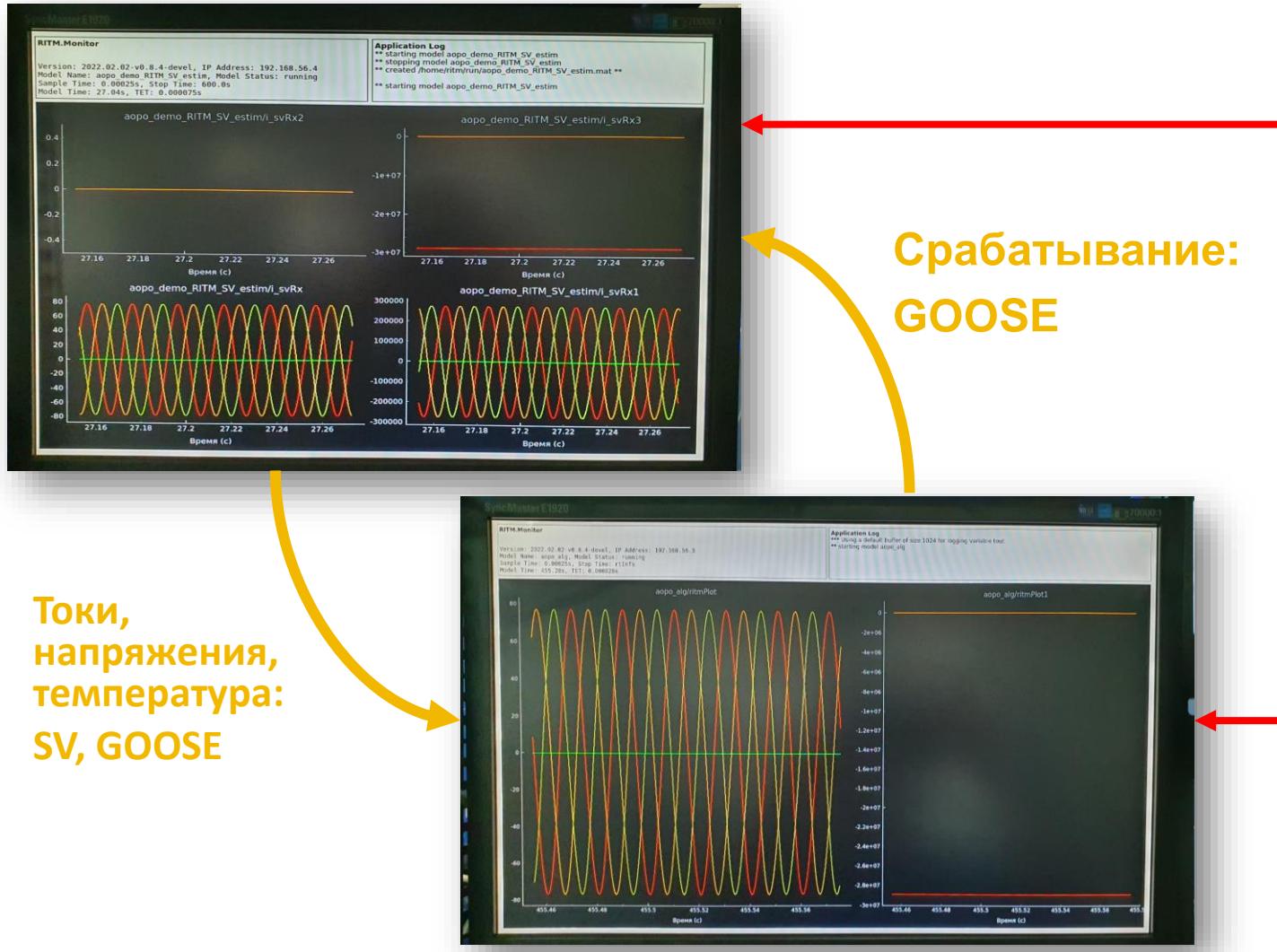


Шина процесса по  
IEC61850 для обмена

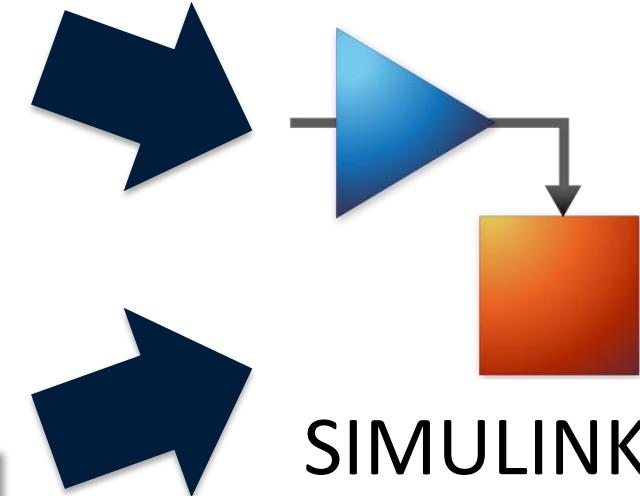
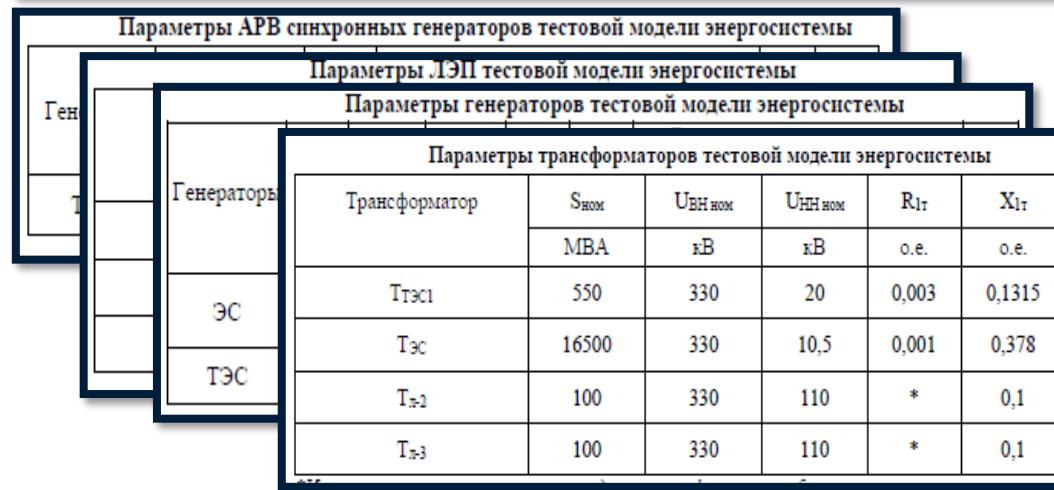
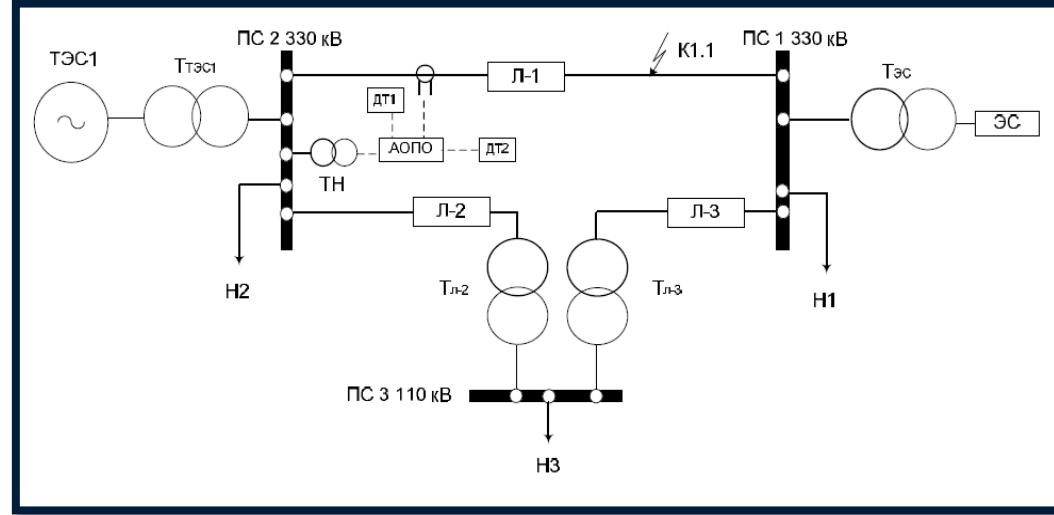
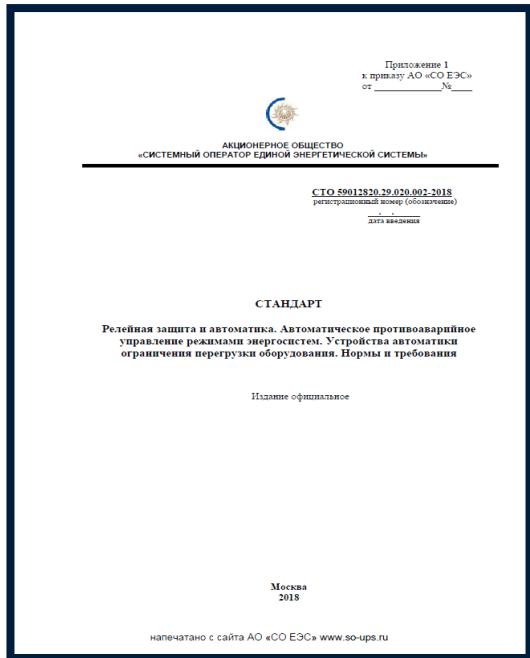
- Значений тока и напряжения (SV)
- Сигналов срабатывания и температуры (GOOSE)



# Стенд двойника цифровой ПС для испытания ПА



# Тестовая модель ЭЭС



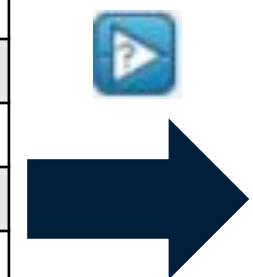
# Соответствие модели отраслевым стандартам

Параметр режима	Значение параметра режима по СТО
Утэс1, кВ	20,12
Ртэс1, МВт	448,9
Рэс, МВт	15710
Уэс, кВ	10,56
Упс1, кВ	335,7
Упс2, кВ	335,7
Упс3, кВ	112,2
Рн1, МВт	550,9
Рн2, МВт	475,8
Рн3, МВт	23,8

Load Flow  
Tool

Значение параметра режима в модели	Точность на РИТМ, %
20,13	0,04
448,39	0,11
609,47	-
10,52	0,4
334,91	0,24
336,39	0,21
112,32	0,11
550,93	0,005
475,82	0,003
23,81	0,001
Средняя погрешность параметров режима	0,124

Parameter  
Estimator

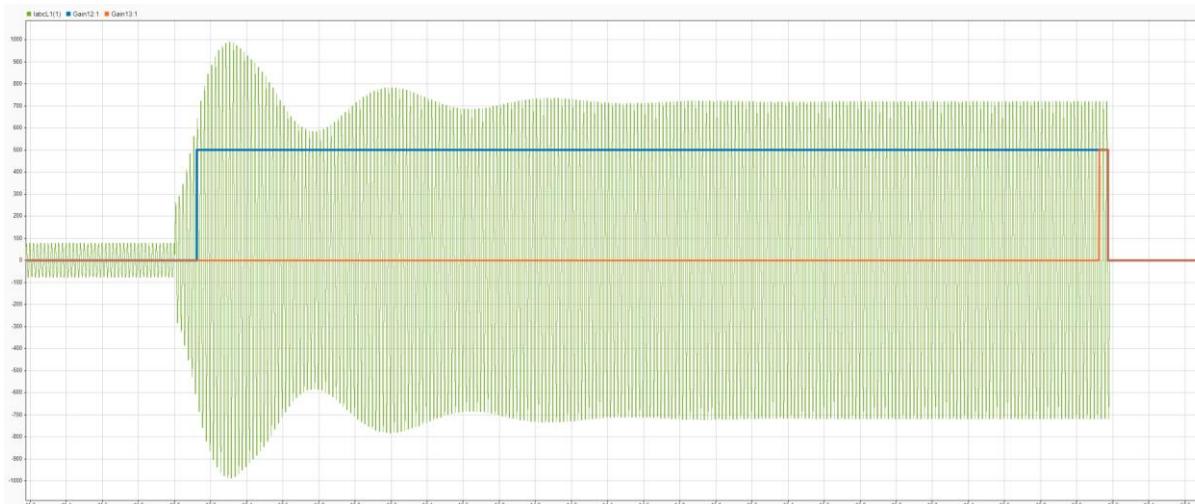


Значение параметра режима в модели	Точность на РИТМ, %
20,121	0,004
448,9	0,00016
608,91	-
10,56	0,00013
335,72	0,006
335,68	0,007
112,21	0,0096
550,9	0,0007
475,8	0,0007
23,8	0,0009
Средняя погрешность параметров режима	0,003

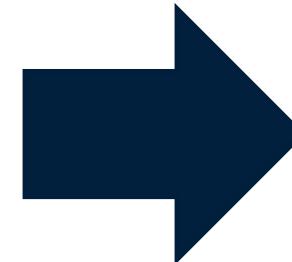
Погрешность результатов -  
тысячные доли процентов

# Проведение автоматического тестирования устройств

Обработка результатов автоматического тестирования на **КПМ РИТМ** с помощью программных средств



N-итераций



N-часов

## Протокол автоматического тестирования

### Опыт №9

#### Цель испытаний:

Проверка срабатывания при направлении перетока активной мощности по ЛЭП в контролируемом направлении

#### Настройка устройства АОПО:

Заданы исходные уставки.

#### Аварийное возмущение:

Отключение нагрузки Н1. Токовая нагрузка по Л-1 превышает уставку срабатывания устройства АОПО.

#### Корректное действие устройства АОПО:

Срабатывание через заданную выдержку времени с выдачей УВ.

## Результаты серии испытаний

Всего тестов было выполнено: 10

Всего было затрачено времени на выполнение набора тестов: 200.012624 секунд.

### Результаты работы 1 ступени:

Всего правильных пусков: 10.000000

Всего случаев неправильного пуска: 0.000000

Всего правильных срабатываний: 9.000000

Всего случаев неправильного срабатывания: 1.000000

### Испытания с неправильным срабатыванием ступени:

\* номер испытания: 6 описание: некорректное срабатывание

### Результаты работы 2 ступени:

Всего правильных пусков: 10.000000

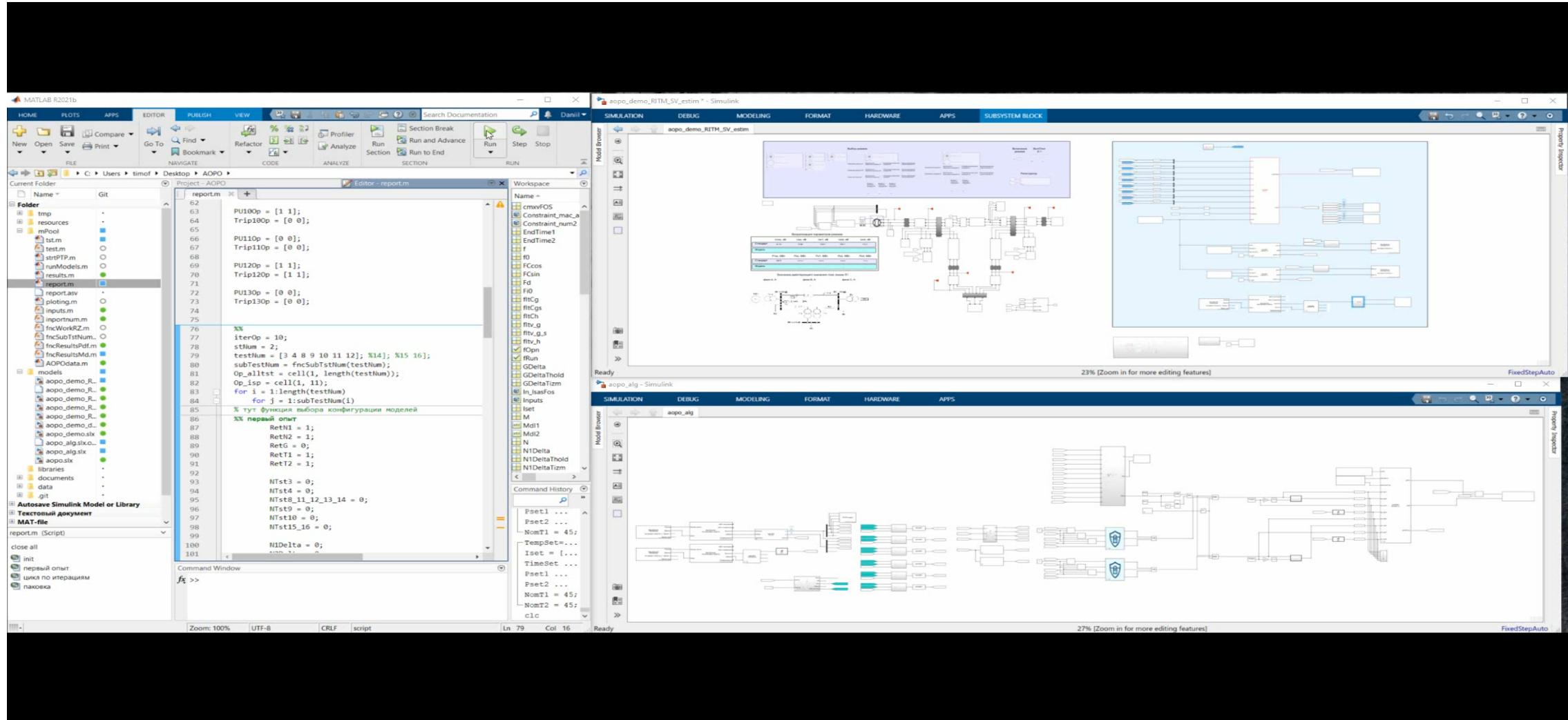
Всего случаев неправильного пуска: 0.000000

Всего правильных срабатываний: 10.000000

Всего случаев неправильного срабатывания: 0.000000

1

# Проведение автоматического тестирования устройств



# Выходы

- Возможности среды моделирования позволяют реализовывать **точные модели электроэнергетических объектов**
- Широкие возможности по исследованиям алгоритмов в **динамике** и **построение гибких моделей для испытаний**
- **КПМ РИТМ**, в качестве основного инструмента разработчика цифровой релейной защиты и противоаварийной автоматики, покрывает все стадии процесса вплоть до **сертификационных испытаний**.

[tech@exponenta.ru](mailto:tech@exponenta.ru)  
[exponenta.ru](http://exponenta.ru)



**ЭКСПОНЕНТА**  
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Спасибо за внимание!**

**Задавайте Ваши вопросы**