НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ОПОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# Опыт использования симулятора PSCAD в образовательных целях и для научных исследований

**Докладчик:**
***Лоскутов Антон Алексеевич, к.т.н.,***
***доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»***

3-6 декабря 2019 г. Международный форум «Электрические сети 2019»

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

Программный комплекс PSCAD используется для подготовки бакалавров и магистров по направлению **13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»** при проведении лабораторных и практических работ по дисциплинам:

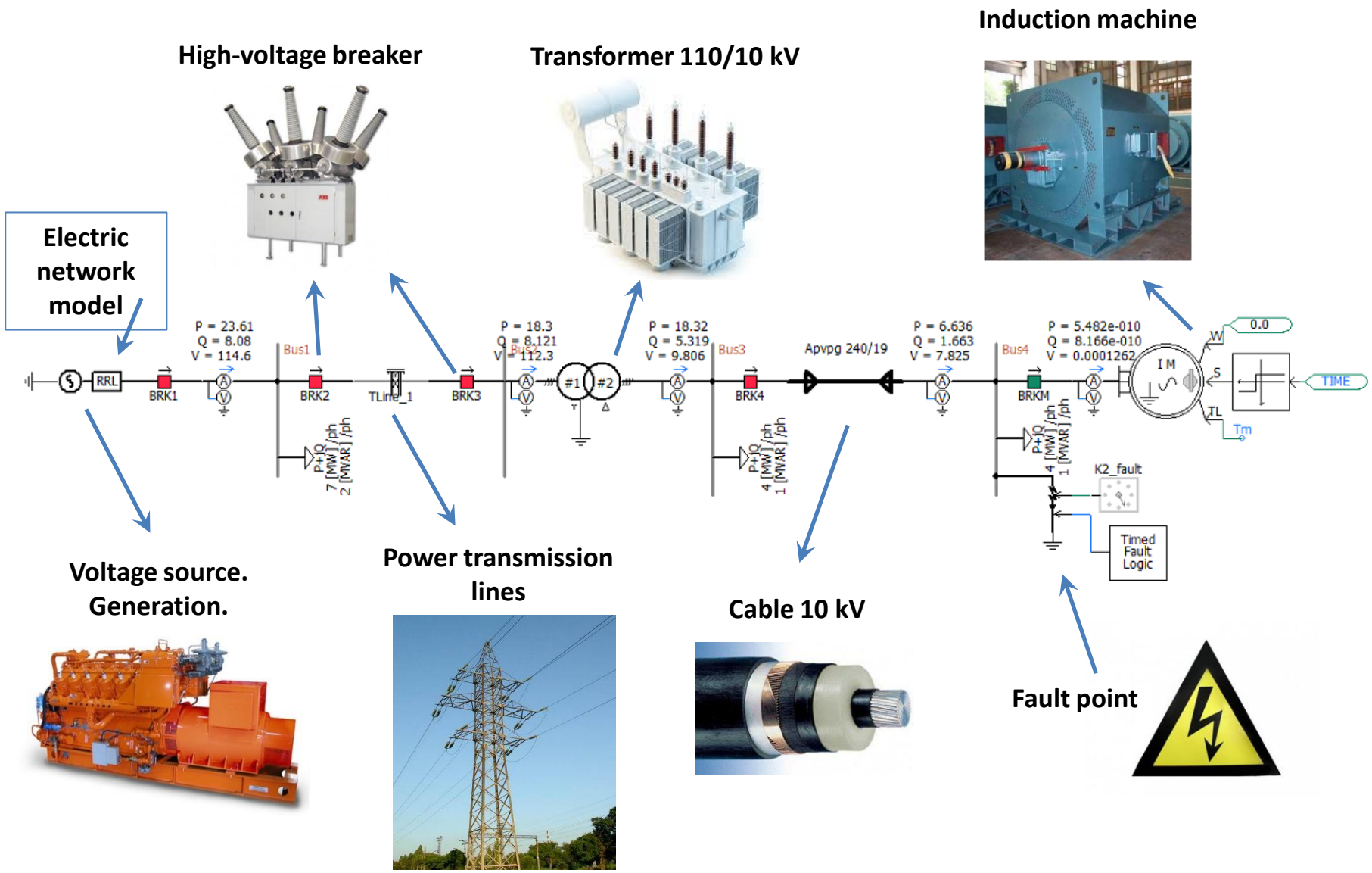
- Компьютерное моделирование систем электроснабжения;
- Автоматизация систем электроснабжения;
- Программные продукты в электроэнергетике;
- Применение ЭВМ.

**Достоинства имитационного моделирования в PSCAD:**

- моделирование не требует прерывания текущей деятельности реального объекта;
- динамический характер отображения процессов в моделируемом объекте;
- использование в качестве средства обучения, как альтернатива лабораторным стендам;
- возможность учета большого числа случайных факторов;
- возможность проведения статистических экспериментов;
- сравнительная простота введения модификаций в модель;
- возможность управлять масштабом времени.

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

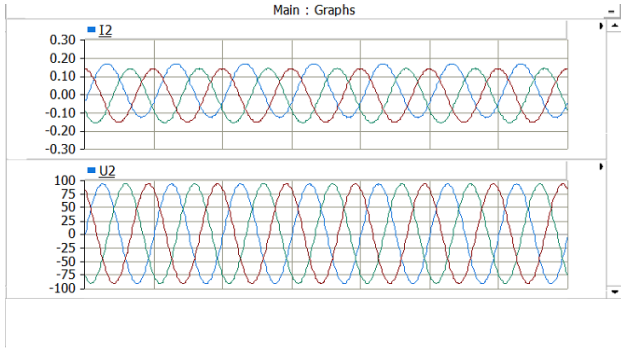
# Применение симулятора PSCAD в учебных целях



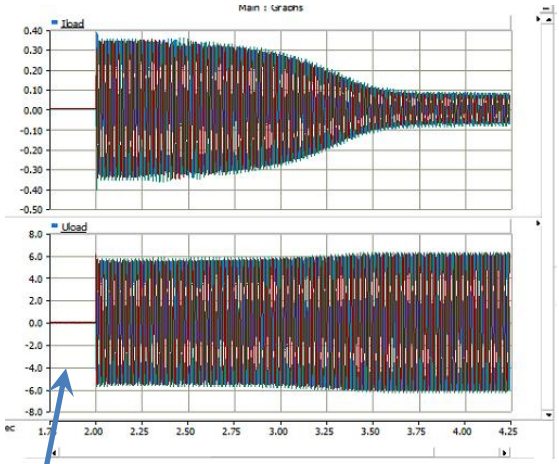

- Ознакомление с функциональными возможностями PSCAD;
- Создание базовых моделей, систем электроснабжения;
- Знакомство с библиотеками;
- Поиск исходных данных для моделирования компонентов модели;
- Исследование электромагнитных переходных процессов

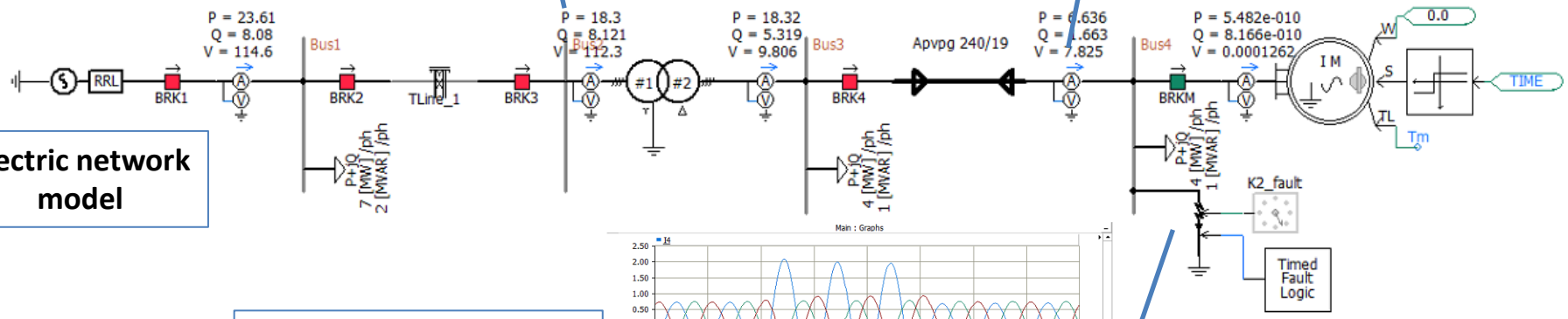
# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

Current and voltage signals. Normal mode.



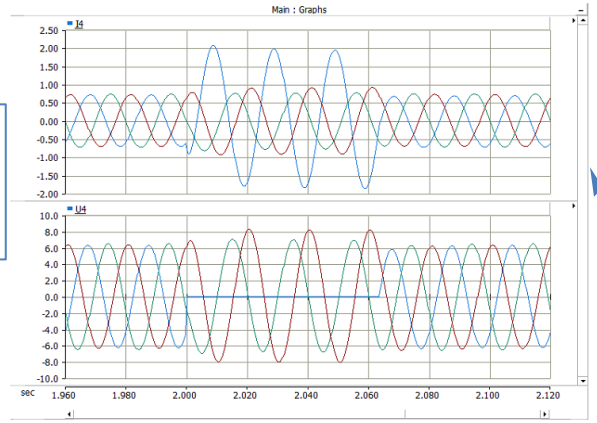

Current and voltage signals when the motor starts




Electric network model

Current and voltage signals. Single-phase earth fault




- Анализ результатов моделирования по осциллограммам
- Верификация результатов
- Корректировка параметров моделирования

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

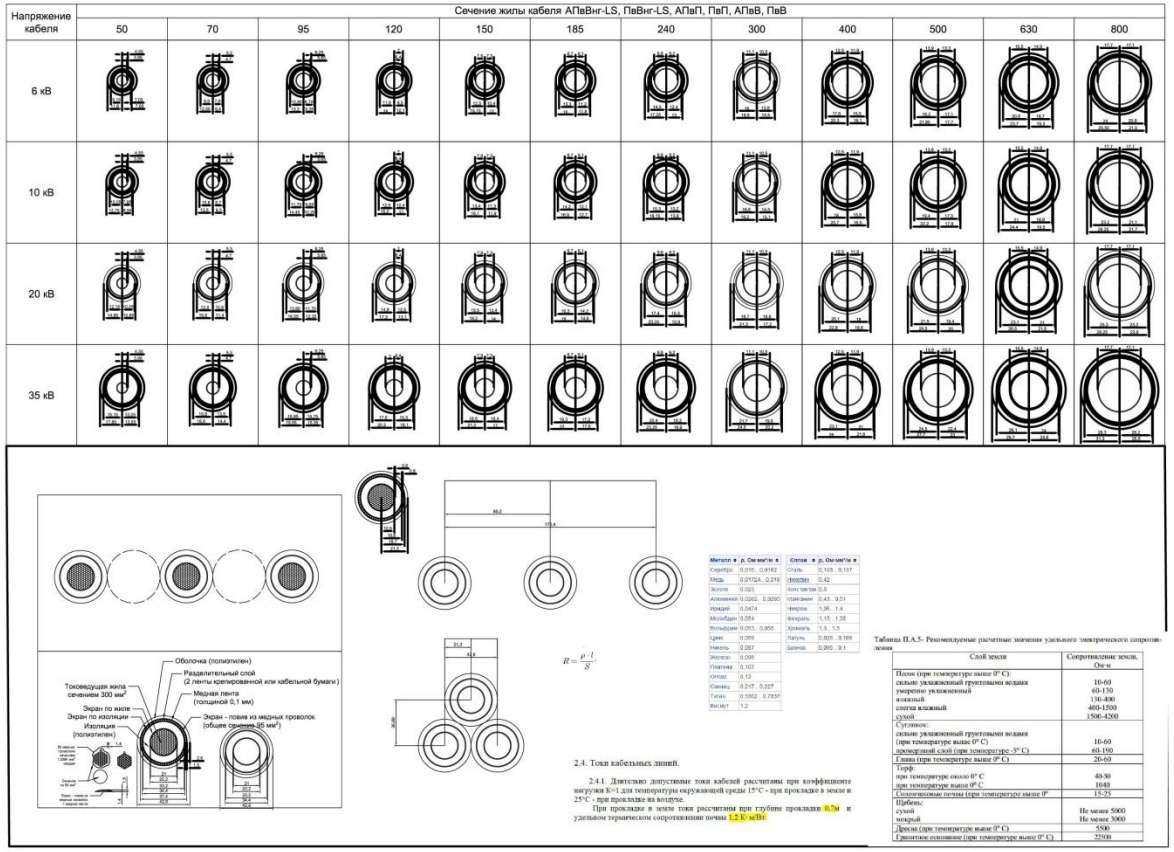
# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

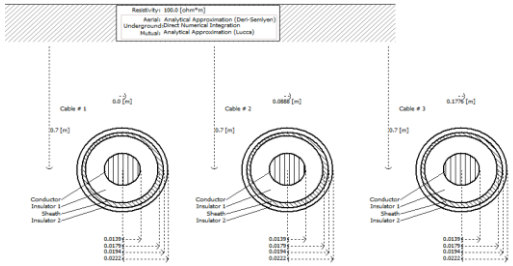
## Программа Microsoft Excel – база данных для формирования исходных данных для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена

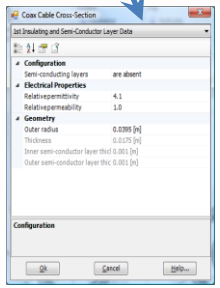
Параметры кабеля для PSCAD

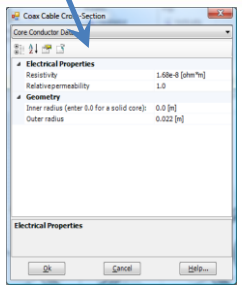
| Параметр | Значение | | |
|---|---|---|---|
| Сечение кабеля | 240 | мм2 | Рассматриваемое сечение кабеля (аллюминий) |
| Сечение токопроводящего экрана | 16 | мм2 | Рассматриваемое сечение экрана кабеля (медь) |

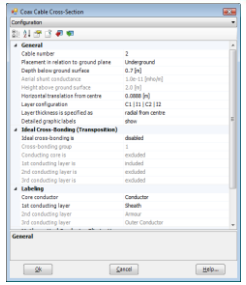
| Параметр | Значение | Ед. измерения | Обозначение | Описание |
|---|---|---|---|---|
| Layer Thickness is Specified As | radial from centre | | | |
| **Core Conductor Data** | | | | |
| Resistivity | 3,864 | 10^(-8)*Ом*м | | Объемное сопротивление сердечника |
| Relative Permeability | 1,000022 | о.е. | | Магнитная проницаемость для аллюминия |
| Inner Radius | 0 | м | | Внутренний радиус (не задается) |
| Outer Radius | 0,0092 | м | R1 | Радиус токопроводящей жилы |
| **1st Insulating Layer Data** | | | | |
| Semi-Conducting Layers | are present | | | Отображение толщины слоев радиальным способом |
| Relative Permittivity | 2,28 | о.е. | | Диэлектрическая проницаемость полиэтилена |
| Relative Permeability | 1 | о.е. | | Магнитная проницаемость полиэтилена |
| Outer Radius | 0,0153 | м | R2 | Внешний радиус изоляции |
| Thickness | 0,0055 | м | | Толщина изоляции |
| Inner Semi-Conductor Layer Thickness | 0,0006 | м | 1 | Толщина полупроводникового экрана по жиле |
| Outer Semi-Conductor Layer Thickness | 0,0006 | м | L2 | Толщина полупроводникового экрана по изоляции |
| **1st Conducting Layer Data** | | | | |
| Resistivity | 1,8 | 10^(-8)*Ом*м | | Объемное сопротивление медного экрана |
| Relative Permeability | 0,999994 | о.е. | | Магнитная проницаемость для меди |
| Outer Radius | 0,01606 | м | R3 | Внешний радиус медного экрана |
| **2nd Insulating Layer Data** | | | | |
| Relative Permittivity | 2,3 | о.е. | | Диэлектрическая проницаемость полиэтилена |
| Relative Permeability | 1 | о.е. | | Магнитная проницаемость полиэтилена |
| Outer Radius | 0,02025 | м | R4 | Внешний радиус кабеля |









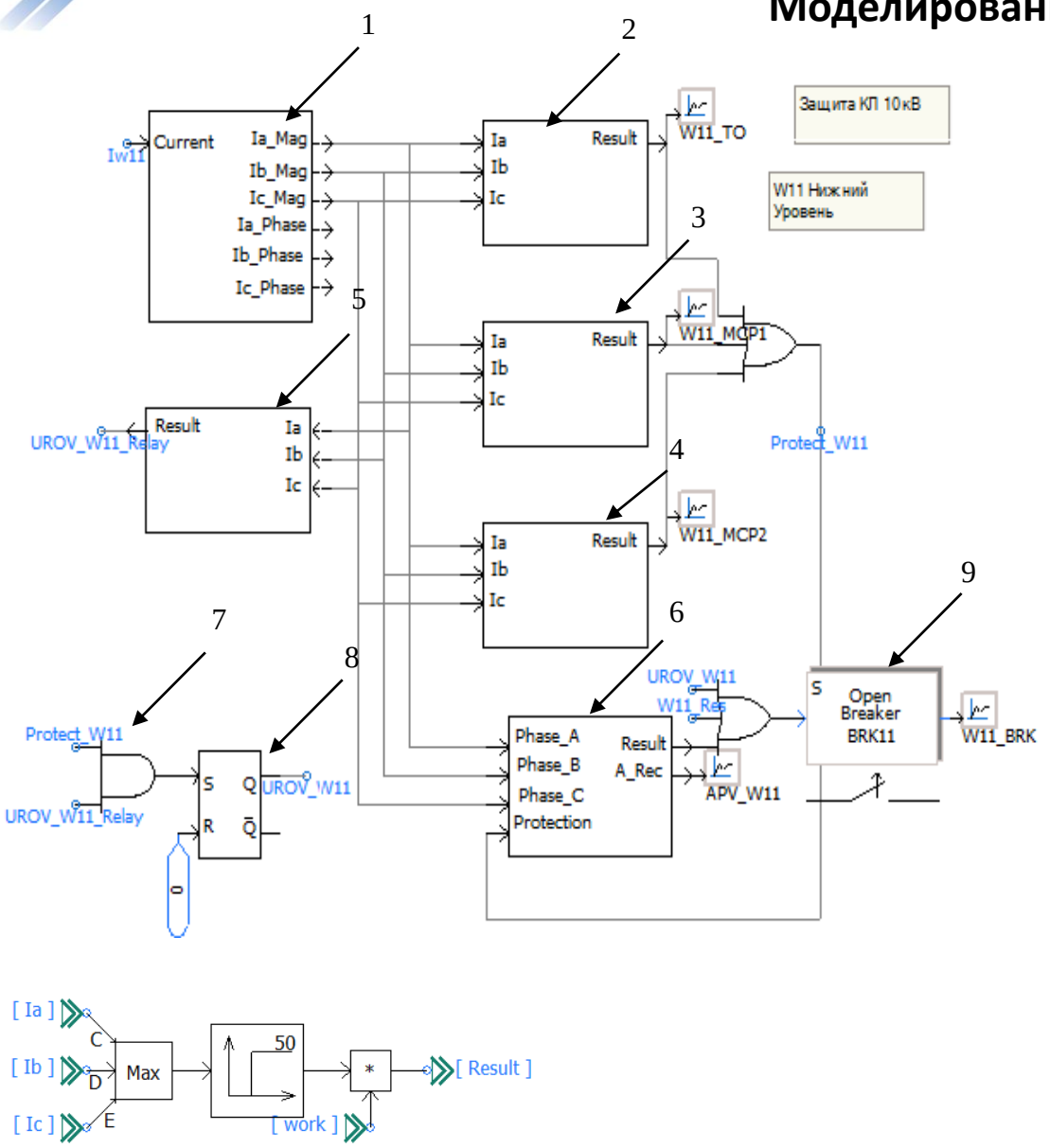
ТУ 16.К71-335-2004

1 — токопроводящая жила
2 — герметизирующий слой
3 — изоляция из сшитого полиэтилена
4 — экран по изоляции
5 — разделительный слой из водоблокирующей ленты
6 — экран из медных проволок
7 — разделительный слой
8 — герметизирующий слой из алюмополимерной ленты
9 — оболочка из полиэтилена

| Марка | Число жил | Сечение, мм² |
|---|---|---|
| АПвПг, АПвПуг, АПвП2г, АПвПу2г | 1 | 35,0—1000,0 |
| | 3 | 35,0—240,0 |

# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

**Моделирование релейной защиты ЛЭП 10 кВ**




1 – блок, реализующий АЦП сигнала с трансформаторов тока (ТТ) для цифровых реле;

2 – блок, реализующий алгоритм токовой отсечки (ТО);

3 – блок, реализующий алгоритм работы первой ступени максимальной токовой защиты (МТЗ1);

4 – блок, реализующий алгоритм работы второй ступени токовой отсечки (МТЗ2);

5 – блок, реализующий алгоритм работы избирательного органа устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ);

6 – блок, реализующий алгоритм работы автоматического повторного включения (АПВ);

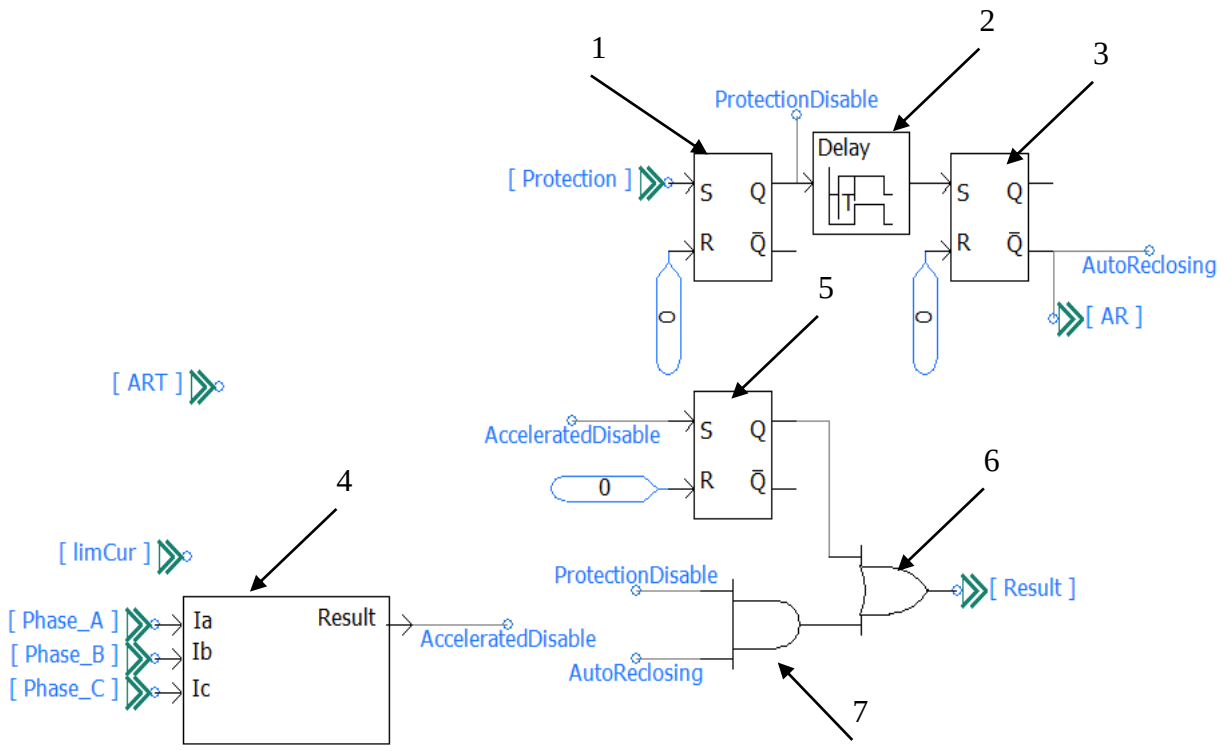
7 – блоки, реализующие алгоритм работы децентрализованного устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ);

8 – блоки, реализующие алгоритм отключения выключателя от первой ступени устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ);

9 – блок, реализующий подачу команды на отключение выключателя от работы защит или УРОВ.

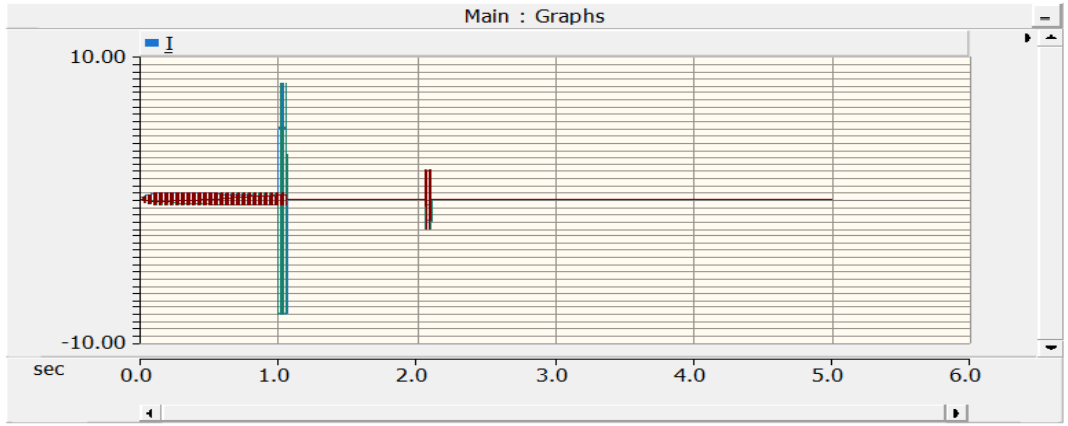
# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

**Моделирование алгоритма автоматического повторного включения (АПВ) встроенного в МТЗ КЛ 10 кВ**

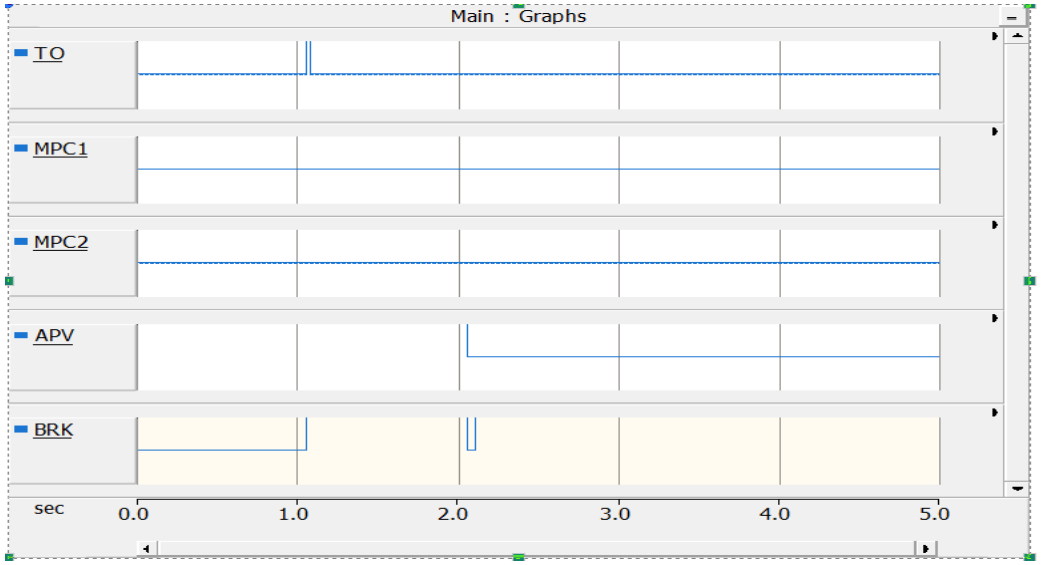



1,3,5 – *RS*-триггеры;
2 – элемент выдержки времени;
4 – алгоритм цифрового трехфазного максимального токового реле (ускоряемая ступень МТЗ);
6 – логический элемент ИЛИ;
7 – логический элемент И.

Осциллограмма тока при повреждении на ЛЭП

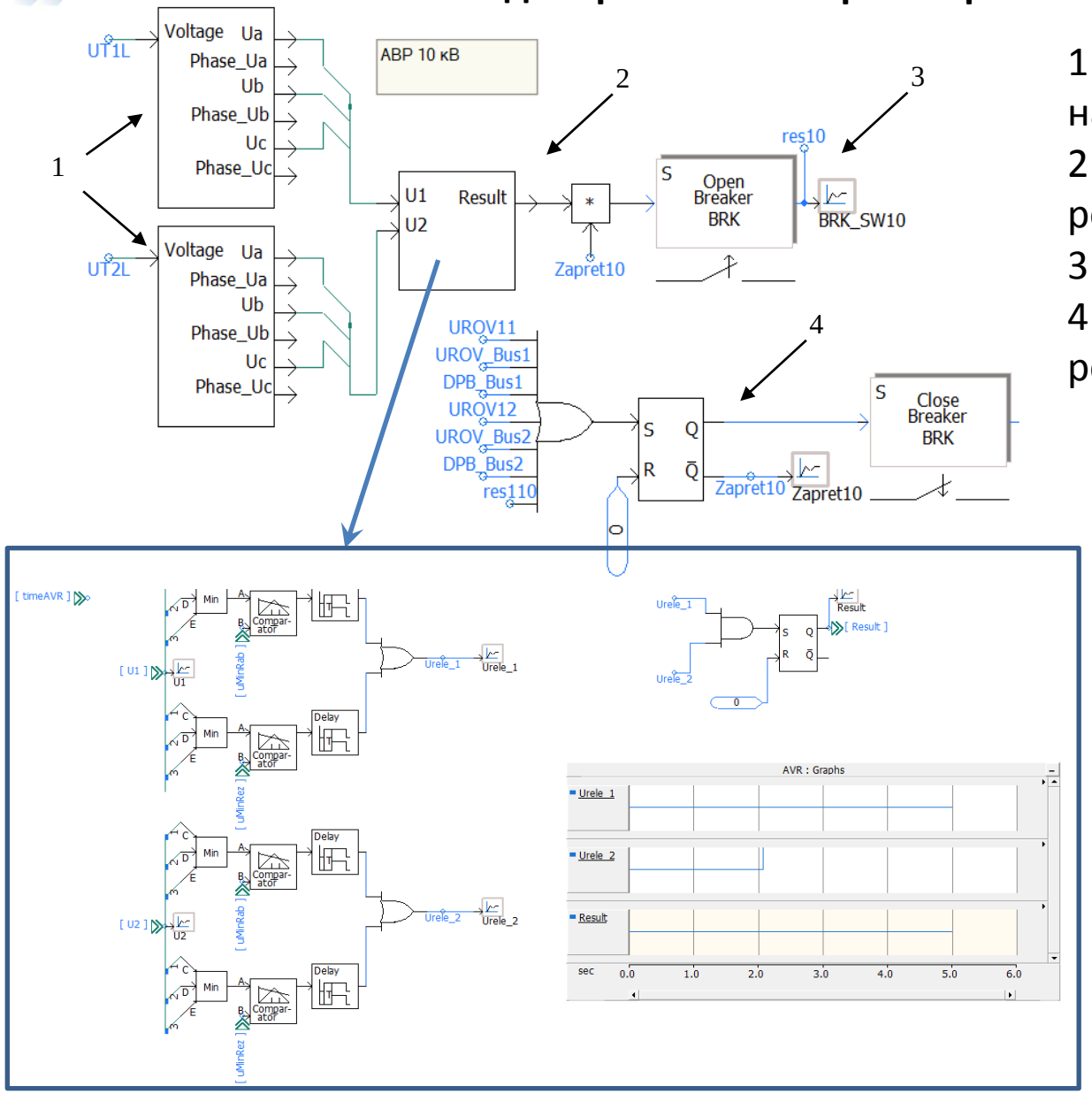



Работа алгоритма АПВ при устойчивом КЗ



# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

## Моделирование алгоритма работы автоматического включения резерва (АВР)



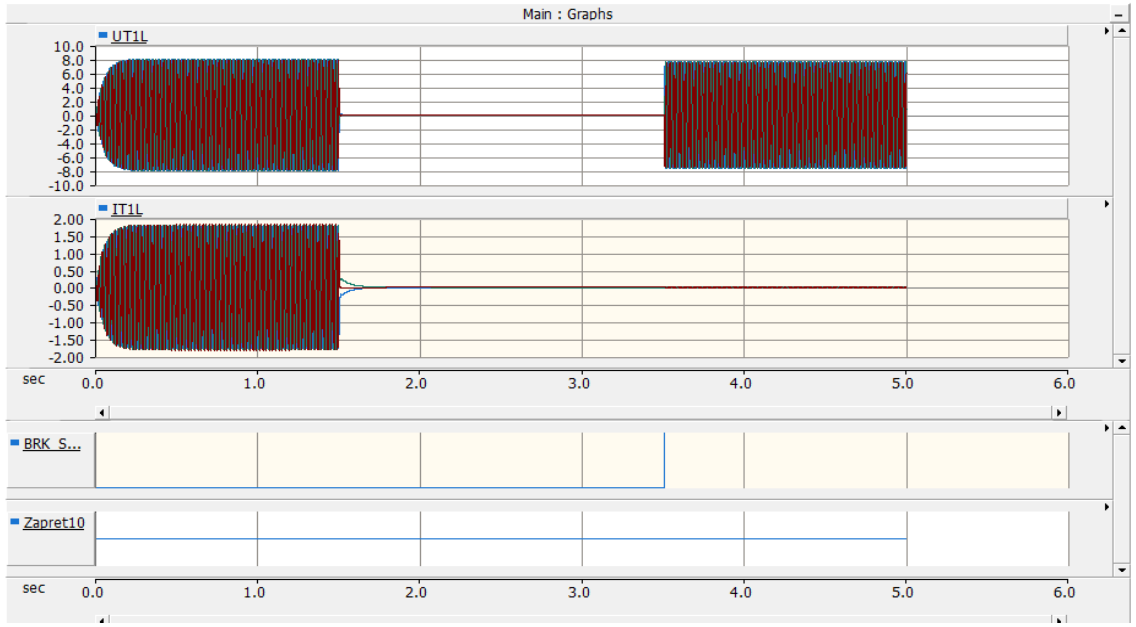

1 – алгоритм АЦП сигналов напряжения с трансформаторов напряжения (ТН).

2 – алгоритм принятия решения автоматического ввода резерва (АВР).

3 – алгоритм воздействия на силовой выключатель.

4 – алгоритм запрета срабатывания автоматического ввода резерва (АВР).

Диаграммы работы автоматического ввода резерва (АВР)

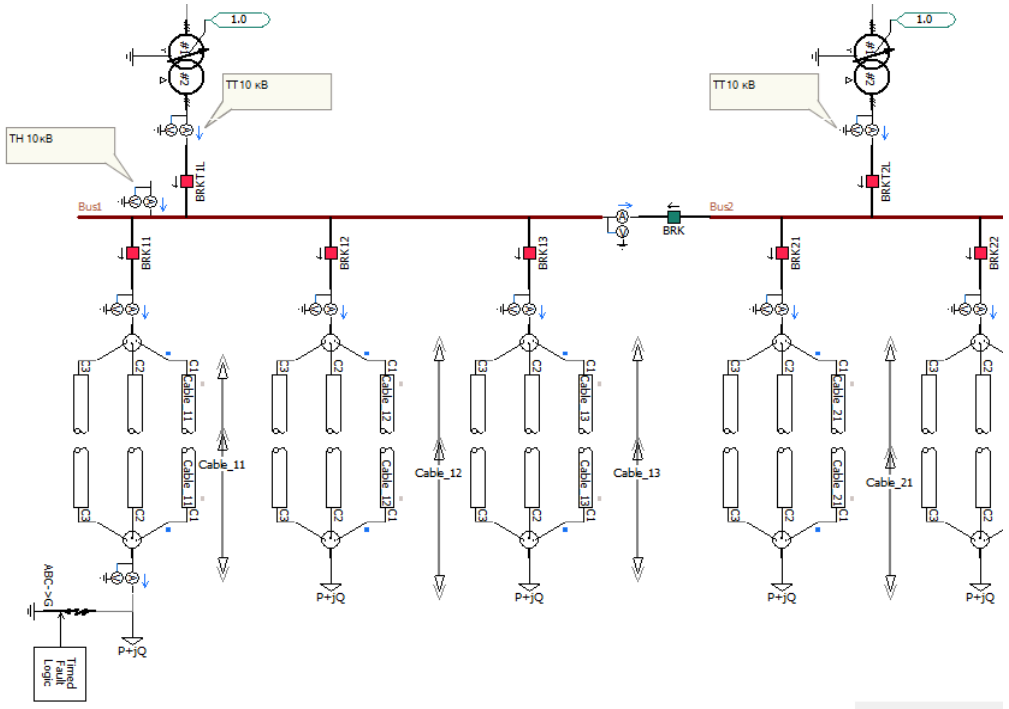


НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

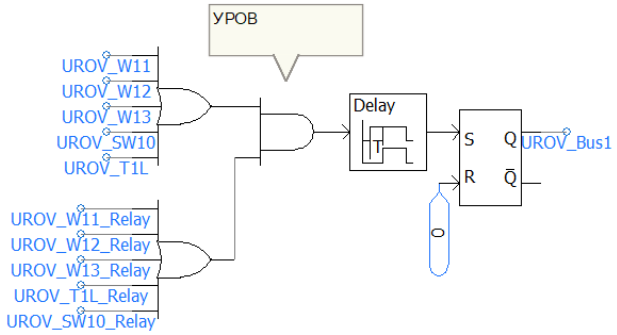
# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

## Моделирование алгоритма децентрализованного устройства резервирования отказа выключателя (УРОВ)

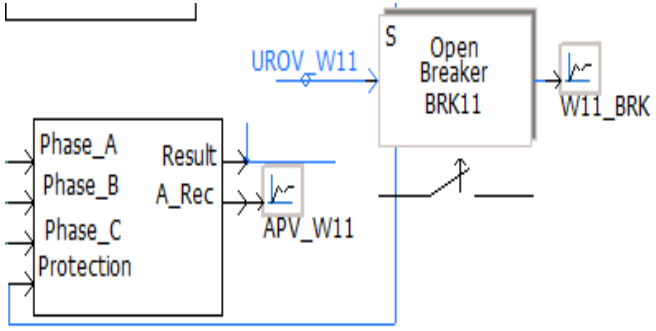
Однолинейная схема секции шин для демонстрации работы УРОВ



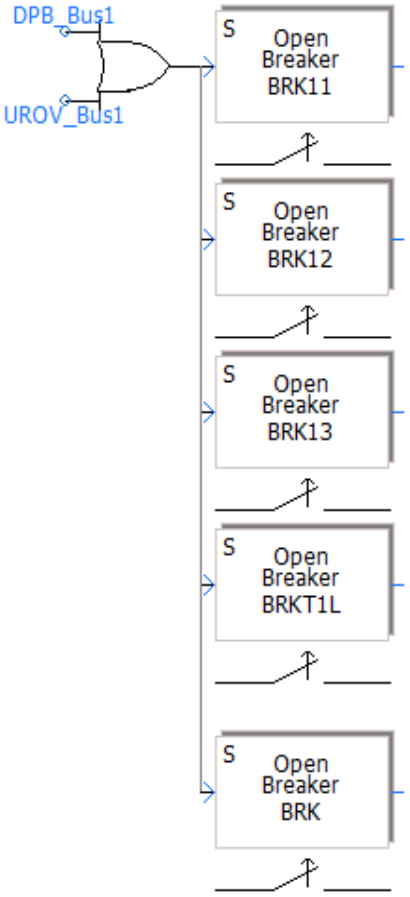

Внешний вид алгоритма Работы УРОВ




Внешний вид алгоритма УРОВ присоединения *W*11



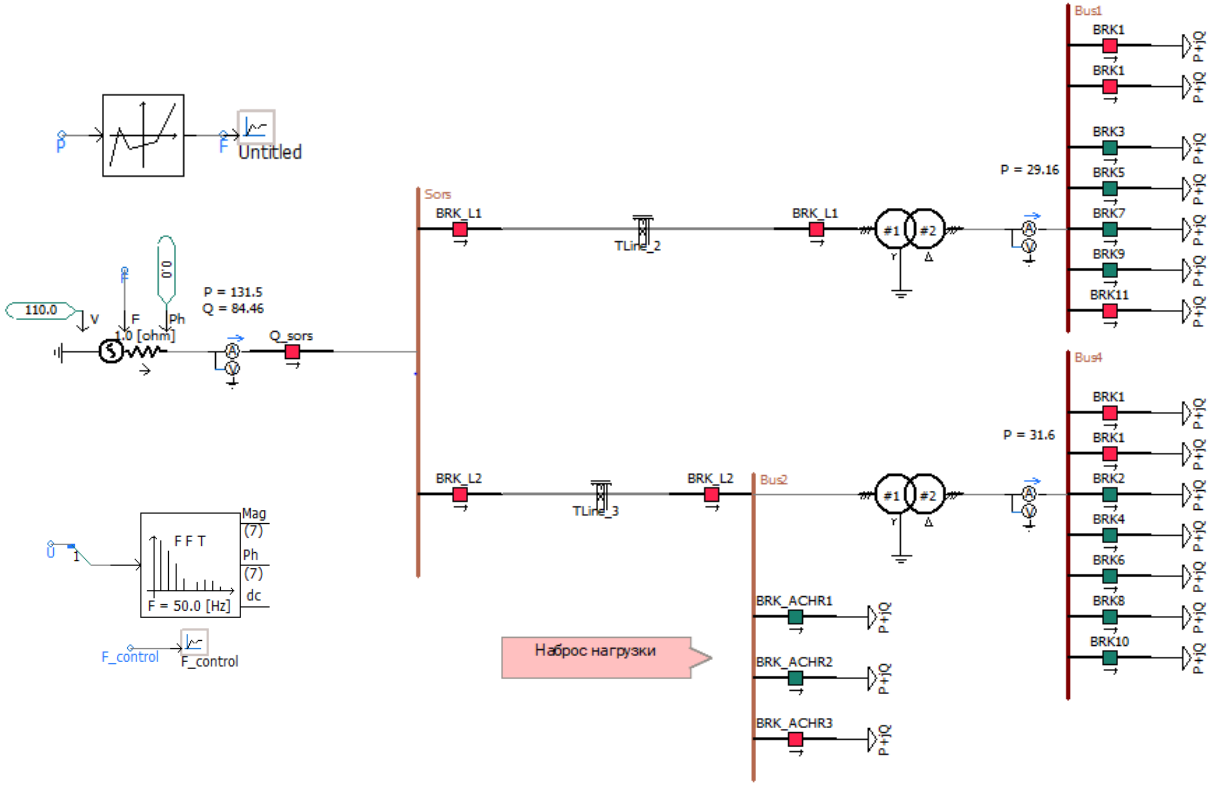

Алгоритм работы УРОВ при отказе выключателя секции шин



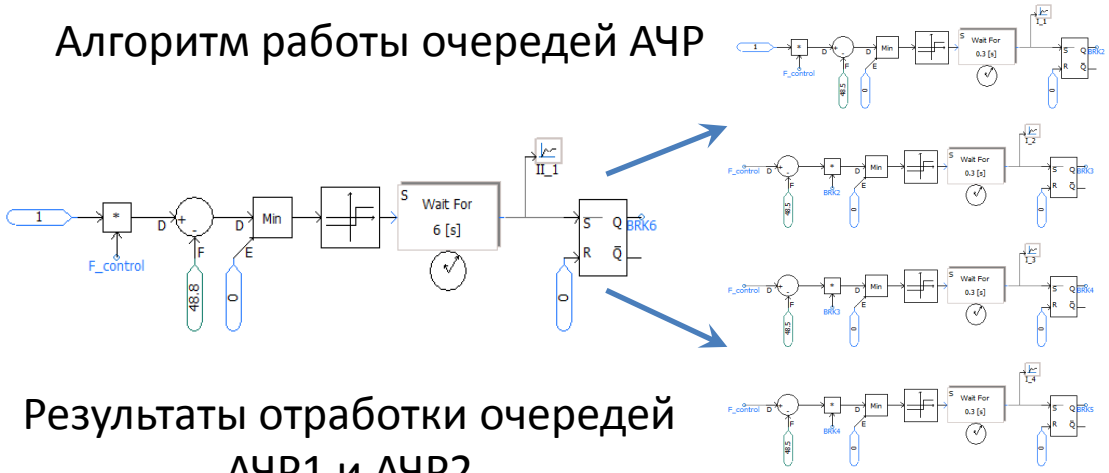
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

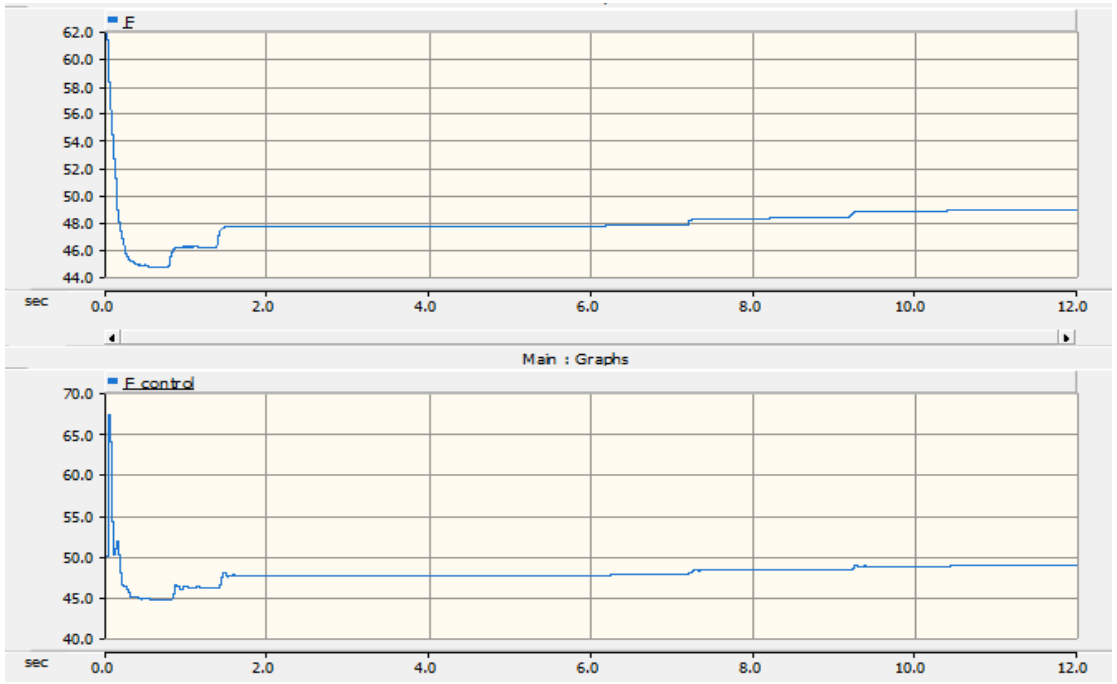
## Моделирование работы автоматики частотной разгрузки (АЧР)




Алгоритм работы очередей АЧР

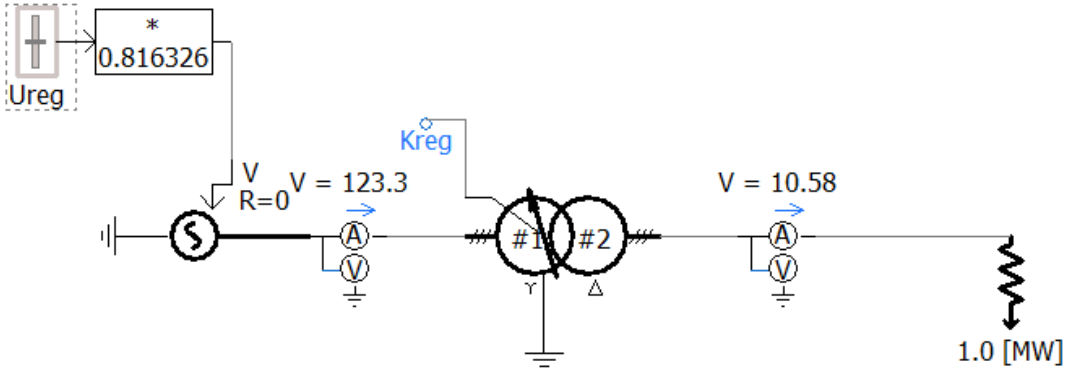



Результаты отработки очередей АЧР1 и АЧР2

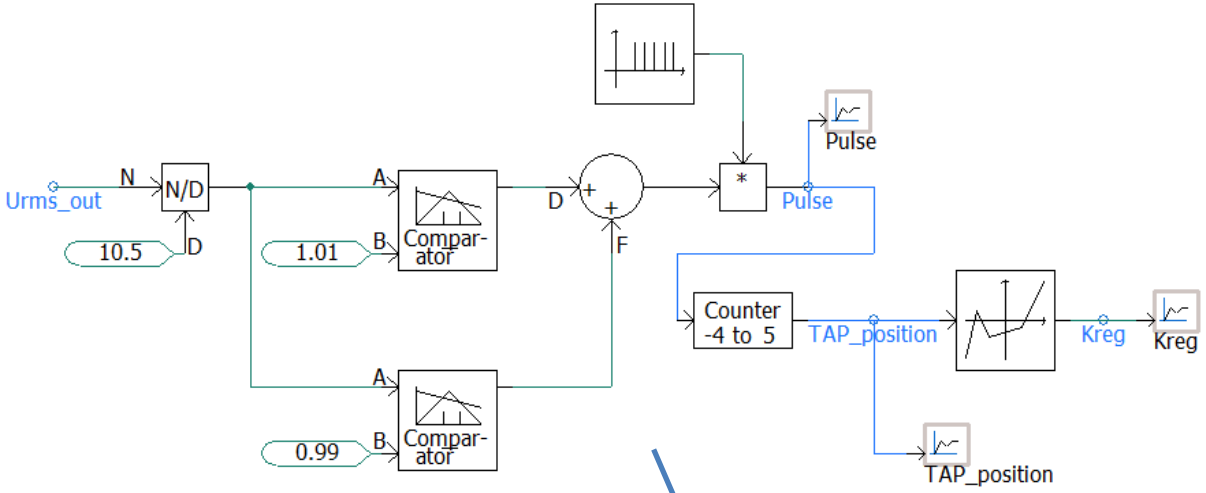


# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

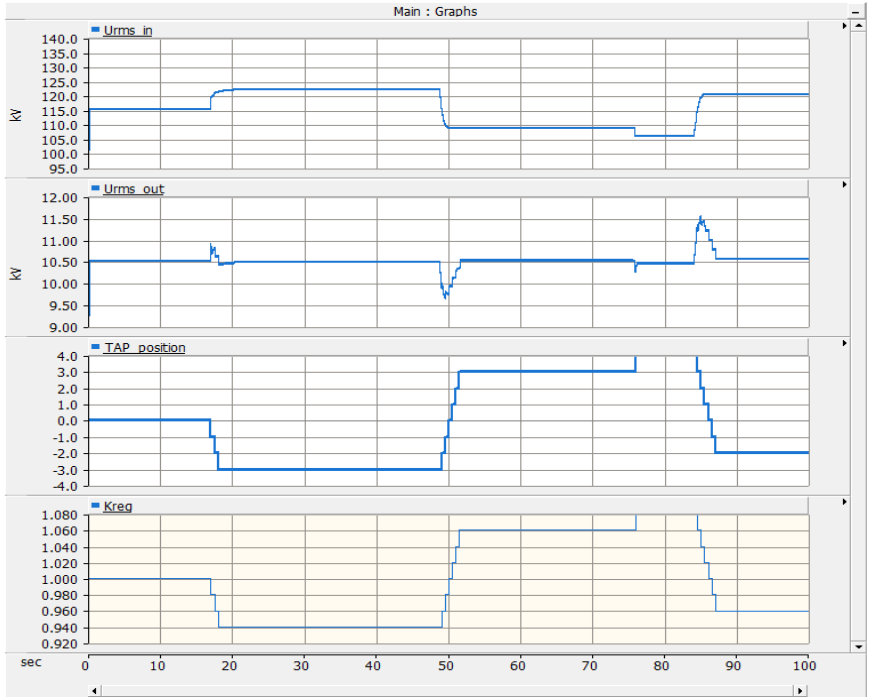
**Моделирование работы алгоритма регулирования напряжения на силовом трансформаторе 110/10 кВ**



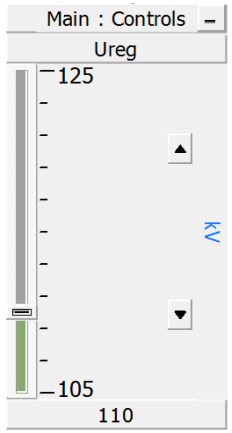

Модель РПН

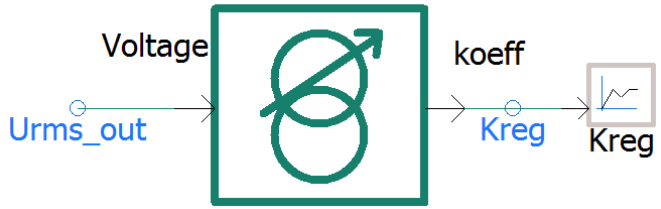



Результаты восстановления напряжения на шинах НН




Изменение уровня напряжения

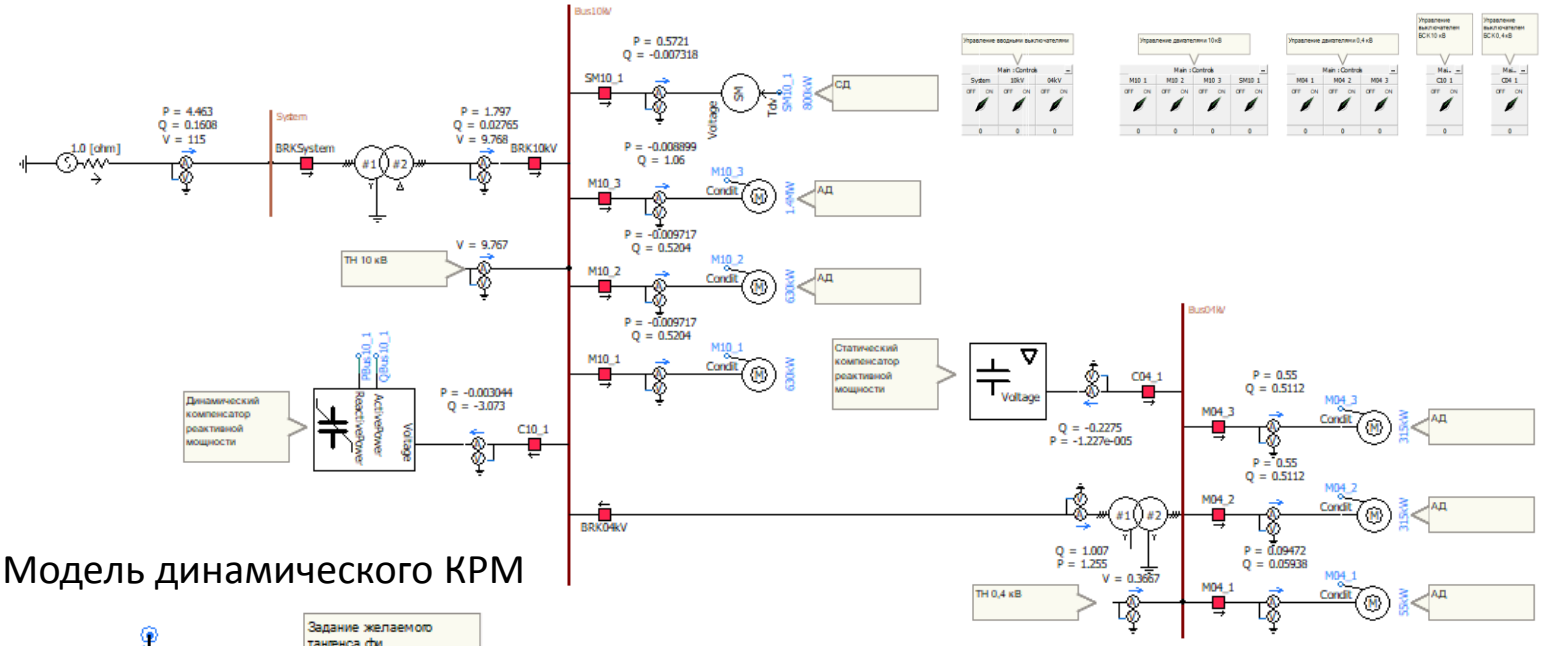


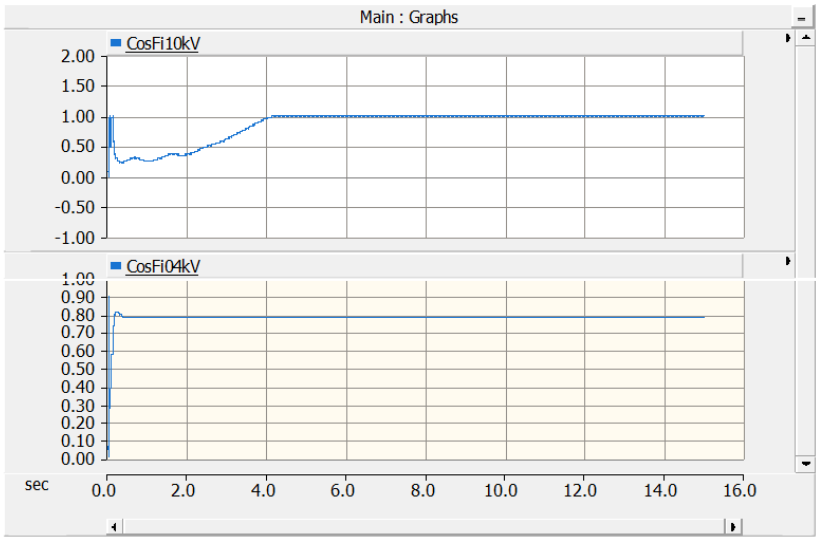
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

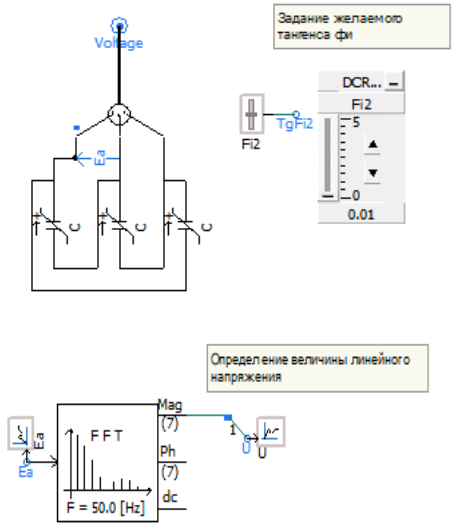
# Применение симулятора PSCAD в учебных целях

## Моделирование динамического компенсатора реактивной мощности

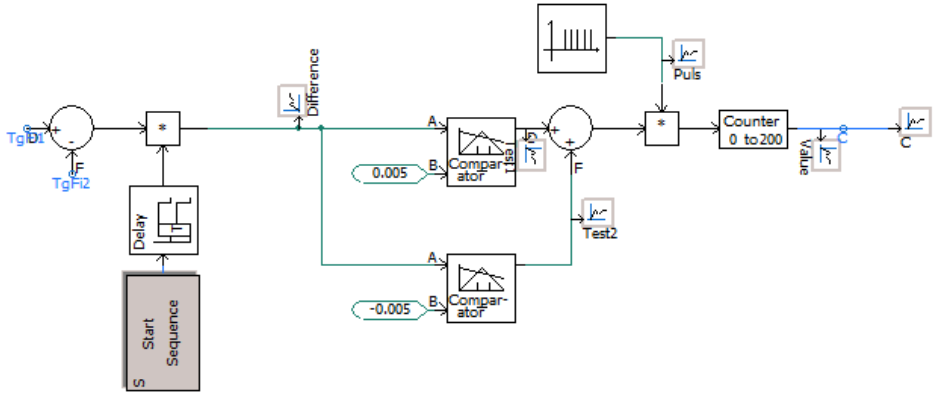


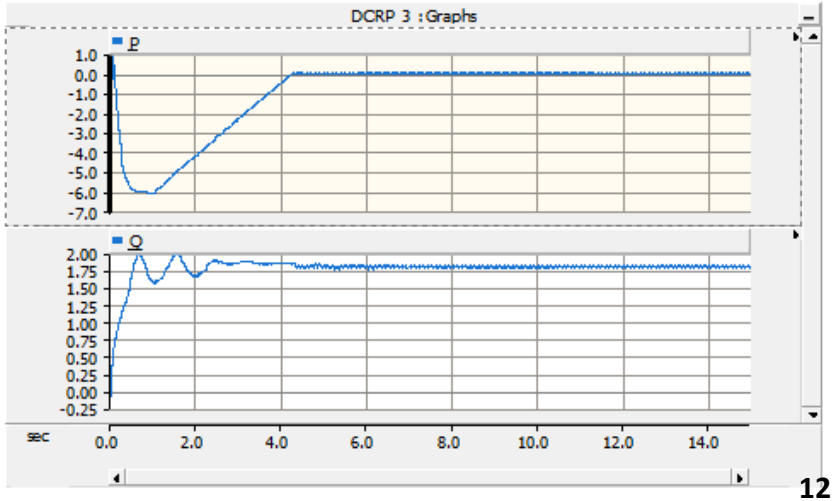

Модель динамического КРМ



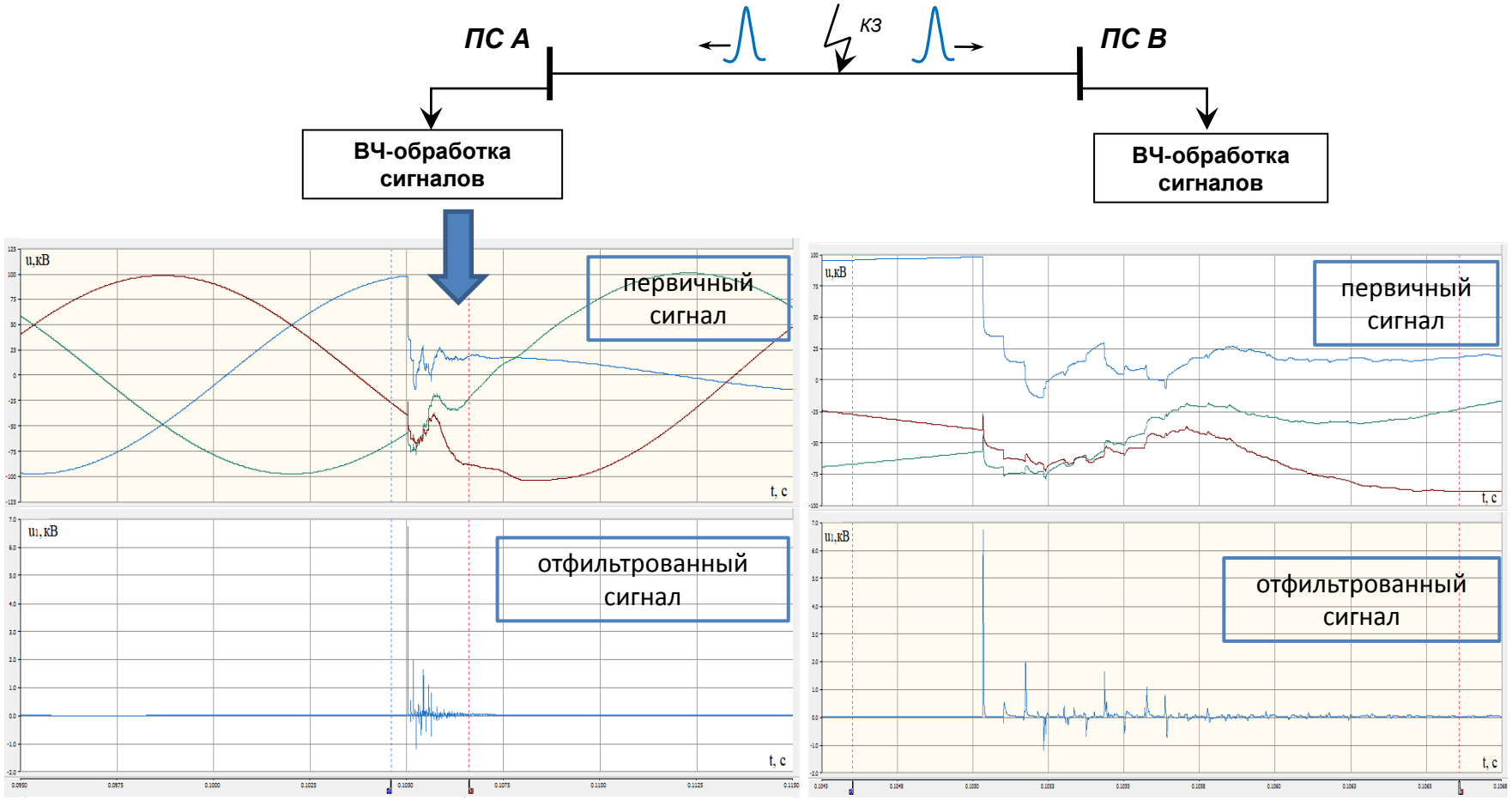

Модель алгоритма регулирования



# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Моделирование волновых электромагнитных процессов




20 мс

2 мс

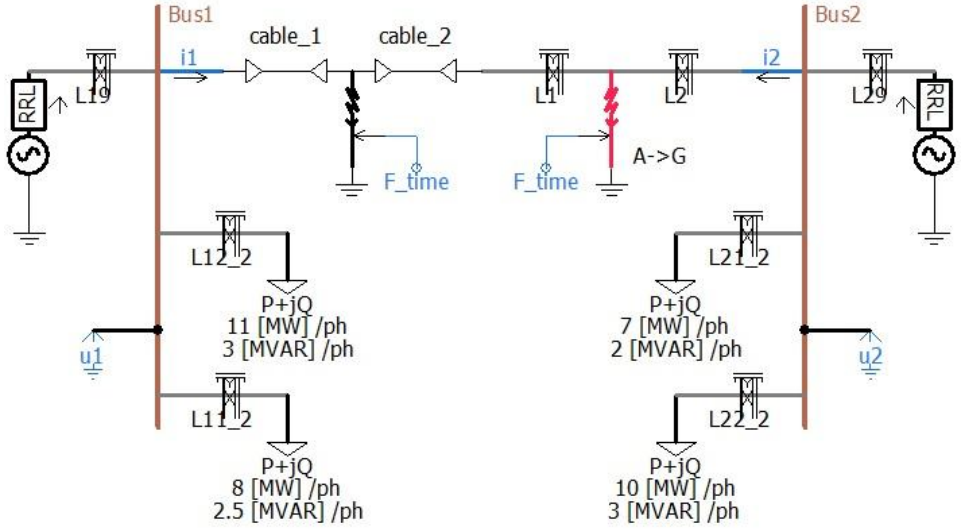
**Решаемые задачи:**

- Разработка алгоритмов распознавания волновых портретов и алгоритма АПВ КВЛ;
- Оценка адекватности модели ЛЭП для исследования волновых процессов;
- Сравнение получаемых на модели сигналов с реальными осциллограммами;
- Анализ методов упрощенной цифровой обработки на коротком окне данных с целью выбора алгоритма, позволяющего получить наибольший коэффициент корреляции модельных и реальных сигналов

# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## АПВ кабельно-воздушных ЛЭП с использованием волновых портретов повреждений

### Модель КВЛ



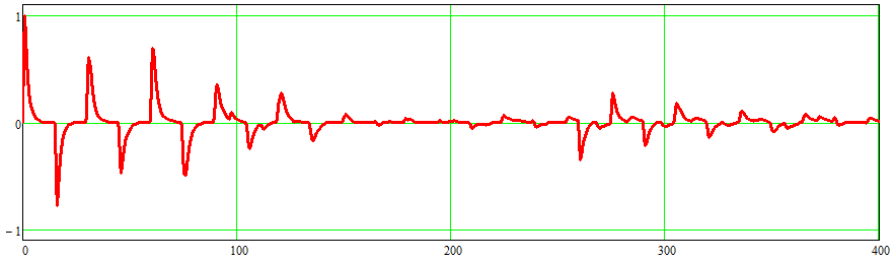

### Загрузка данных в рабочую среду Mathcad

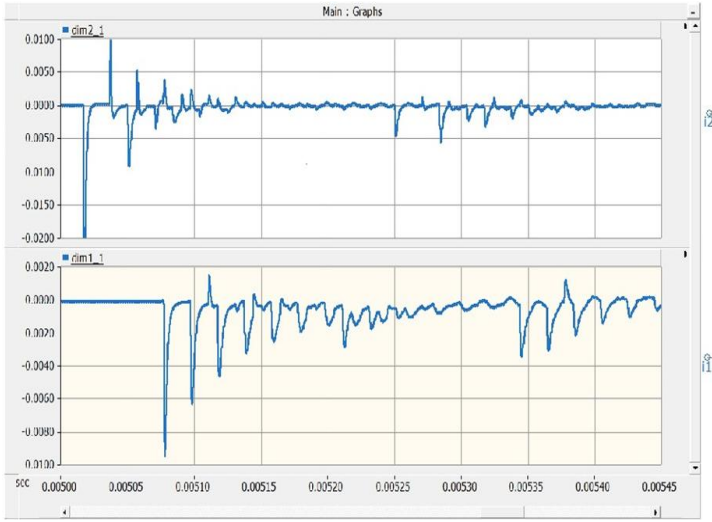
$cl1_0 :=$ E:\stu...\0_00.txt  $cl1_1 :=$ E:\stu...\0_05.txt  $cl1_2 :=$ E:\stud...\0_1.txt

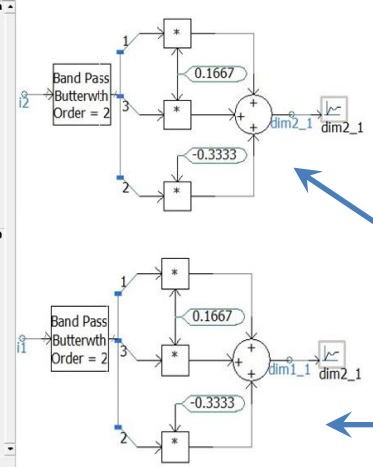
$cl1_{99} :=$ E:\st...\8_95.txt  $cl1_{100} :=$ E:\st...\8_97.txt

```
transf_f (array , V, No) :=
  r ← rows(array_No)
  m ← 0
  for i ∈ 0..r − 1
    ar_i ← (array_No)_i,V
    m ← ar_i  if |ar_i| ≥ |m|
  k ← 0
  for i ∈ 0..3Nr − 1
    answ_i ← 0
  for i ∈ 0..r − 1
    if |ar_i| ≥ 2·ts ∧ k = 0
      k ← 1
      ip ← i
  for i ∈ ip..ip + Nr − 1
    a ← ar_i
    answ_(i+Nr−ip) ← a/m  if |a| > ts
  answ
```

### Результат работы выделенного фрагмента программы (нормирование сигнала по амплитуде)



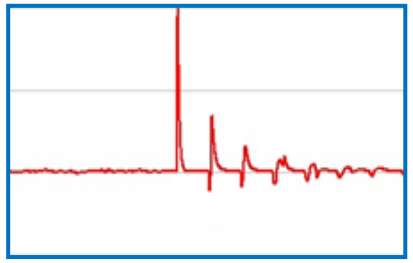




Выделение волновых составляющих, выделение 1-ой междуфазной модальной составляющей и запись на осциллограммы

# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

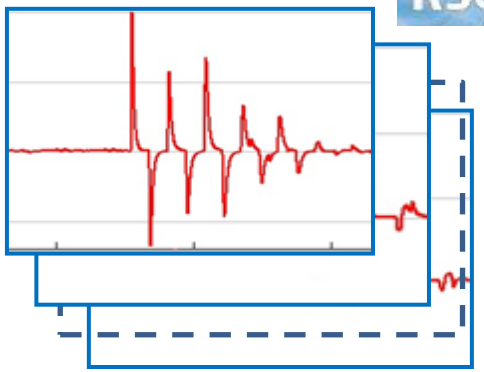
## АПВ кабельно-воздушных ЛЭП с использованием волновых портретов повреждений

Замеренный портрет

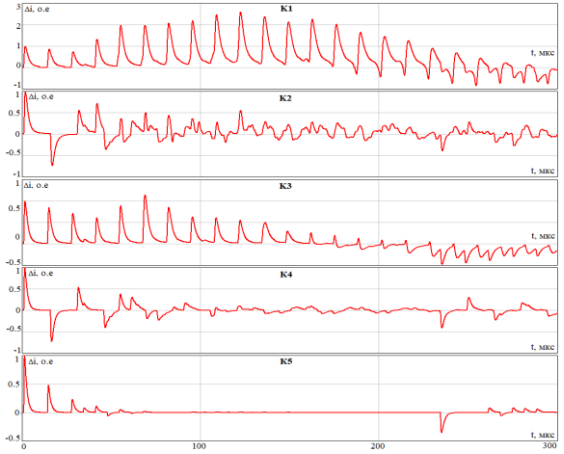


Взаимная корреляция

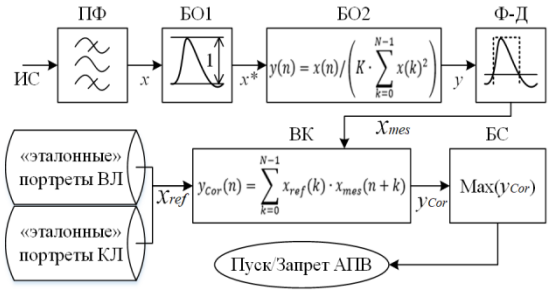
Эталонные портреты



Сравнение сигналов при различных конфигурациях КВЛ

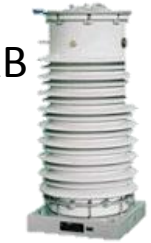



Блок-схема алгоритма

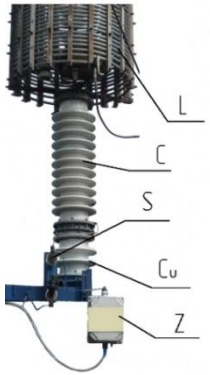


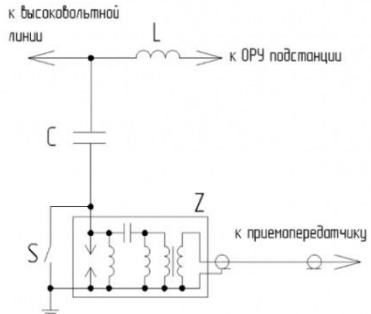

**Распознаваемый (замеренный) волновой портрет**

ТН 110 кВ

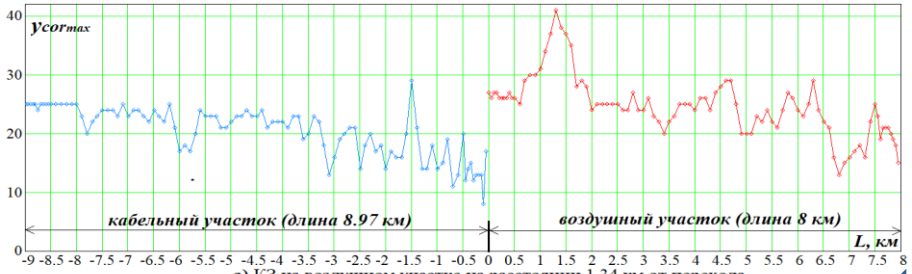


Фильтр присоединения

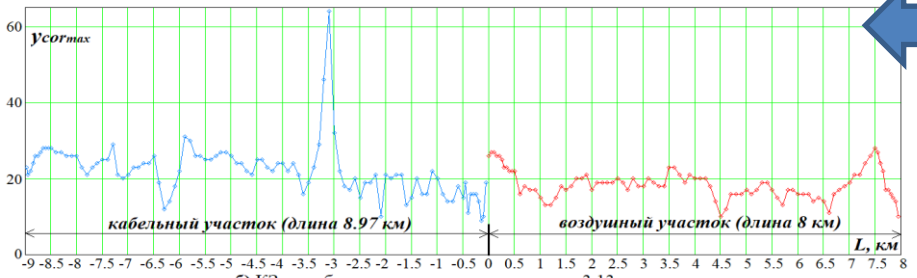



ТТ 110 кВ




а) КЗ на воздушном участке на расстоянии 1,34 км от перехода



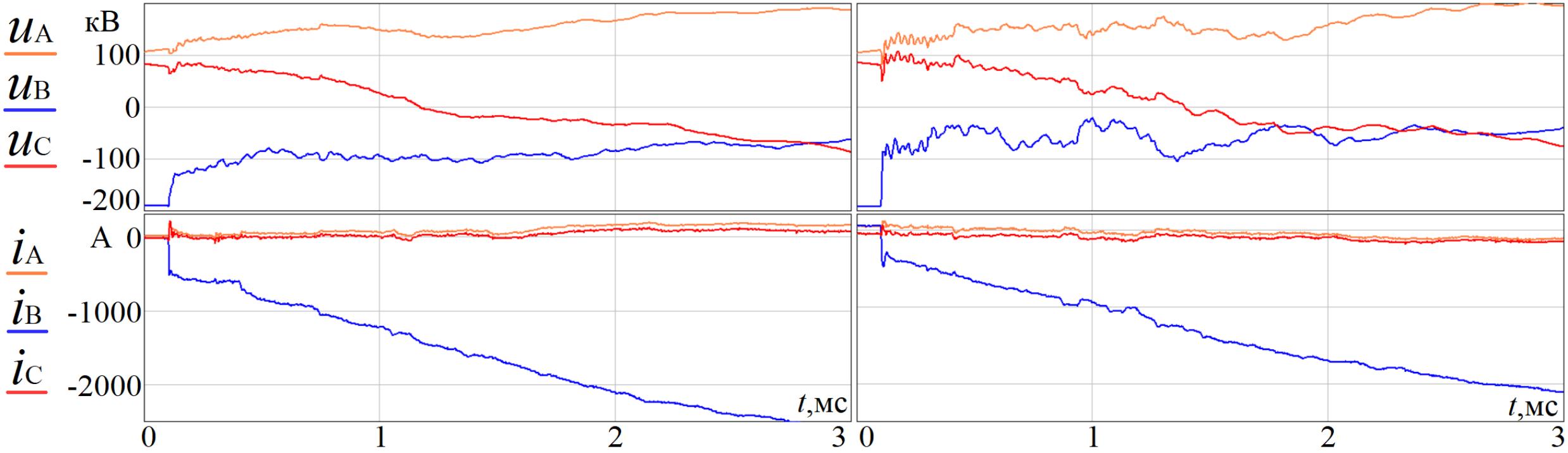

б) КЗ на кабельном участке на расстоянии 3,13 км от перехода

Определение места (участка) повреждения

# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

**Сравнение получаемых на модели сигналов с реальными осциллограммами**

## Осциллограммы однофазного КЗ фазы «В» на ВЛ 220 кВ Парская-Сасово




ПС 220 кВ Парская

ПС 220 кВ Сасово

- частота дискретизации 1МГц

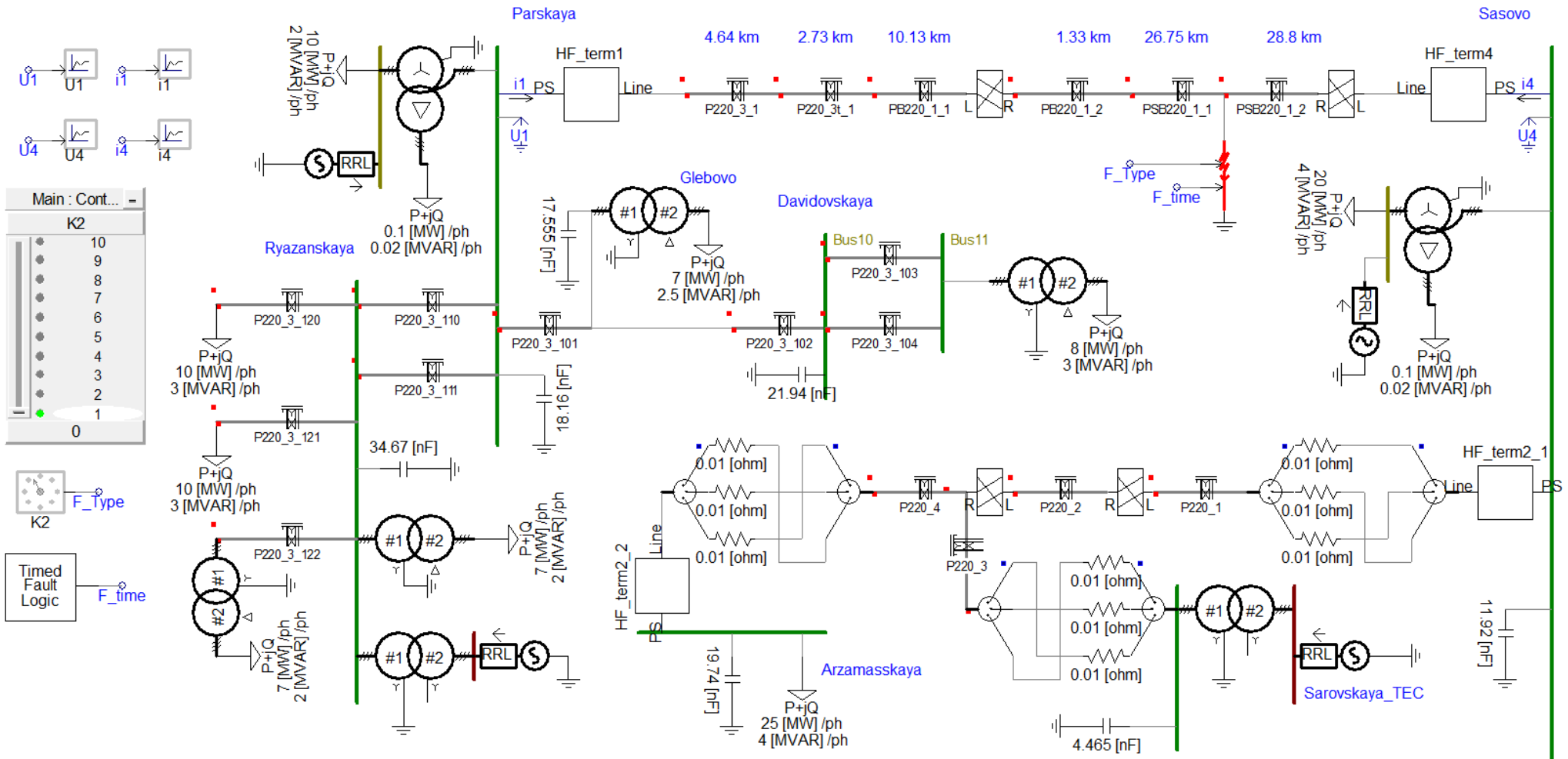
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

**Сравнение получаемых на модели сигналов с реальными осциллограммами**

Использовались:

- Паспорта ЛЭП (типы проводов, типы и количество опор, длина, схема фазировки);
- Схемы электрических соединений;
- Перечень оборудования ПС.

## Построение модели ЛЭП - ВЛ 220 кВ Парская-Сасово (74,6км)

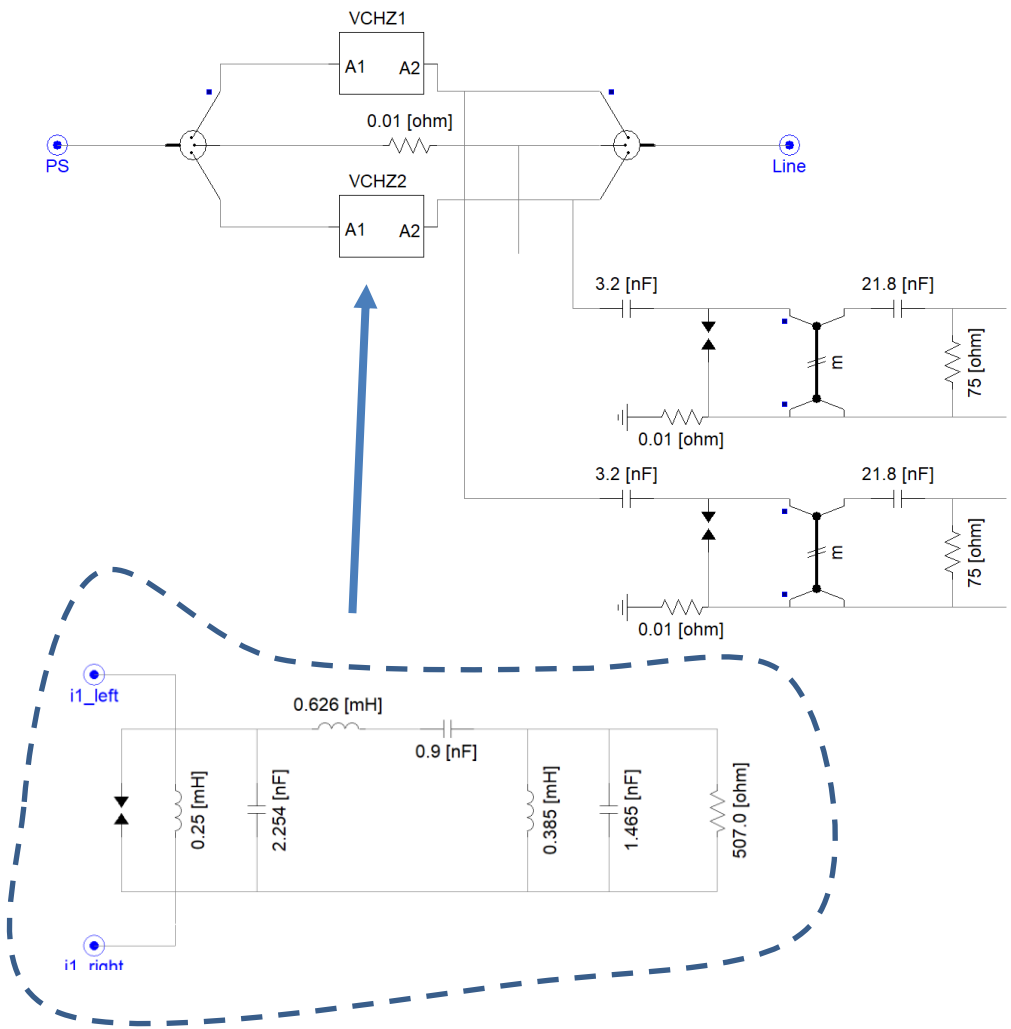


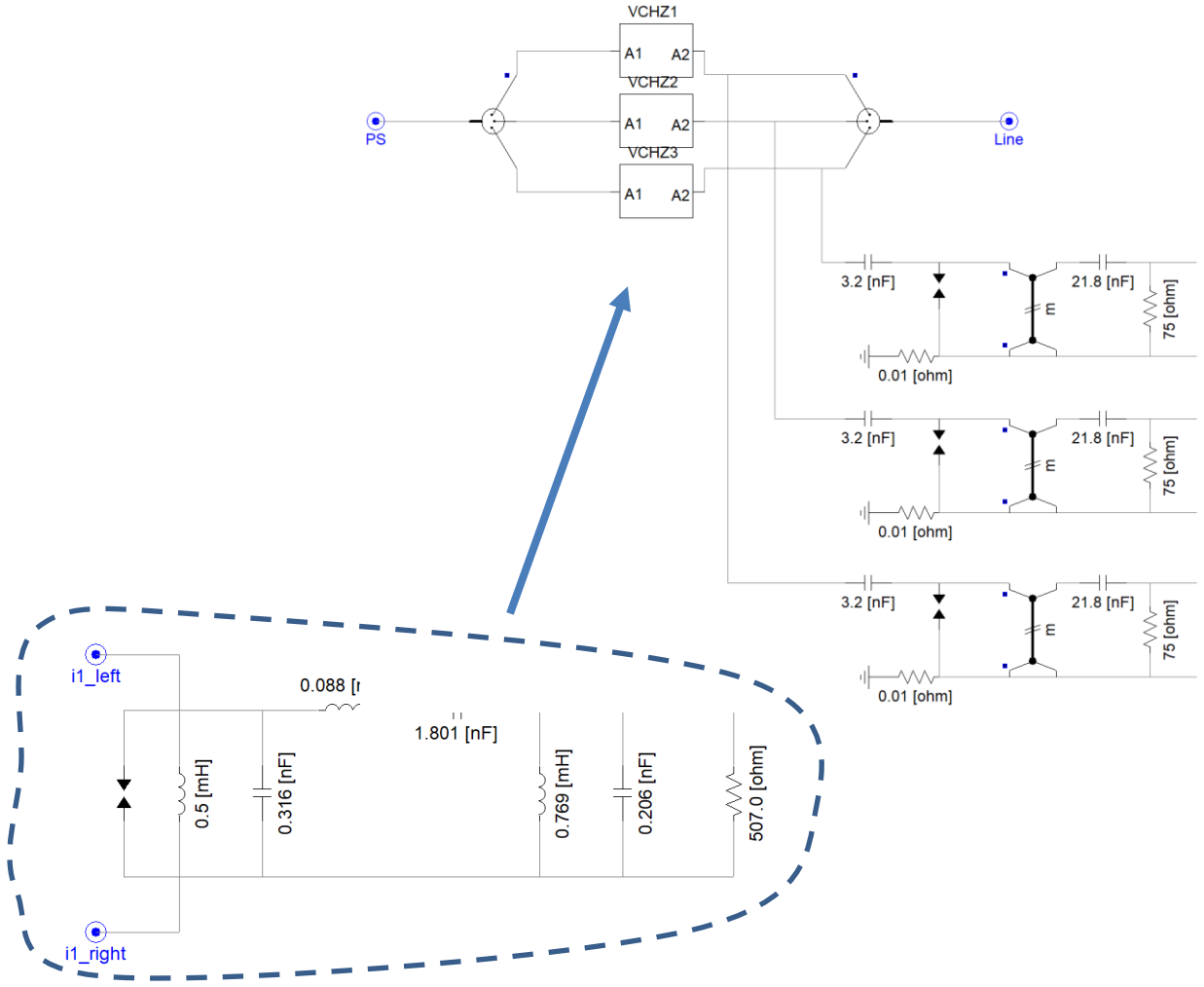
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

**Сравнение получаемых на модели сигналов с реальными осциллограммами**

## Построение модели ЛЭП - ВЛ 220 кВ Парская-Сасово (74,6км)

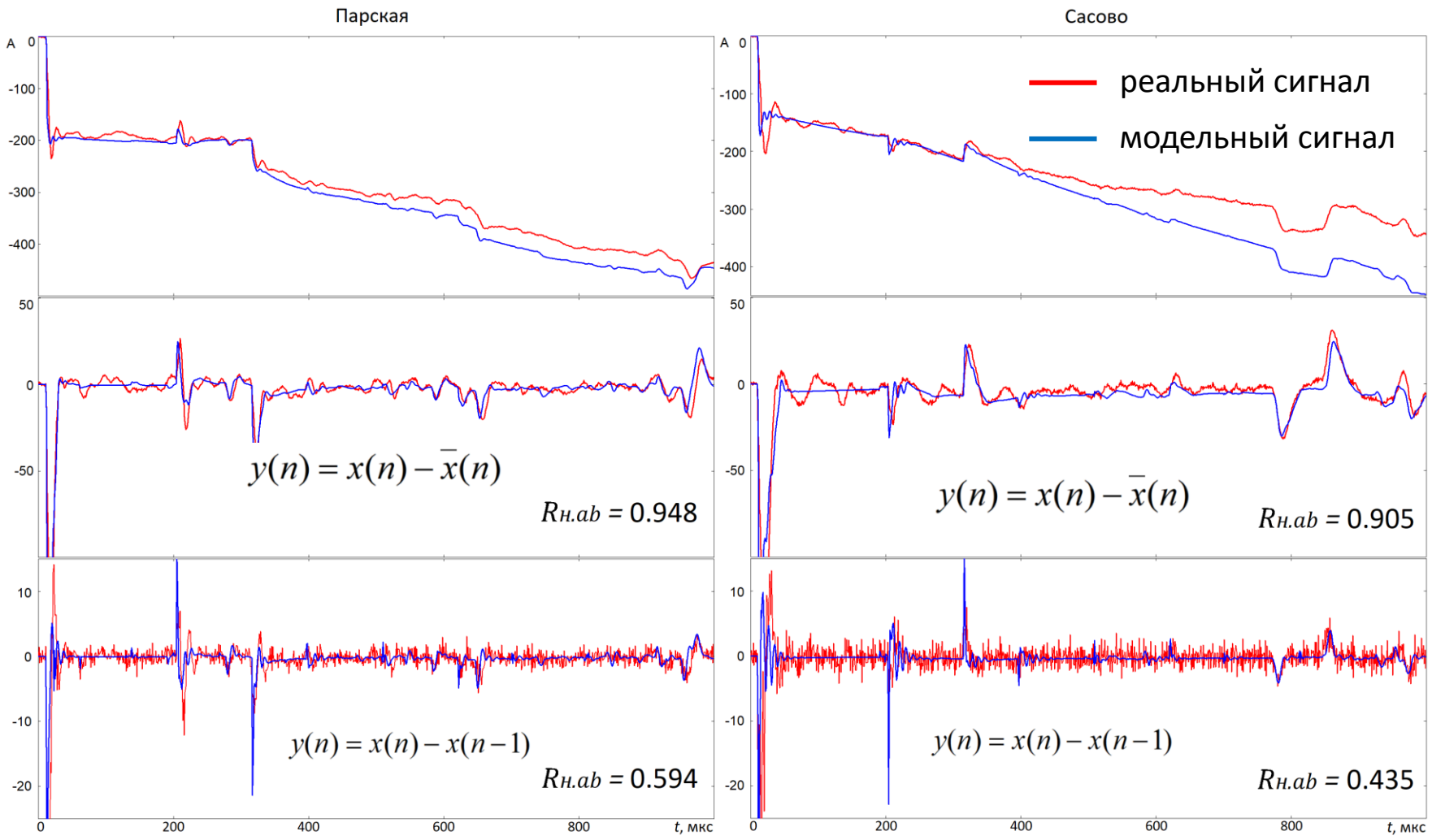
Учитывалось оборудование ВЧ присоединения: ВЧЗ, КС, ФП



# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

**Сравнение получаемых на модели сигналов с реальными осциллограммами**




- Проведено сравнение получаемых сигналов с реальными осциллограммами

**Вывод:** модель ВЛ в PSCAD адекватно воспроизводит волновые процессы в реальной сети

- Проведен анализ методов упрощенной цифровой обработки на коротком окне данных

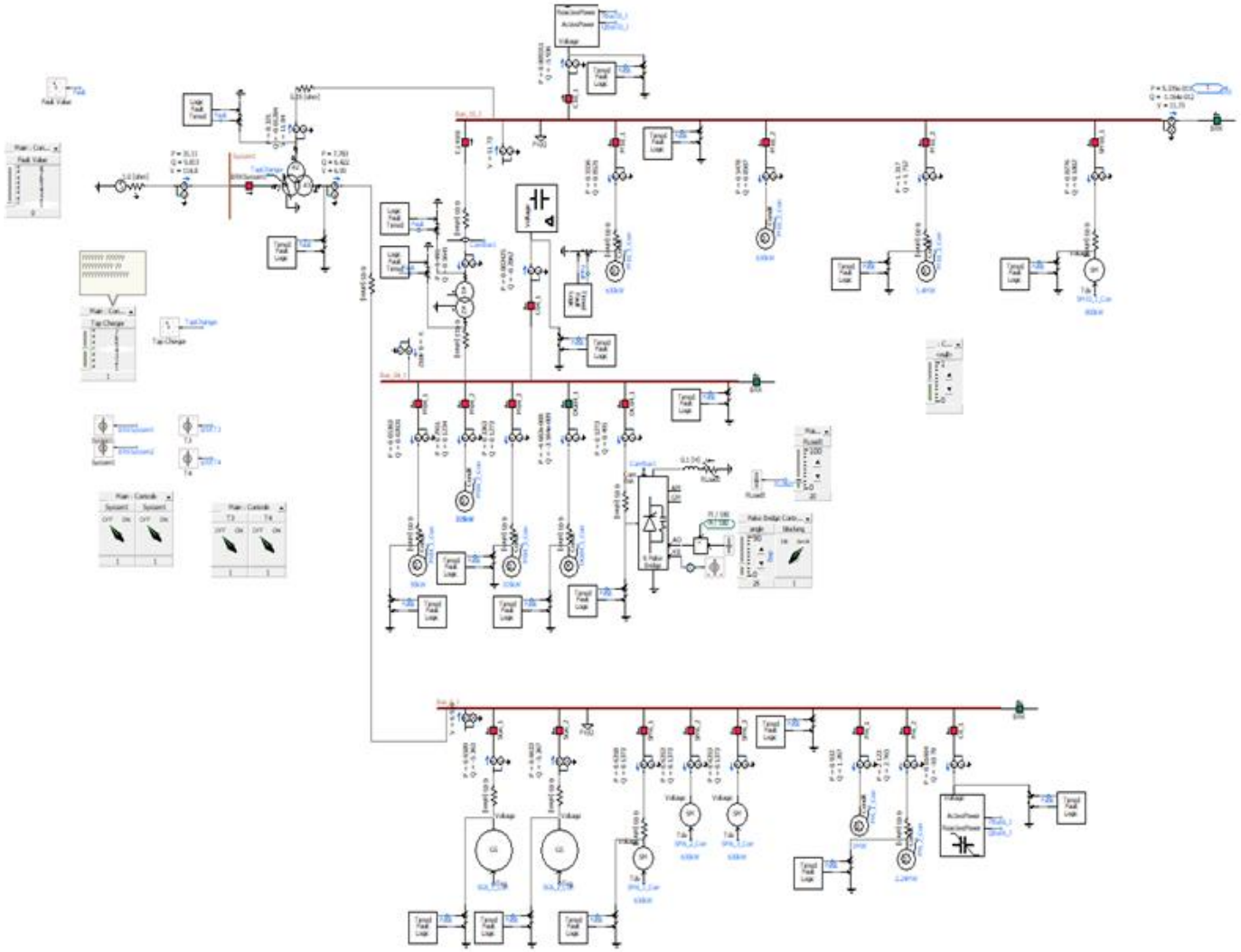
**Вывод:** наибольший коэффициент корреляции позволяет получить метод фильтрации с центрированием величины сигнала на коротком окне (вычитание постоянной составляющей)

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Исследование энергорайона с источниками распределённой генерации на математической имитационной модели для выявления особенностей АЧР

Схема моделируемого энергорайона



**Цель:**

- разработка алгоритма функционирования АЧР на основе статистического анализа Вальда или его модификациях

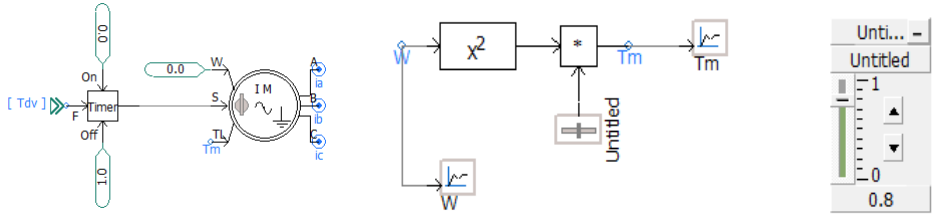
**Решаемые задачи:**

- Исследование особенностей режимов энергорайонов с источниками распределённой генерации, переходных процессов во время функционирования в островном режиме (в том числе оценка гармонического состава сигнала);
- Исследование и разработка модифицированного анализа Вальда;
- Сравнение функционирования существующего и вновь разработанного метода

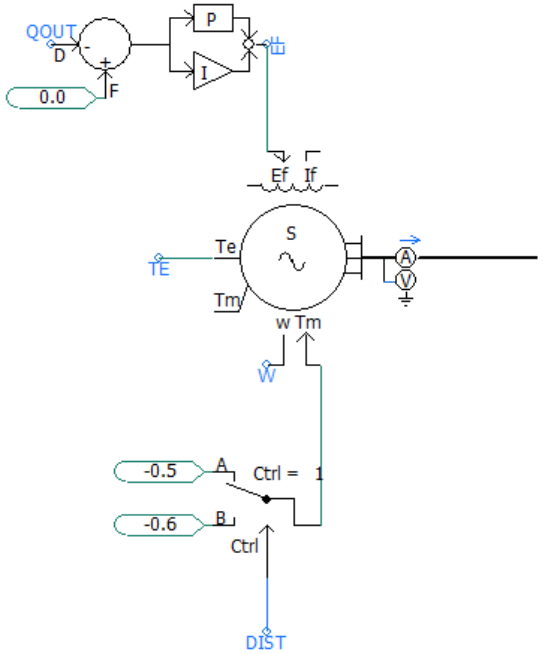
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

**Исследование энергорайона с источниками распределённой генерации на математической имитационной модели для выявления особенностей АЧР**

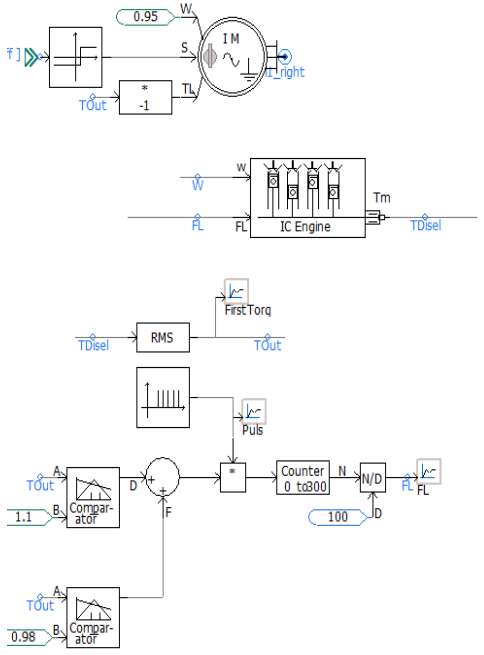
Модель АД и управление моментом



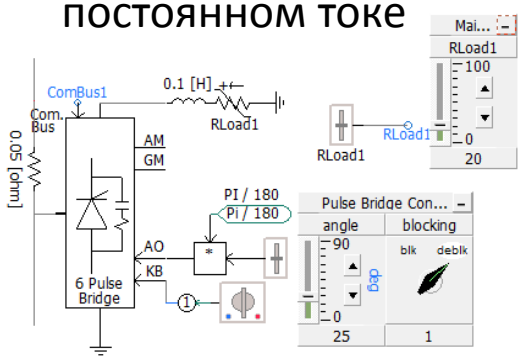
Модель СД



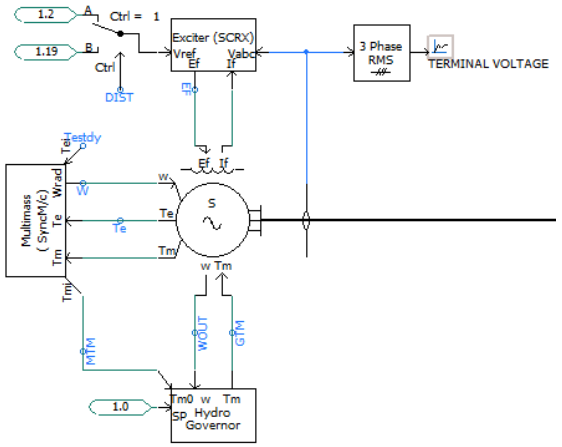
Модель дизельного генератора



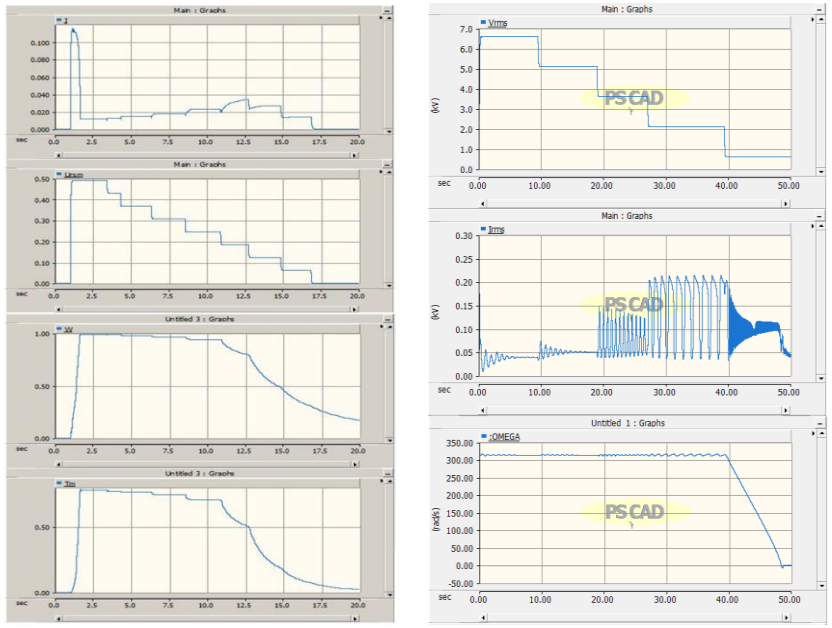
Модель нагрузки на постоянном токе



Модель синхронного генератора



Поведение АД и СД при снижении напряжения



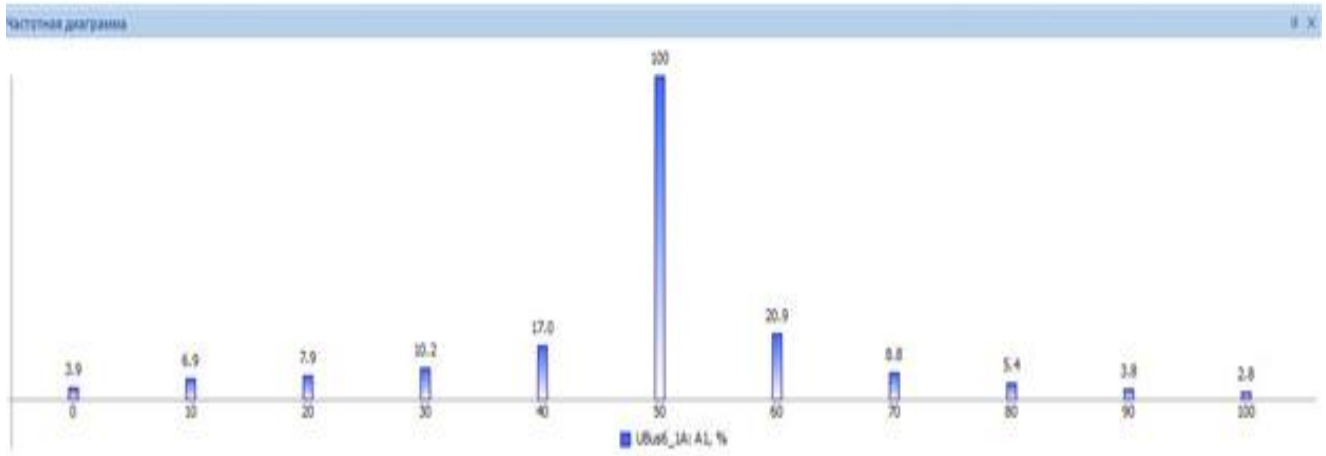
- Разработана математическая имитационная модель, включающая источники распределённой генерации, нагрузку в виде синхронных и асинхронных двигателей, динамические устройства компенсации реактивной мощности, нагрузку на постоянном токе

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

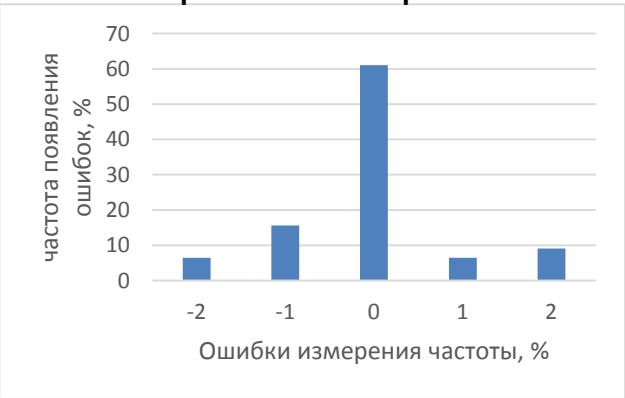
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Исследование энергорайона с источниками распределённой генерации на математической имитационной модели для выявления особенностей АЧР

Частотный спектр сигнала при работе в островном режиме (присутствует дефицит мощности)




Распределение ошибок измерения частоты в нормальном режиме




в аварийном режиме

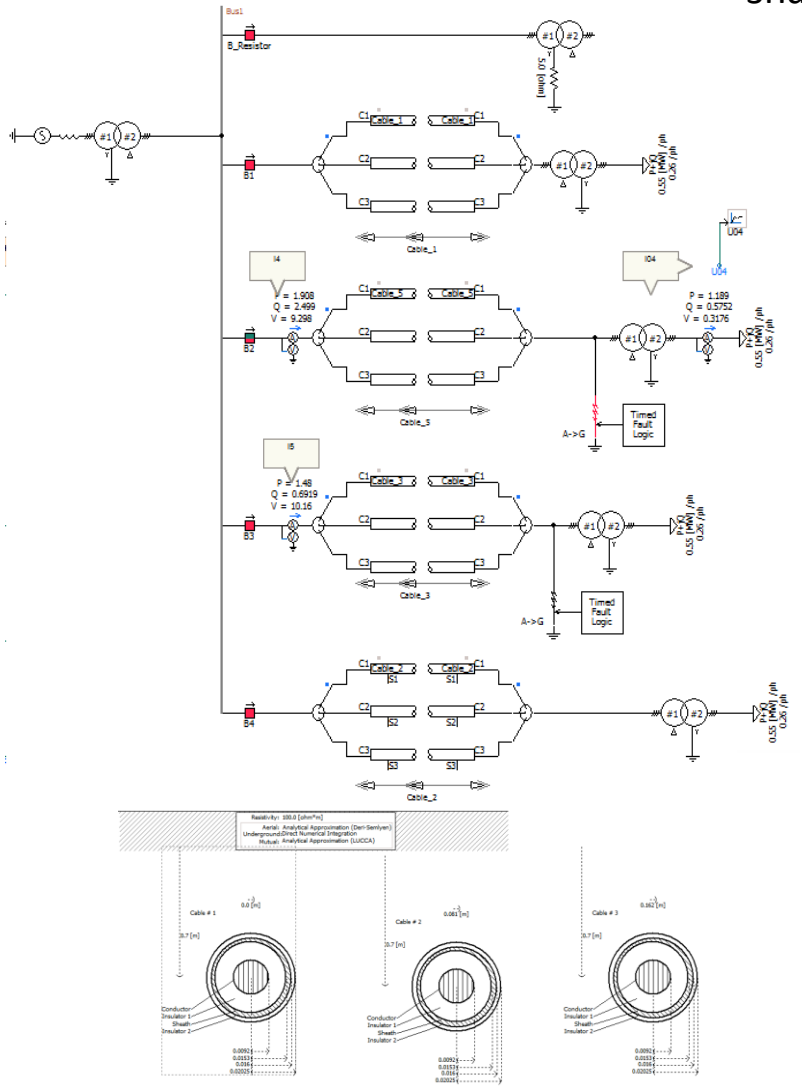
**Выводы:**

- Разработаны модели, позволяющие выявить диапазоны ошибок АЧР при функционировании энергорайонов в различных схемно-режимных условиях;
- По результатам анализа спектральных характеристик и осциллограмм выявлено, что наиболее интенсивные частоты 40 и 60 Гц, и ошибки могут достигать 5%, что неприемлемо для устройств АЧР;
- Поскольку ошибки носят статистический характер и зависят от конкретных схемно-режимных условий, а так же от режимов работы отдельных элементов в составе энергорайона, то целесообразно применение и разработка статистических методов, в частности основанных на процедуре последовательного анализа Вальда.

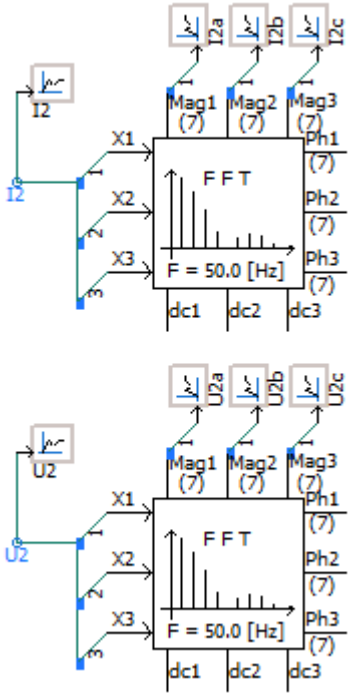
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Анализ работы сетей среднего напряжения с резистивным заземлением нейтрали

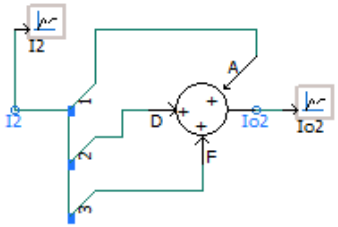
Моделируемая эквивалентная городская сеть 10 кВ



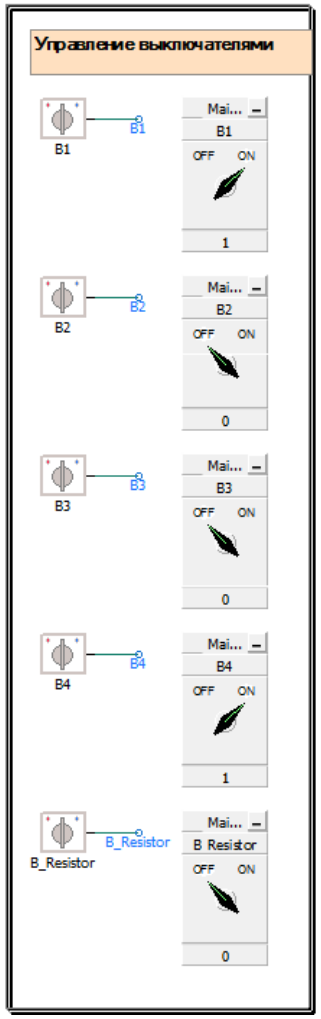

Определение действующих значений тока и напряжения




Фильтр нулевой последовательности



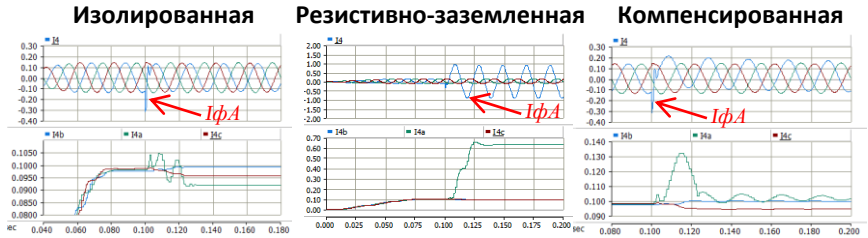

Пост управления выключателями



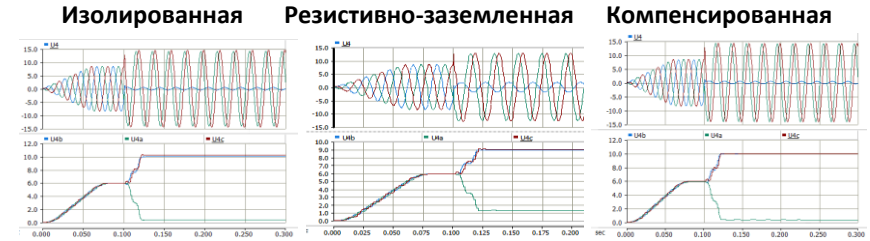

**Решаемая задача:**

- Определение оптимального резистора при ОЗЗ, путем имитационного моделирования и оценки состояния сети среднего напряжения в программном комплексе PSCAD

Осциллограммы токов при ОЗЗ



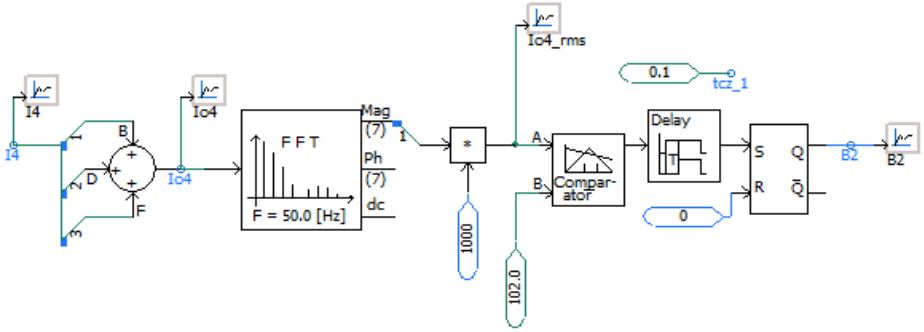

Осциллограммы напряжений при ОЗЗ



# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

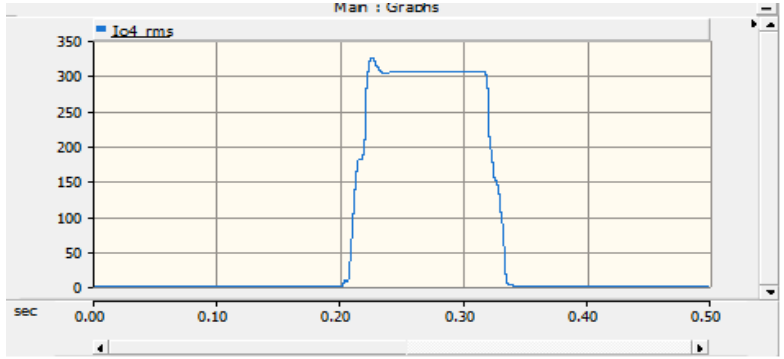
## Анализ работы сетей среднего напряжения с резистивным заземлением нейтрали

### Модель защиты нулевой последовательности




### Отфильтрованный ток НП

### Действительное значение тока НП




### Условия выбора уставок

$$1)\ I_{0.c.з} \geq k_{отс} k_{бр} I_c,$$

kотс = 1,2 – коэффициент отстройки, учитывающий погрешность реле тока, ошибки расчета Iс и запас.

kбр = 3÷5 – коэффициент броска, учитывает увеличение действующего значения Iс при ОЗЗ

$$2)\ I_{0.c.з} \geq k_{отс} I_{нб.max},$$

где

$$I_{нб.max} = k_{нб} I_{расч.max},$$

Iрасч.max – максимальное значение фазного тока

$$k_ч \leq \frac{I_{0пов.min}}{I_{0C.З}},$$

где для изолированной нейтрали:

$$I_{0пов.min} = I_{c\sum min} - I_c,$$

для резистивно-заземленной нейтрали:

$$I_{0пов.min} = \sqrt{(I_{c\sum min} - I_c)^2 + I_R^{\ 2}}$$

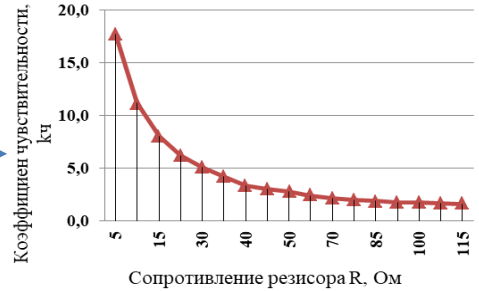
для компенсированной нейтрали:

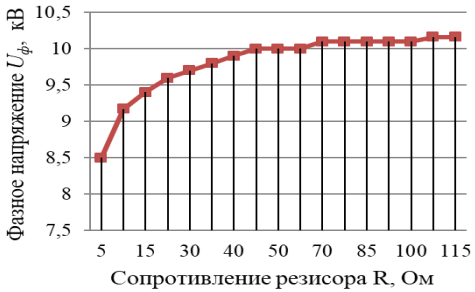
$$I_{0пов.min} = \sqrt{(vI_{c\sum} - I_{спно})^2 + (dI_{c\sum})^2}$$

### Экспериментальные данные

| R,Ом | $I_{расч.max}$, А | $I_{оззф}$, А | $I_{0пов.min}$, А | $I_{Спов}$, А | $U_ф$, кВ | $I_{0с.з.}$, А | $k_ч$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 100 | 586 | 496 | 7,8 | 8,5 | 28,08 | 17,7 |
| 10 | 100 | 435 | 350 | 8,7 | 9,17 | 31,32 | 11,2 |
| 20 | 100 | 306 | 222 | 9,9 | 9,6 | 35,64 | 6,2 |
| 30 | 100 | 217,8 | 188 | 10,3 | 9,7 | 37,08 | 5,1 |
| 40 | 100 | 215,5 | 132 | 11 | 9,9 | 39,6 | 3,3 |
| 50 | 100 | 194 | 112 | 11,2 | 10 | 40,32 | 2,8 |
| 60 | 100 | 179 | 99 | 11,4 | 10 | 41,04 | 2,4 |
| 70 | 100 | 167,9 | 89 | 11,6 | 10,1 | 41,76 | 2,1 |
| 80 | 100 | 159,4 | 83,5 | 11,7 | 10,1 | 42,12 | 2,0 |
| 95 | 100 | 150,6 | 76,5 | 11,8 | 10,1 | 42,48 | 1,8 |
| 100 | 100 | 148,1 | 75 | 11,85 | 10,1 | 42,66 | 1,8 |
| 115 | 100 | 142 | 71 | 11,95 | 10,16 | 43,02 | 1,7 |

Зависимость коэффициента чувствительности от параметров резистора



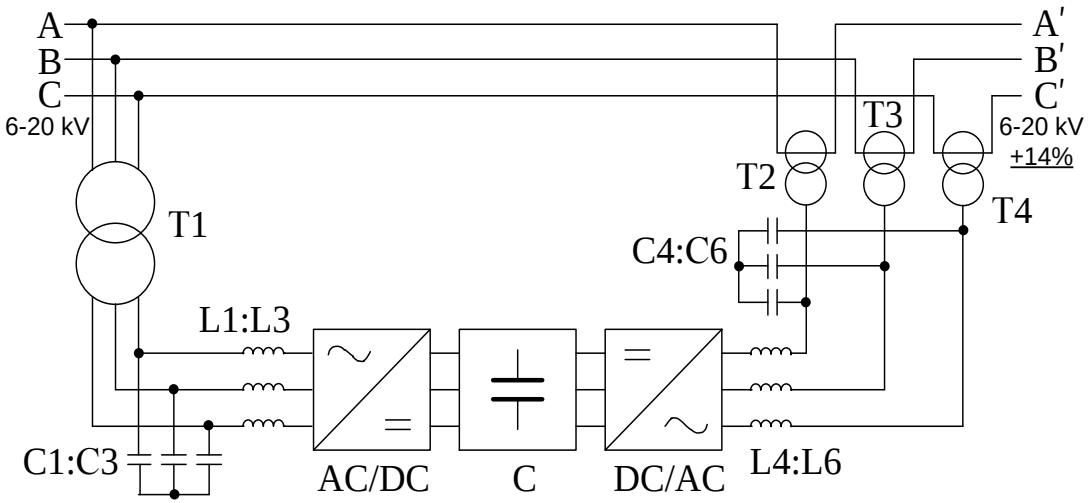




Зависимость напряжения неповрежденных фаз от параметров резистора

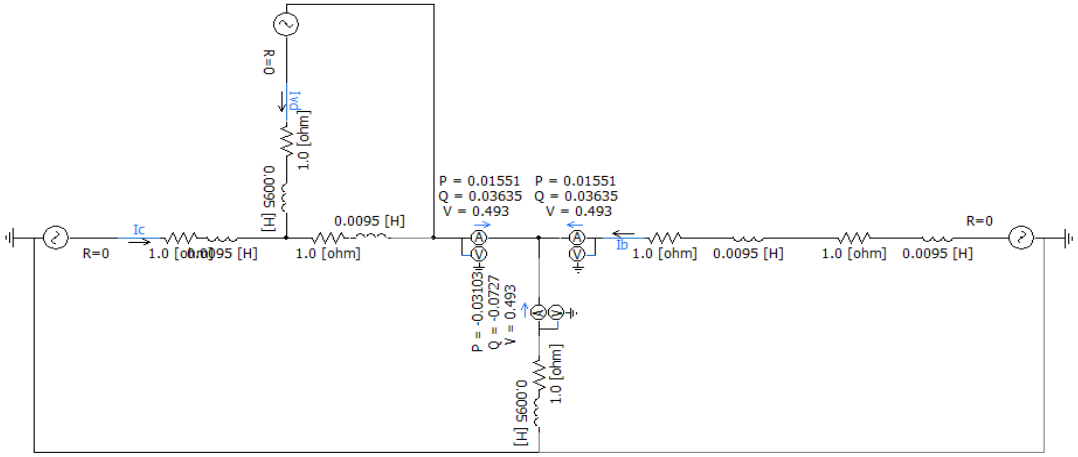
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Исследование режимов работы замкнутых электрических сетей и регулирование потоков мощности твердотельным регулятором напряжения (ТРН)

Принципиальная схема ТРН




Имитационная модель




**Цель:**

- Исследование режимов работы распределительных электрических сетей сложно-замкнутой конфигурации при различных настройках твердотельного регулятора напряжения

**Решаемые задачи:**

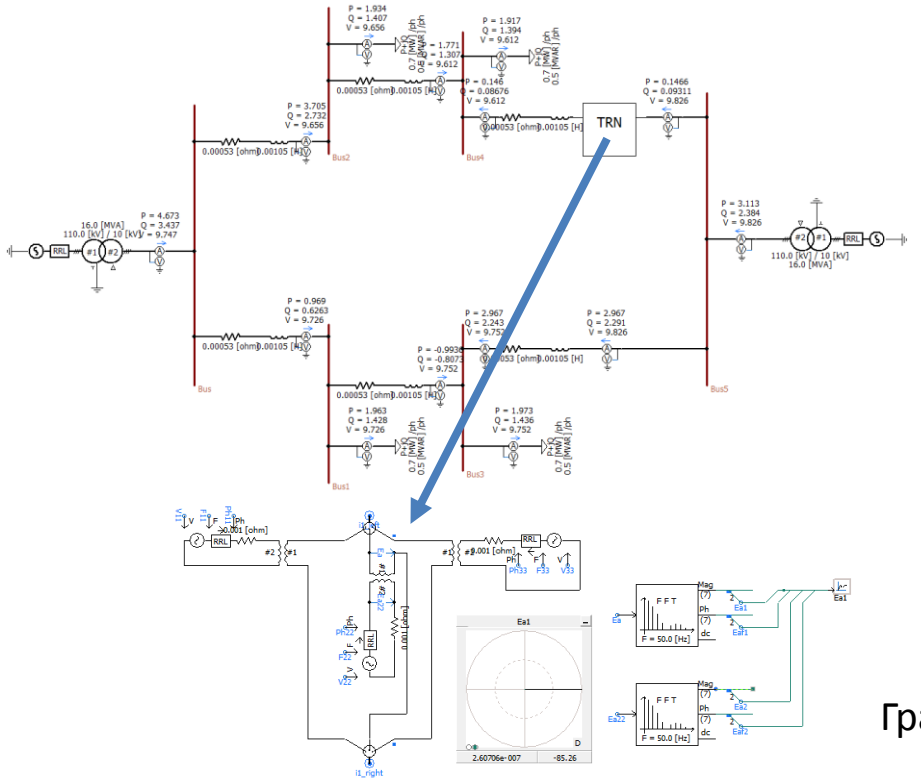
- Разработка имитационных моделей РЭС различной конфигурации и твердотельного регулятора напряжения.
- Расчет потокораспределения в разновариантных распределительных сетях 110/10 кВ с использованием твердотельного регулятора напряжения

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

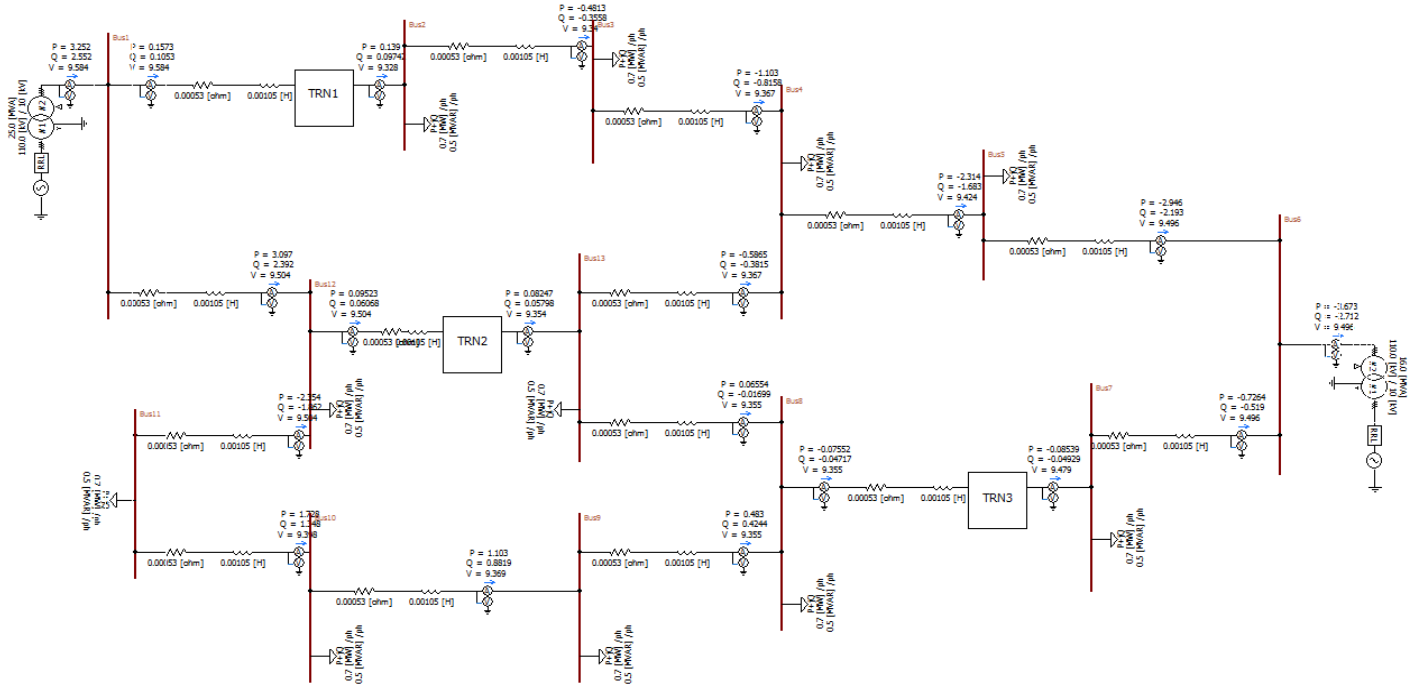
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

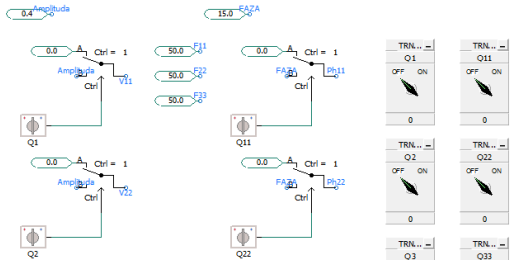
## Исследование режимов работы замкнутых электрических сетей и регулирование потоков мощности твердотельным регулятором напряжения (ТРН)

Имитационная модель однокольцевой сети с ТРН

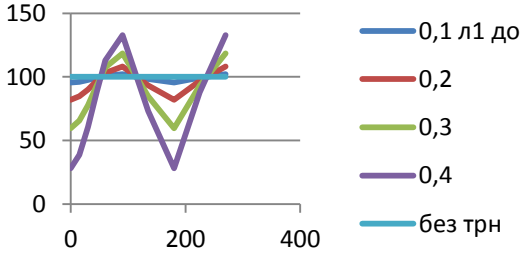


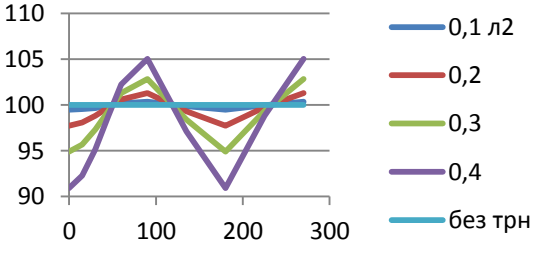

Имитационная модель многокольцевой сети с ТРН

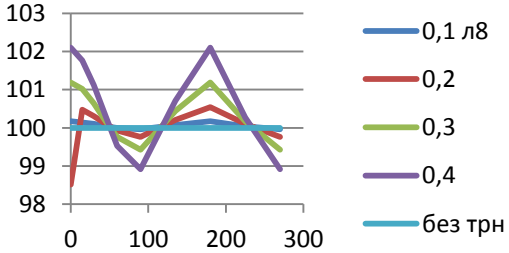


Графики зависимости изменения активной мощности (%) от изменения угла поворота фазы ТРН в линиях многоконтурной РС



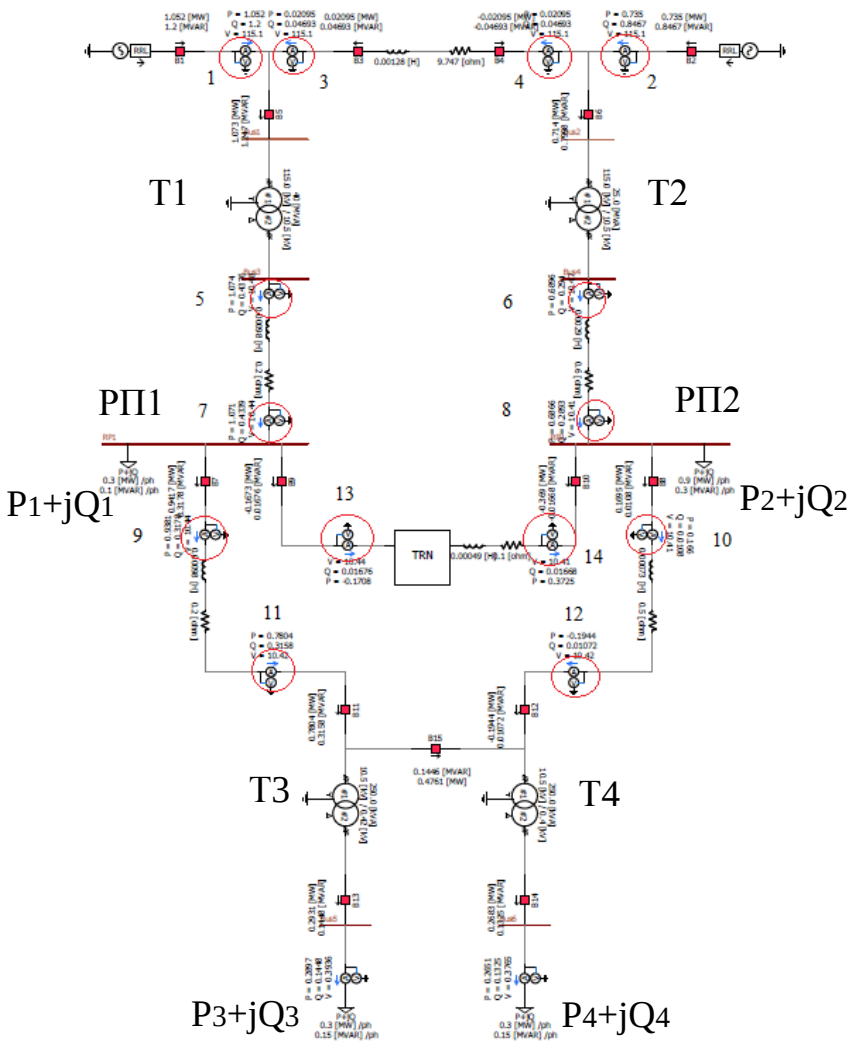



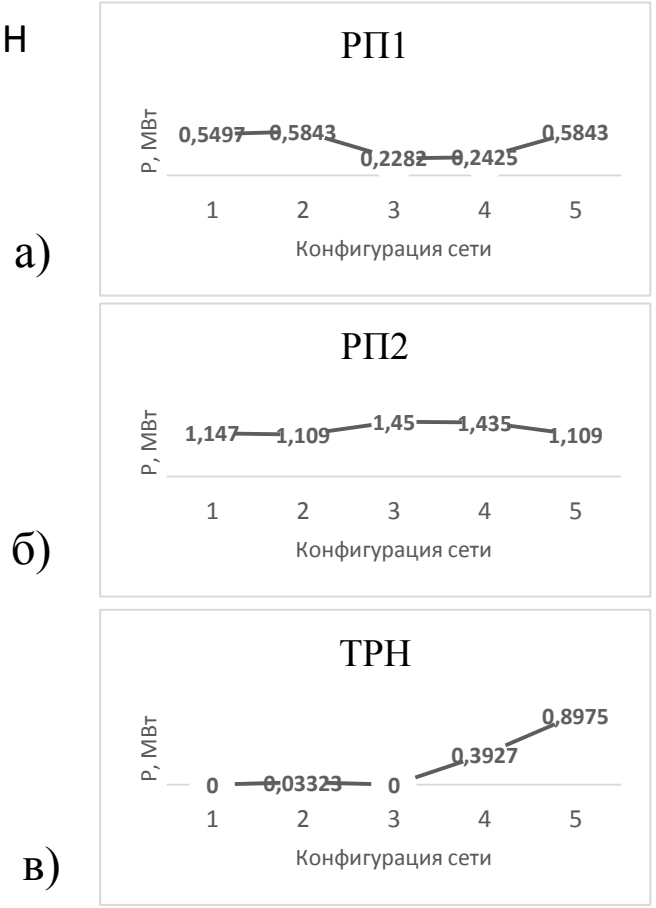



# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Исследование режимов работы замкнутых электрических сетей и регулирование потоков мощности твердотельным регулятором напряжения (ТРН)

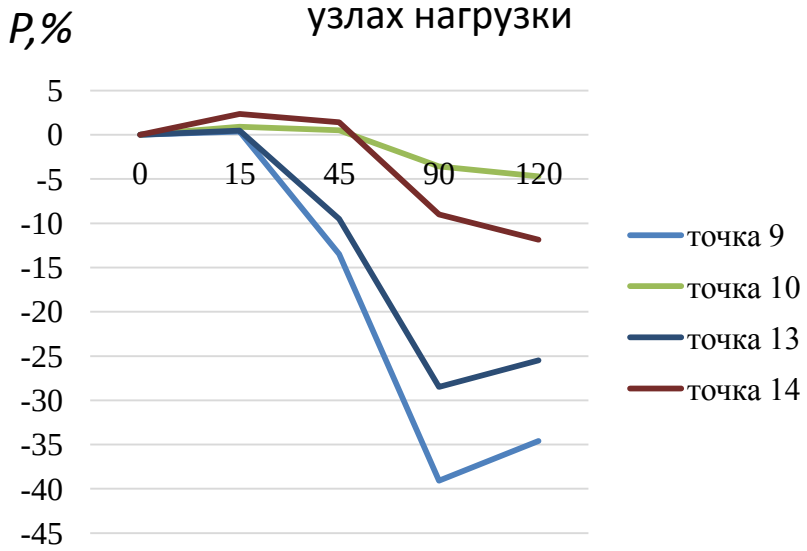
Имитационная модель сложнозамкнутой сети с ТРН




Зависимости активной мощности (МВт) линий от конфигурации сети: а) линия РП1; б) линия РП2; в) линия с ТРН на стороне РП1.

График потокораспределения в линиях сложнозамкнутой сети с разной мощностью потребления в узлах нагрузки

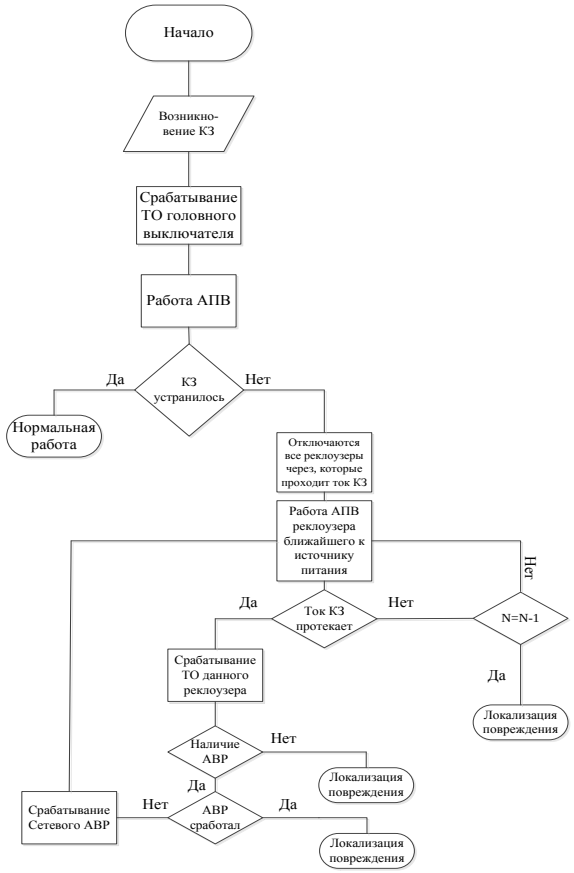



- На основе PSCAD модели исследовано потокораспределение в ветвях многоконтурной сети и изучен механизм регулирования потоков мощности устройством ТРН

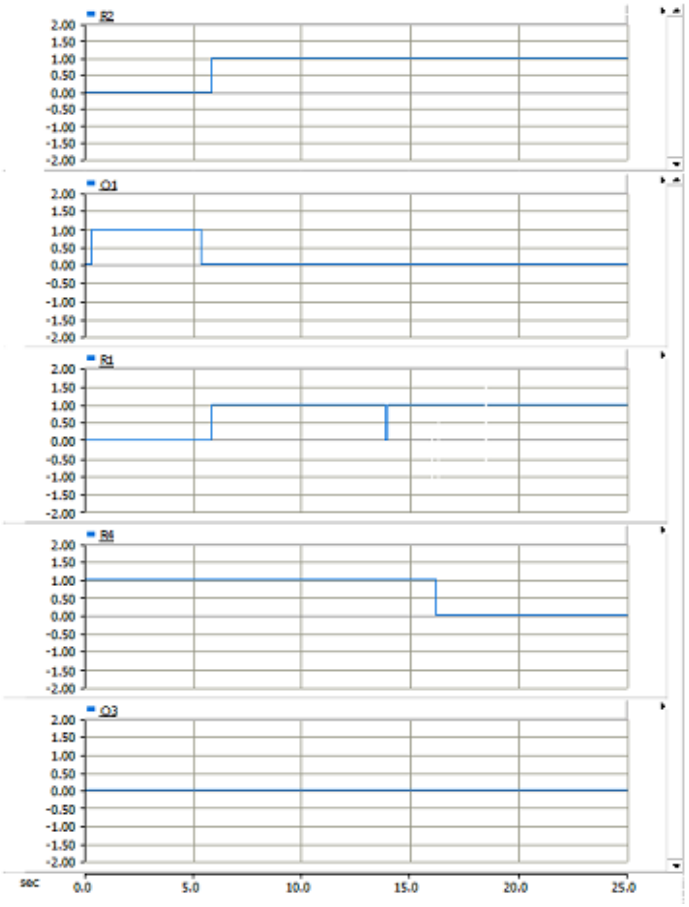
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Моделирование алгоритмов работы реклоузеров

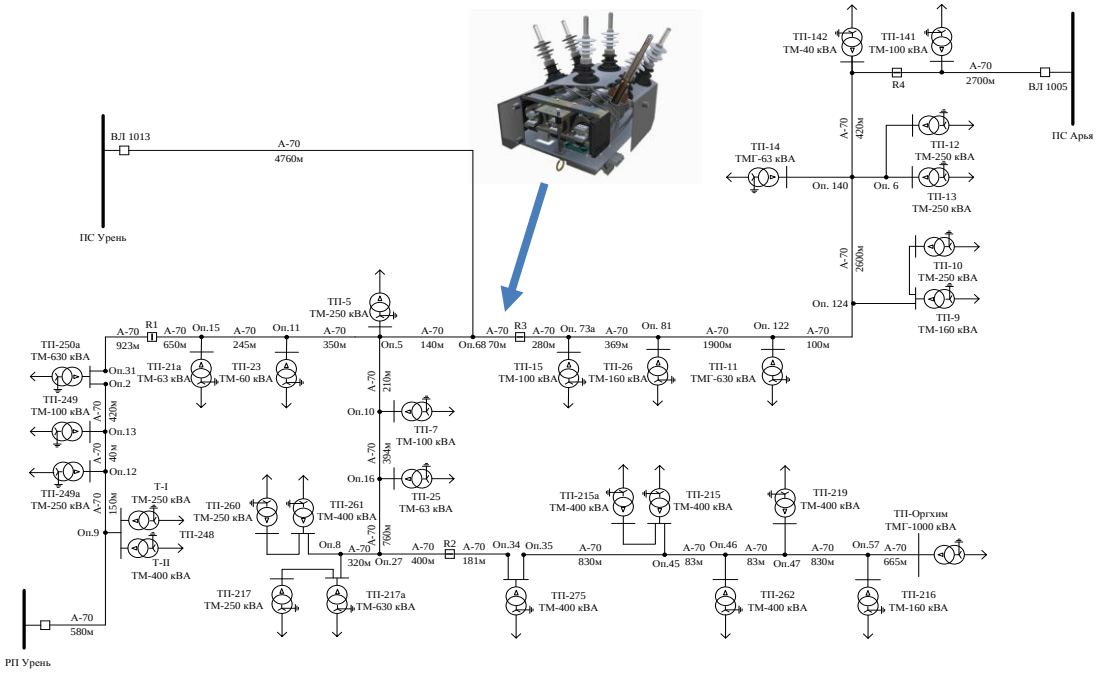
Блок-схема работы алгоритма по локализации повреждения



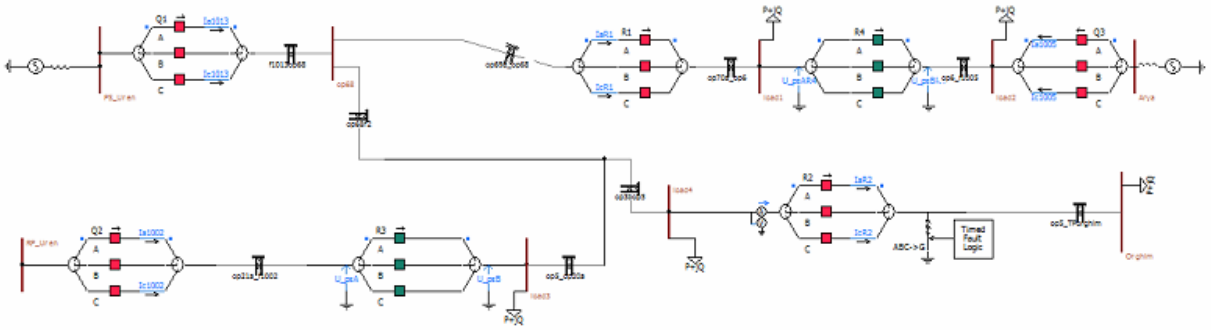

Графики включения и отключения выключателей при КЗ




Моделируемый участок электрической сети




Модель участка электрической сети

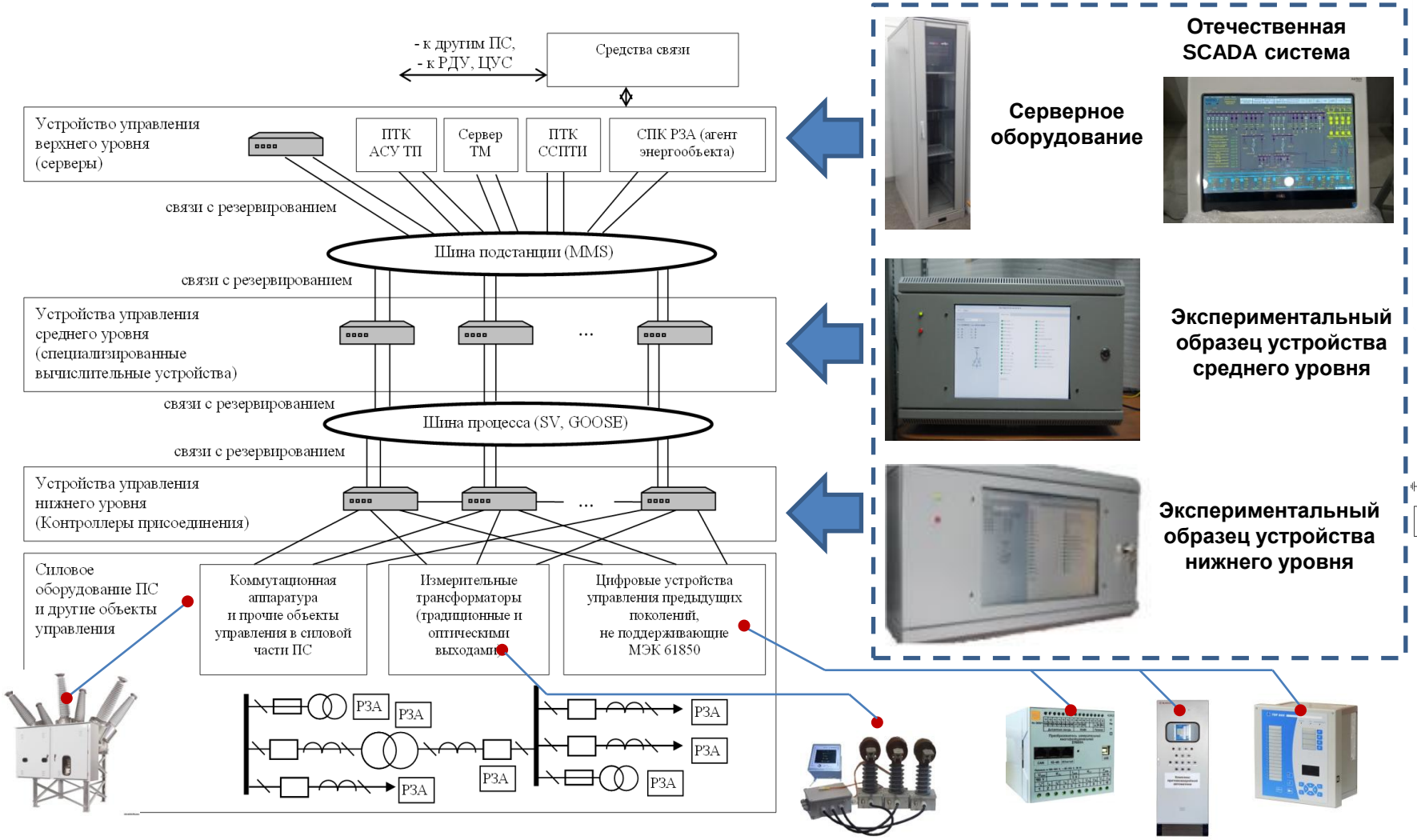


- Разработан автономный алгоритм локализации места повреждения на радиальных воздушных линиях 6-35 кВ и опробован на имитационной модели в PSCAD

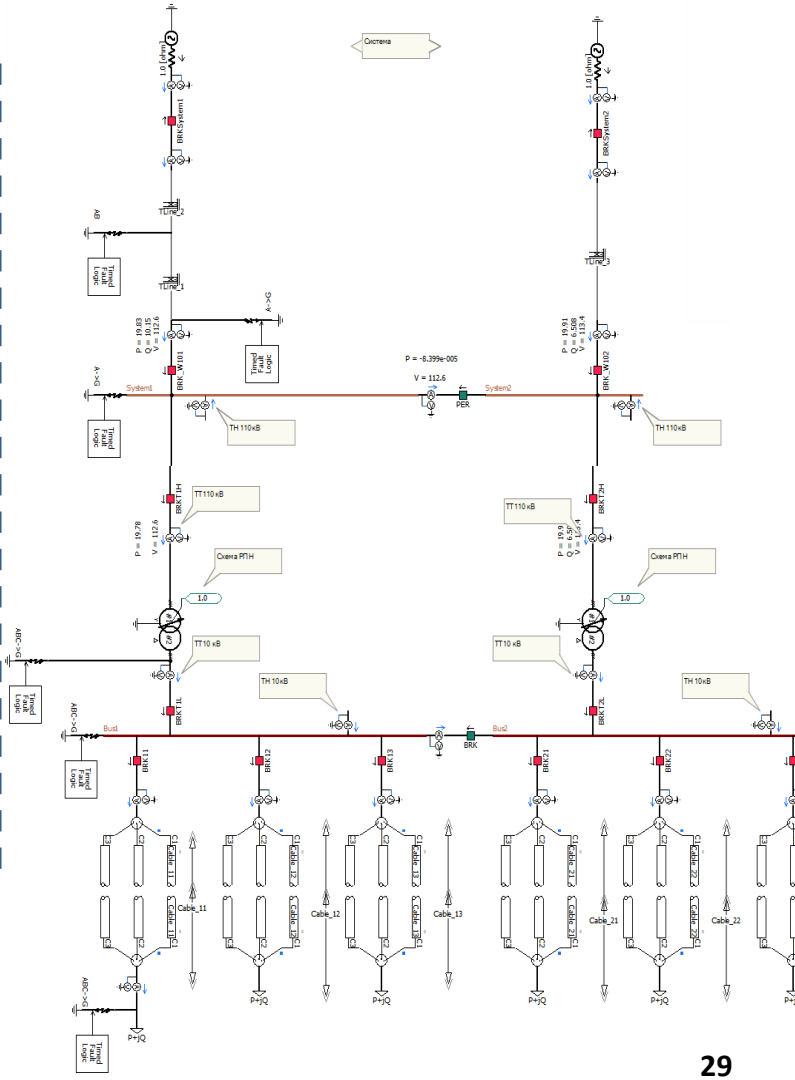
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Моделирование функциональной структуры системы взаимодействия алгоритмов ПАК ЦПС

### Структура программно-технического комплекса цифровой подстанции с применением МЭК 61850




Модель ПС 110/10 Политехническая

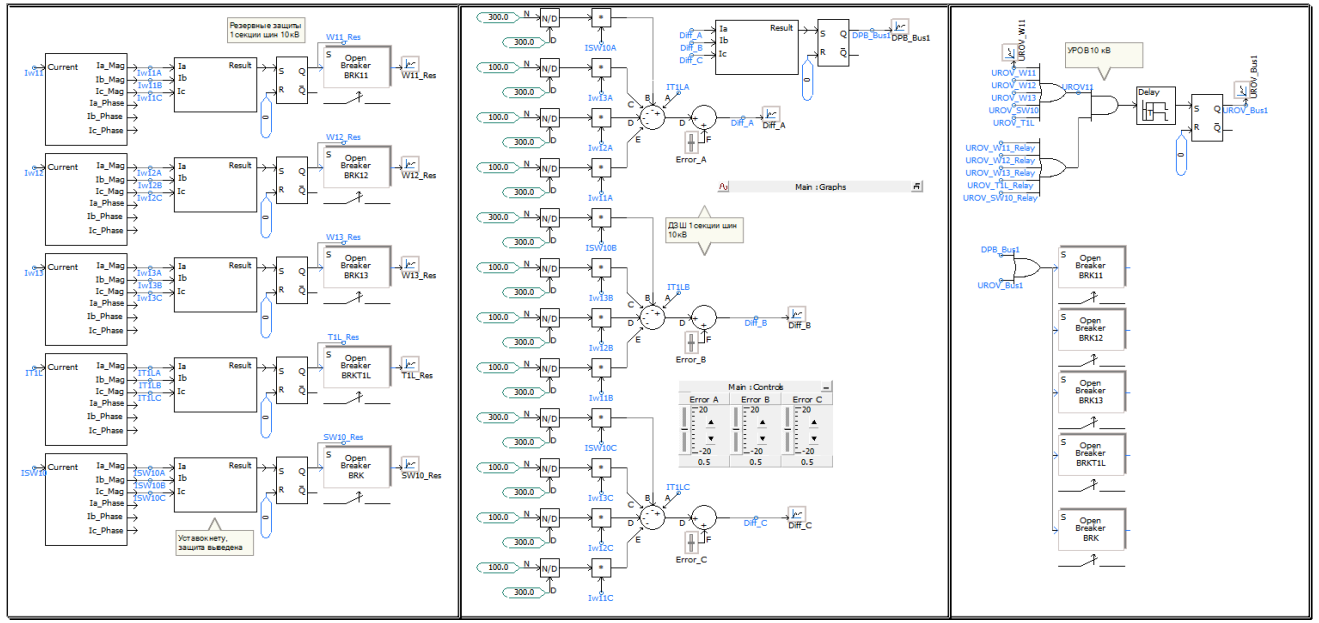


НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

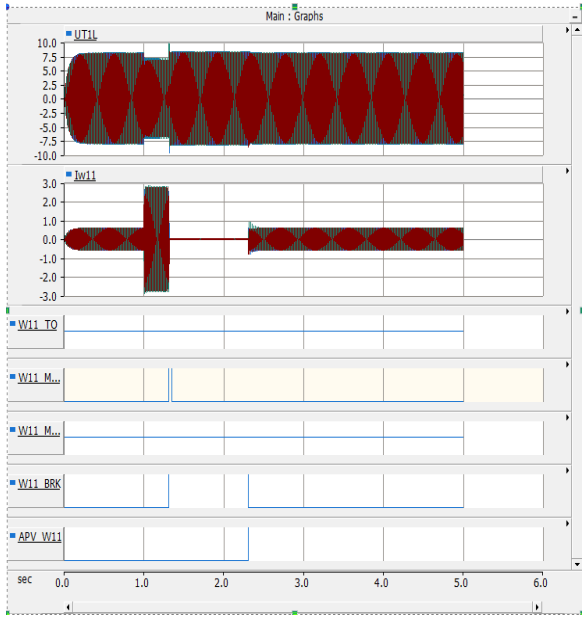
# Применение PSCAD для научных исследований и ЭР

## Моделирование функциональной структуры системы взаимодействия алгоритмов ПАК ЦПС

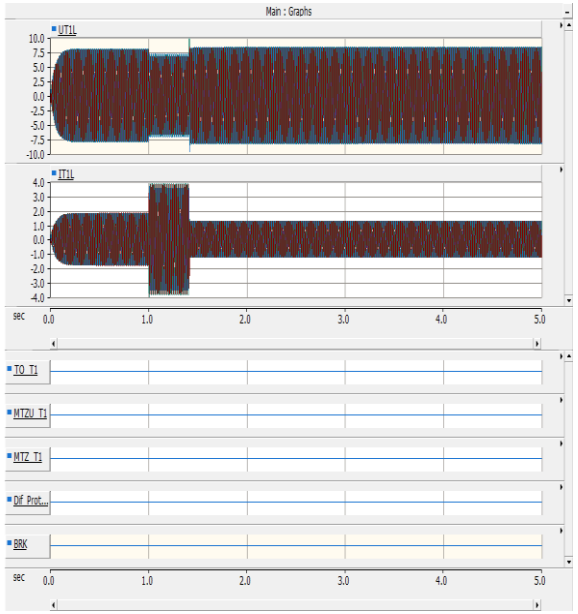
Алгоритмы резервных защит 10 кВ, Централизованного УРОВ 10 кВ, ДЗШ 10 кВ



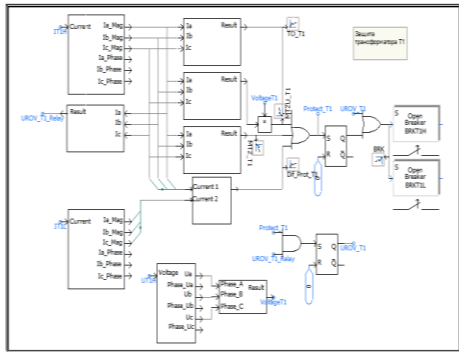
Диаграммы работы защиты ЛЭП 10 кВ



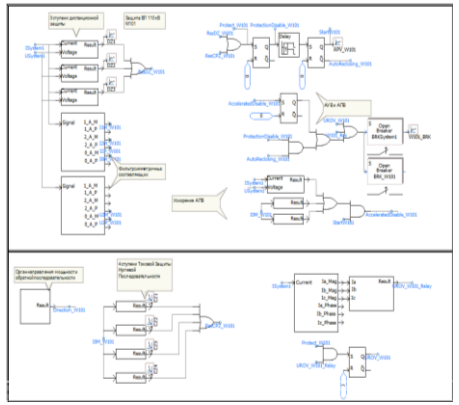
Диаграммы работы защиты тр-ра



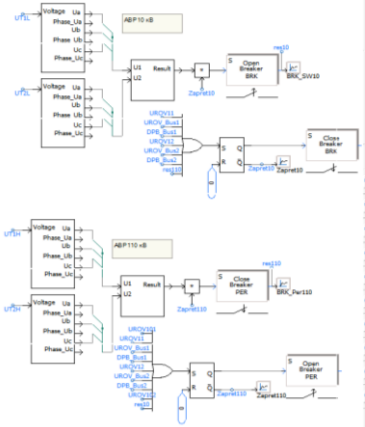
Алгоритмы защиты трансформатора 110/10 кВ



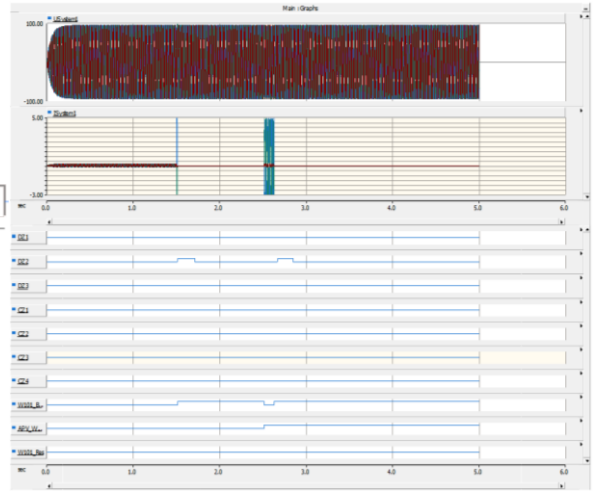
Алгоритмы защиты присоединения 110 кВ



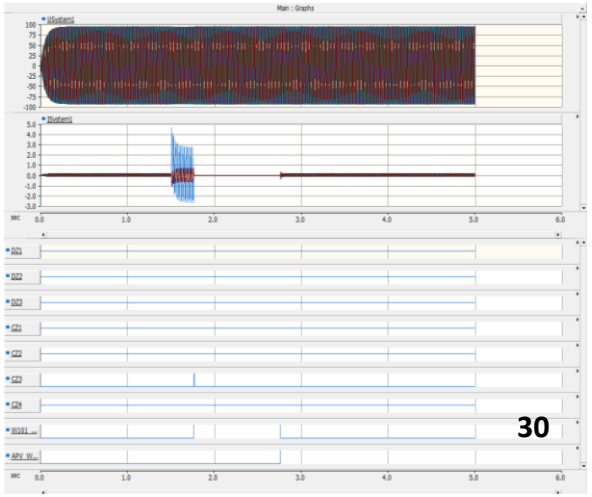
Алгоритмы работы АВР 110 и 10 кВ



Диаграммы работы ДЗ

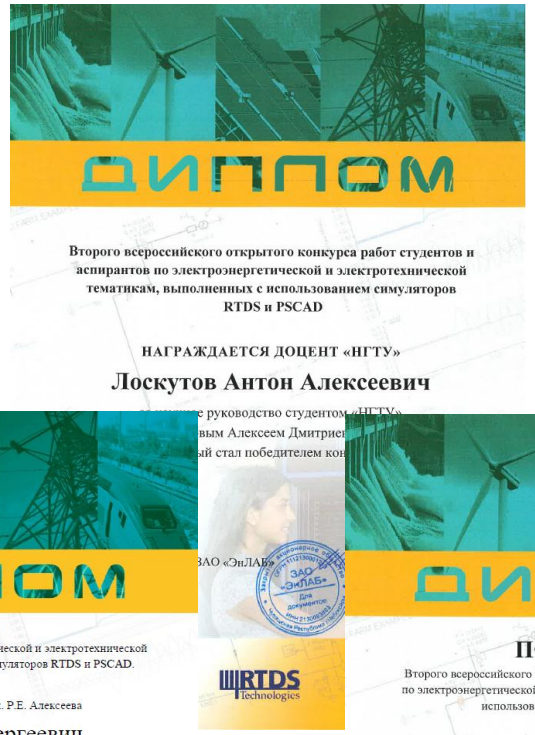


Диаграммы работы резервной ступени токовой направленной защиты нулевой последовательности



НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

# Участие во всероссийском конкурсе студенческих работ с использованием симулятора PSCAD



# Выводы

Применение программного комплекса PSCAD в НГТУ им. Р. Е. Алексеева позволяет:

- развивать у магистрантов навыки имитационного моделирования;
- повысить эффективность изучения сложных электротехнических дисциплин;
- анализировать переходные режимы работы объектов генерации, передачи и распределения электроэнергии, силовой электроники;
- облегчить процесс восприятия лекционного материала по читаемым дисциплинам;
- создавать и отрабатывать алгоритмы и логику работы существующих и разрабатываемых устройств защиты и управления, автоматики нормальных режимов и аварийных режимов;
- моделировать с высокой точностью волновые электромагнитные переходные процессы – сигналы тока и напряжения.

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р. Е. Алексеева

# Спасибо за внимание!

*Лоскутов Антон Алексеевич*

*к.т.н., доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

*тел. +7 908-158-63-66*

*loskutov.nnov@gmail.com*