

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра Релейной Защиты и Автоматизации Энергосистем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Программа: Релейная защита и автоматизация энергосистем

Тема: Проектирование релейной защиты и автоматики ЦПС 220/110/10 кВ с программной реализацией алгоритма АЛАР в соответствии со стандартом МЭК 61850

| | |
|----------------------------|--------------|
| Студент: | Нухулов С.М. |
| Группа: | Э-12М-16 |
| Науч. руководитель: | Волошин А.А. |

МОСКВА 2018

Содержание разделов

1. Анализ действующих НТД по проектированию цифровых подстанций;
2. Разработка комплекса РЗА ЦПС 220/110/10 кВ по стандарту МЭК 61850;
3. Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР по стандарту МЭК 61850.

В рамках реализации национального проекта «Разработка и внедрение цифровых электрических подстанций и станций на вновь строящихся и реконструируемых объектах энергетики», актуальной является задача формирования объектных моделей данных логических узлов противоаварийной автоматики, широко распространенных в составе устройств, предотвращающих межсистемные аварийные и ненормальные режимы в Единой Энергетической Системе России, которые не описаны серией стандартов МЭК 61850, и требуют стандартизации.

Анализ действующих НТД по проектированию ЦПС

- Обновленная версия СТО «ФСК ЕЭС» «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ» (стандарт введен в августе 2017);
- СТО «ФСК ЕЭС» «Типовые методики испытаний компонентов ЦПС на соответствие стандарту МЭК 61850 первой и второй редакций» (стандарт введен в марте 2018).

В отечественной электроэнергетической отрасли отсутствуют НТД по вопросам разработки, проектирования, пусконаладочных работ, эксплуатации комплексов и устройств РЗА, построенных на базе технологии «ЦПС».

Разработка комплекса РЗА ЦПС 220/110/10 кВ по стандарту МЭК 61850

Таблица 1. Параметры сети ВН

| U _{ном} , кВ | Параметры систем | | | | Длина воздушных линий, км | |
|-----------------------|----------------------------|--------------|------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| | ЭС-1 | | ЭС-2 | | L ₁ (AC-240) | L ₂ (AC-240) |
| | S _{ном} , МВ А | X*с, о.е. | S _{ном} , МВА | X*с, о.е. | | |
| 220 | 376 | 1,0 | 175 | 1,8 | 80 | 65 |

Таблица 2. Параметры сети СН

| U _{ном} , кВ | Параметры систем | | | | Длина воздушных линий, км | | | | |
|-----------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|--------------|--|----------------------------|--|----------------------------|----------------------------|
| | ЭС-3 | | ЭС-4 | | L ₃ (L ₈) (AC-240) | L ₄ (AC-240) | L ₅ (L ₉) (AC-185) | L ₆ (AC-150) | L ₇ (AC-150) |
| | S _{ном} , МВ А | X*с, о.е. | S _{ном} , МВ А | X*с, о.е. | | | | | |
| 110 | 80 | 1,1 | 170 | 1,7 | 14 | 20 | 30 | 30 | 40 |

Таблица 3. Параметры сети НН

| U _{ном} , кВ | P _{нг макс} , МВт | cosφ _{ном} | Параметры распределительных пунктов | | |
|-----------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------|
| | | | Тип РП | P _{нг макс} , МВт | Кол-во шт. |
| | | | | | |
| 10 | 50 | 0,85 | б | 4 | 8 |
| | | | в | 4 | 8 |

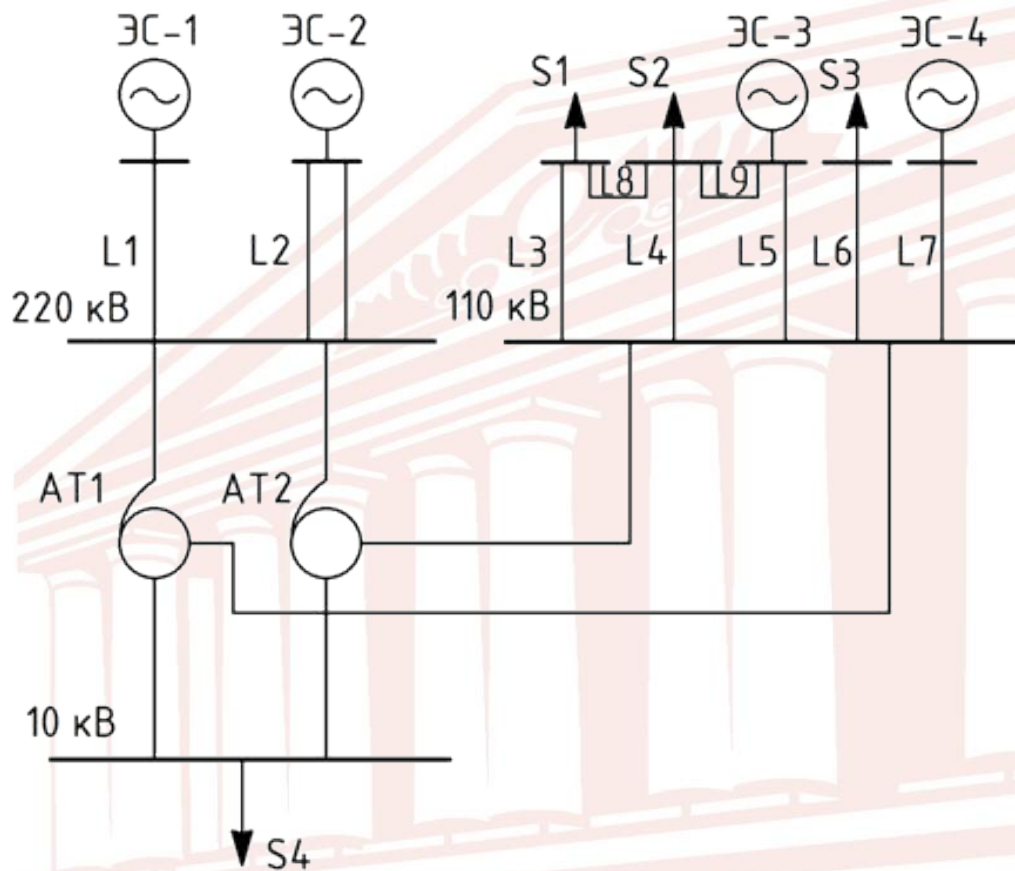


Рисунок 1. Принципиальная схема исследуемой сети

Разработка комплекса РЗА ЦПС 220/110/10 кВ по стандарту МЭК 61850

Требования к организации и размещению устройств АЛАР

СТО 59012820.29.020.008-2015 «СО ЕЭС» «Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования.»:

- на каждой связи, по которой возможен асинхронный режим, должно обеспечиваться селективное выявление асинхронного режима с ЭЦК в любой точке связи двумя устройствами АЛАР;
- асинхронный режим с ЭЦК на ЛЭП должны выявлять два устройства АЛАР, установленные на разных объектах электроэнергетики;
- алгоритм функционирования и настройка устройств АЛАР в электрической сети напряжением 220 кВ и выше и устройств АЛАР на генераторах должны обеспечивать выявление ЭЦК;
- установка отдельных устройств АЛАР, выявляющих и ликвидирующих неполнофазные асинхронные режимы, не требуется;
- действие устройств АЛАР на ДС должно производиться посредством отключения ЛЭП и/или электросетевого оборудования с запретом АПВ всех отключаемых выключателей;
- устройства АЛАР, установленные в электрической сети напряжением 220 кВ и ниже, должны выдавать УВ на ДС до начала пятого цикла асинхронного режима.

Разработка комплекса РЗА ЦПС 220/110/10 кВ по стандарту МЭК 61850

Выбор терминалов РЗА и УСО

Архитектура РЗА ЦПС в данном проекте: децентрализованный комплекс РЗА с применением «шины процесса» и «шины станции». В связи с тем, что на исследуемой подстанции установлены традиционные электромагнитные трансформаторы тока и напряжения, необходимо использовать устройства сопряжения с объектом (УСО), которые будут преобразовывать аналоговые сигналы в цифровые пакеты данных по протоколу SV, описанному в стандарте МЭК 61850-9-2.

Все терминалы релейной защиты и автоматики и устройства сопряжения с объектом в данной работе являются продуктами фирмы «ABB».

В качестве устройств УСО для преобразования аналоговых сигналов ТТ выбираем **SAM600-CT**.

Для преобразования аналоговых сигналов ТН выбираем **SAM600-VT**.

В качестве синхронизированного по времени шлюза измеряемых величин выбираем устройство **SAM600-TS**.

Для контроля и управления первичным оборудованием по протоколам GOOSE и MMS выбираем устройство **SAM600-IO**.

Разработка комплекса РЗА ЦПС 220/110/10 кВ по стандарту МЭК 61850

Структурная схема комплекса РЗА

Структурная схема комплекса РЗА построена на основе локальной вычислительной сети с использованием протокола полного дублирования PRP, обеспечивающего «бесшовное» восстановление топологии сети после повреждения одного из ее элементов (т.е время восстановления обмена данными по сети после повреждения равно нулю).

В качестве связующих устройств ЛВС используются коммутаторы **RSG2100NC** компании Ruggedcom, имеющие порты RJ45 (порты Ethernet) и LC-FO (оптические порты).

Синхронизация по времени на подстанции осуществляется благодаря протоколу PTP, обеспечивающего высокую точность синхронизации, которая достигается путем фиксации меток времени сообщений PTP на интерфейсах Ethernet на аппаратном уровне.

Гроссмейстерские часы — часы, являющиеся основным источником данных о времени при синхронизации согласно протоколу PTP, оснащены встроенным приемником сигналов GPS и ГЛОНАСС.

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Описание асинхронного режима в энергосистеме

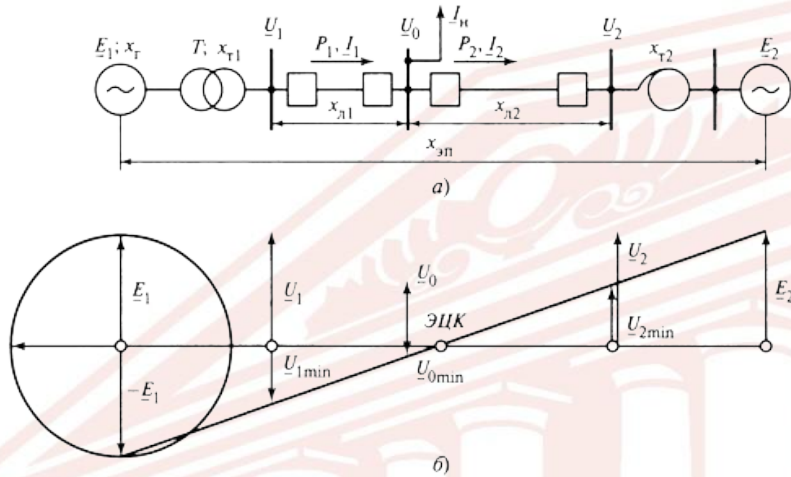


Рисунок 2. Схема электропередачи(а) и изменения напряжений в асинхронном режиме (б).

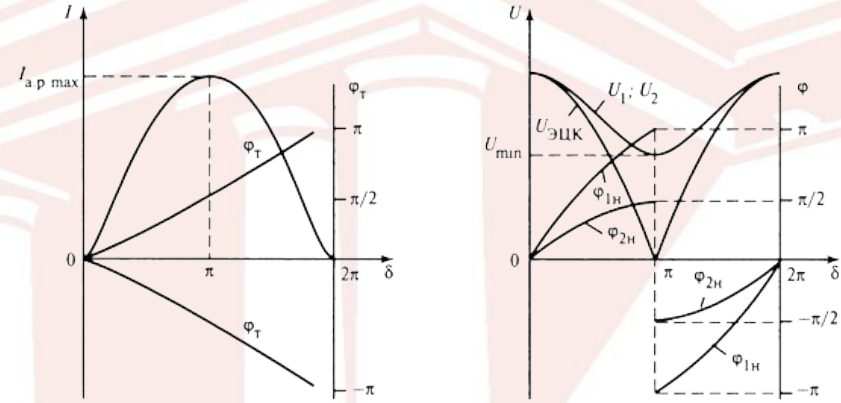


Рисунок 3. Графики изменения амплитуд и фаз тока(а) и напряжений при вращении ЭДС E1 против часовой стрелки (б).

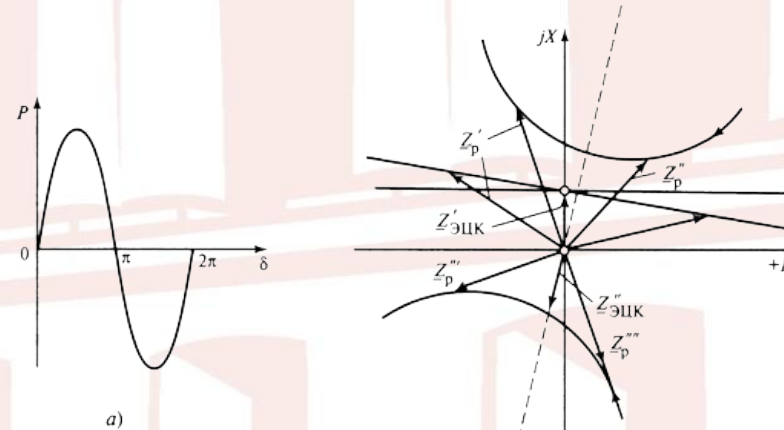


Рисунок 4. Изменения активной мощности электропередачи(а) и сопротивления на зажимах измерительных реле(б).

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Описание алгоритма АЛАР (out-of-step protection)

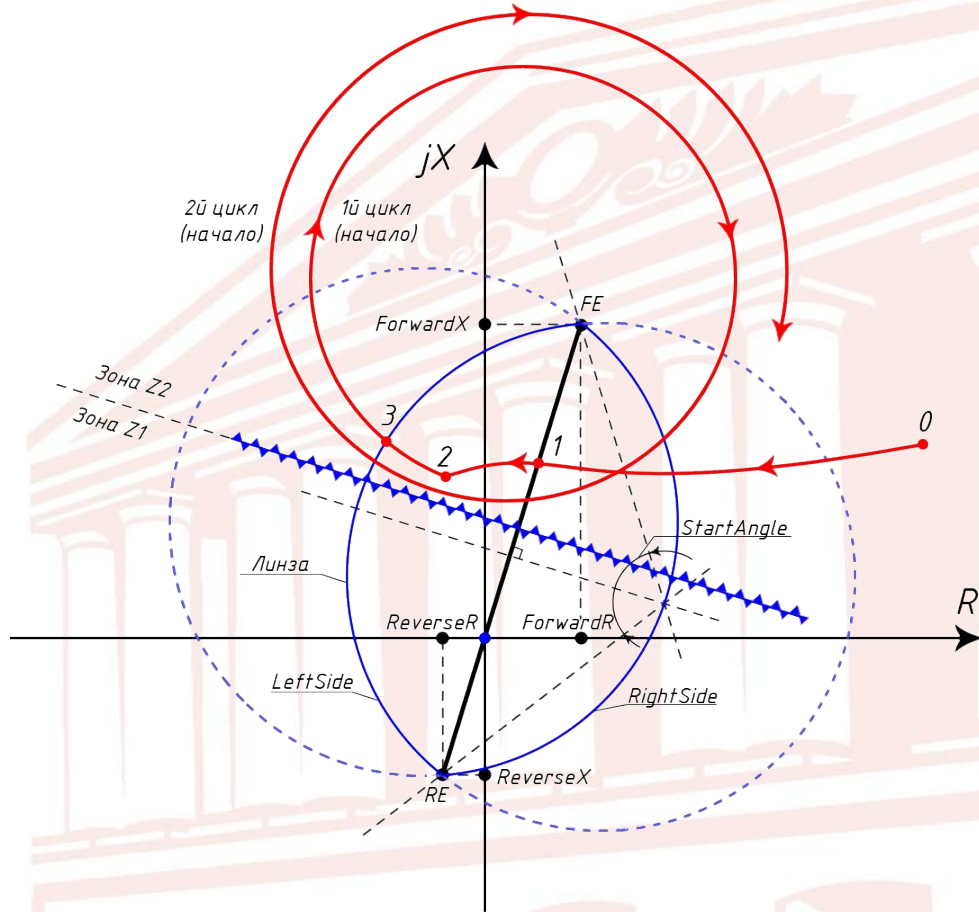


Рисунок 5. Характеристика срабатывания АЛАР

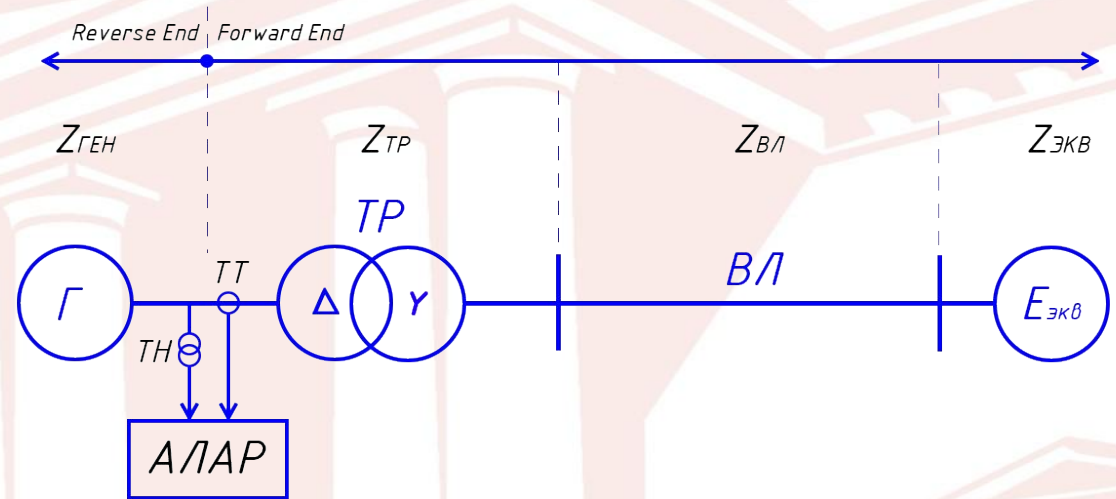


Рисунок 6. Однолинейная эквивалентная схема сети

Расчет уставок АЛАР:

$$\text{ForwardX} = X_{\text{тр}} + X_{\text{вл}} + X_{\text{экв}};$$

$$\text{ForwardR} = R_{\text{тр}} + R_{\text{вл}} + R_{\text{экв}};$$

$$\text{ReverseX} = X_{d'};$$

$$\text{ReverseR} = R_{\text{ген}}.$$

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Объектная модель логического узла POOS

| Имя атрибута | Тип атрибута | Пояснение | M/O |
|--|--------------|---|-----|
| LNName | | Наследуется от класса логического узла | |
| Данные | | | |
| Информация о статусе | | | |
| Str | ACD | Пуск | M |
| Op | ACT | Срабатывание | M |
| Zn1SlpDet | SPS | Срабатывание в первой зоне | M |
| Zn2SlpDet | SPS | Срабатывание во второй зоне | M |
| Gen | SPS | Поле генератора вращается быстрее полей системы в асинхронном режиме | O |
| Mot | SPS | Поле генератора вращается медленнее полей системы в асинхронном режиме | O |
| Ссылка на анализируемые параметры сети | | | |
| InRefI | IRS | Ссылка на объект логического узла, рассчитывающего действующее значение и фазу тока | O |
| InRefU | IRS | Ссылка на объект логического узла, рассчитывающего действующее значение и фазу напряжения | O |
| Параметры настройки | | | |
| Operation | ING | Ввод/вывод АЛАР | O |
| OperationZ1 | ING | Разрешение срабатывания АЛАР в зоне Z1 | O |

| | | | |
|--------------|-----|---|---|
| OperationZ2 | ING | Разрешение срабатывания АЛАР в зоне Z2 | O |
| ReachZ1 | ING | Процент от ForwardX, определяющий зону Z1 | O |
| TmMult | ASG | Умножитель уставок времени | O |
| tDetect | ING | Минимальная уставка по времени для фиксации АХ | O |
| tBreaker | ING | Собственное время отключения выключателя | O |
| NoOfSlipsZ1 | ING | Уставка по количеству циклов АХ на срабатывание в зоне Z1 | O |
| NoOfSlipsZ2 | ING | Уставка по количеству циклов АХ на срабатывание в зоне Z2 | O |
| tReset | ING | Время на возврат | O |
| ForwardR | ASG | | O |
| ForwardX | ASG | | O |
| ReverseR | ASG | | O |
| ReverseX | ASG | | O |
| StartAngle | ASG | Значение взаимного угла, разрешающего работу АЛАР | O |
| TripAngle | ASG | Значение взаимного угла, разрешающего срабатывание АЛАР | O |
| InvertCTCurr | ING | Инверсия направления тока | O |

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Расчет коэффициентов ФНЧ второго порядка

Рассчитать коэффициенты цифрового ФНЧ второго порядка необходимо для частоты дискретизации $f_d = 4000$ Гц, т.к. в SV потоке содержится 80 выборок за период промышленной частоты для устройств РЗА, частоты среза $f_c = 55$ Гц.

$$f_{\text{ср_ан}} = \sqrt{2} \cdot \frac{f_d}{\pi} \cdot \text{tg} \left(\pi \frac{f_c}{f_d} \right) = \sqrt{2} \cdot \frac{4000}{\pi} \cdot \text{tg} \left(\pi \frac{55}{4000} \right) = 77,83 \text{ Гц};$$

$$\omega_{\text{ср_ан}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{ср_ан}} = 2 \cdot \pi \cdot 77,83 = 489,02 \text{ рад/с}$$

$$c_0 = 1; \quad c_1 = 0; \quad c_2 = 0;$$

$$d_0 = 1; \quad d_1 = \frac{4 \cdot f_d}{\omega_{\text{ср_ан}}} = \frac{4 \cdot 4000}{489,02} = 32,718; \quad d_2 = \frac{8 \cdot f_d^2}{\omega_{\text{ср_ан}}^2} = \frac{8 \cdot 4000^2}{489,02^2} = 535,3;$$

$$a_0 = c_0 + c_1 + c_2 = 1; \quad a_1 = 2 \cdot (c_0 - c_2) = 2; \quad a_2 = c_0 - c_1 + c_2 = 1;$$

$$k_1 = \frac{1}{(d_0 + d_1 + d_2)} = \frac{1}{(1 + 32,718 + 535,3)} = 0,001758$$

$$b_1 = -2 \cdot (d_0 - d_2) \cdot k_1 = -2 \cdot (1 - 535,3) \cdot 0,001758 = 1,879;$$

$$b_2 = -(d_0 - d_1 + d_2) \cdot k_1 = -(1 - 32,718 + 535,3) \cdot 0,001758 = -0,885$$

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Автоматический расчет параметров характеристики срабатывания АЛАР

Ниже представлены формулы для расчета параметров характеристики срабатывания на основе уставок ForwardX, ForwardR, ReverseX, ReverseR и StartAngle:

$$c = \sqrt{(ForwardX - ReverseX)^2 + (ForwardR - ReverseR)^2}; \quad k1 = \frac{ForwardX - ForwardR}{ReverseX - ReverseR};$$

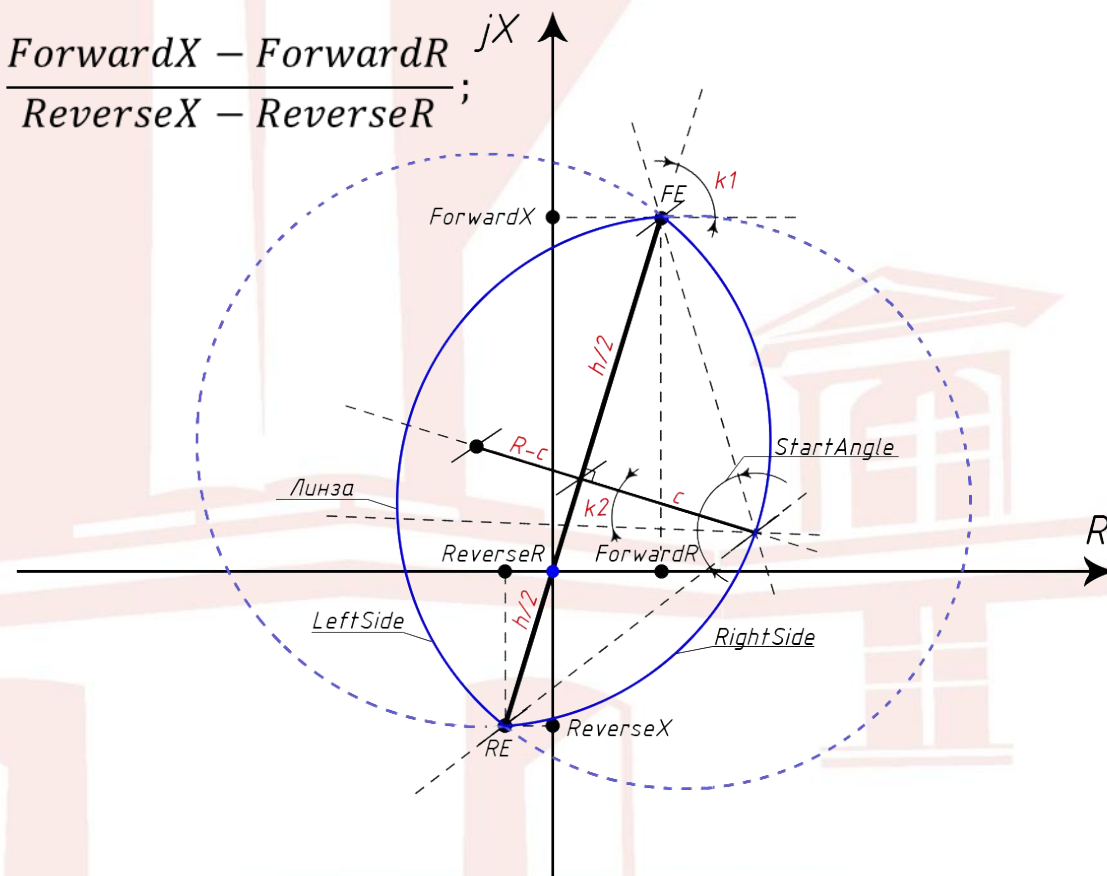
$$k2 = \tan\left(\text{atan}(k1) + \frac{\pi}{2}\right); \quad h = \frac{c}{2} \tan(StartAngle/2); \quad R = \frac{c^2}{8h} + \frac{h}{2};$$

$$XOspRS = \frac{ForwardX + ReverseX}{2} + (R - h) \cdot \sin(-\text{atan}(k2));$$

$$ROspRS = \frac{ForwardX + ReverseX}{2} - (R - h) \cdot \cos(-\text{atan}(k2));$$

$$XOspLS = \frac{ForwardX + ReverseX}{2} - (R - h) \cdot \sin(-\text{atan}(k2));$$

$$ROspLS = \frac{ForwardX + ReverseX}{2} + (R - h) \cdot \cos(-\text{atan}(k2))$$



Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Расчет уставок АЛАР

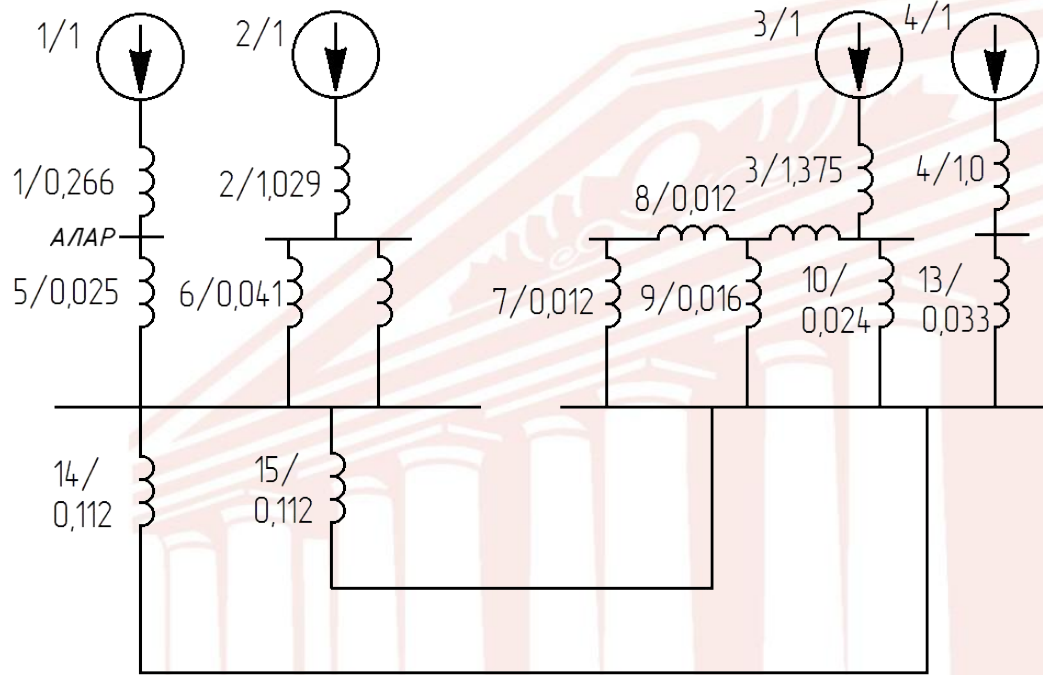


Рисунок 6. Схема замещения исследуемой сети (ПП)

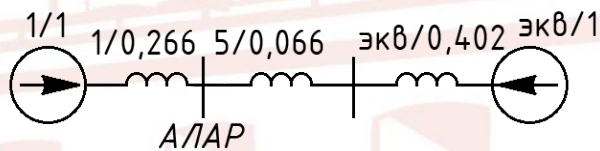


Рисунок 7. Эквивалентная схема замещения исследуемой сети (ПП)

$$ForwardX = \left(X_{*5(6)} + X_{*ЭКВ(6)} \right) \cdot \frac{U_{6I}^2}{S_{баз}} = (0,066 + 0,402) \cdot \frac{230^2}{100} = 247,6 \text{ Ом}$$

$$ForwardR = \left(r_{*5(6)} + r_{*ЭКВ(6)} \right) \cdot \frac{U_{6I}^2}{S_{баз}} = (0,018 + 0,03) \cdot \frac{230^2}{100} = 25,4 \text{ Ом}$$

$$ReverseX = X_{*1(6)} \cdot \frac{U_{6I}^2}{S_{баз}} = 0,266 \cdot \frac{230^2}{100} = 140,7 \text{ Ом}$$

$$ReverseR = r_{*1(6)} \cdot \frac{U_{6I}^2}{S_{баз}} = 0,019 \cdot \frac{230^2}{100} = 10,1 \text{ Ом}$$

$$ReachZ1 = X_{*5(6)} \cdot \frac{U_{6I}^2}{S_{баз}} = 0,066 \cdot \frac{230^2}{100} = 34,9 \text{ Ом}$$

$$ReachZ1 (\%) = \frac{ReachZ1}{ForwardX} \cdot 100\% = \frac{34,9}{247,6} \cdot 100\% = 14\%$$

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы блока RMXU в Matlab/Simulink

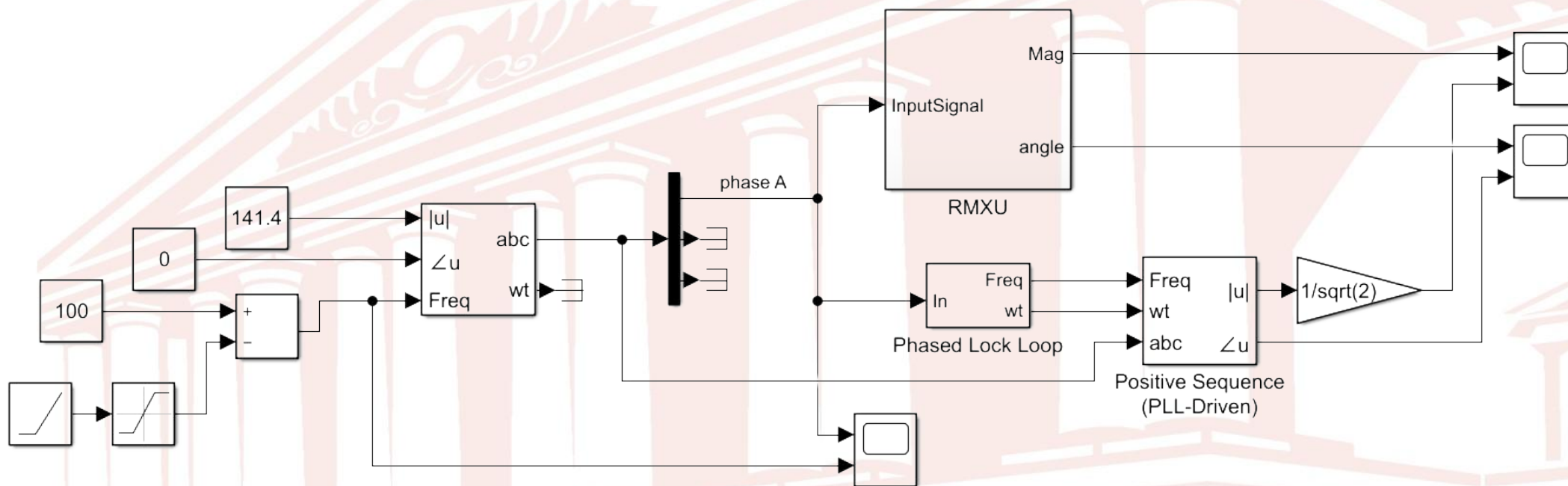


Рисунок 8 . Интерфейс конфигуратора прототипа устройства АЛАР

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы блока RMXU в Matlab/Simulink

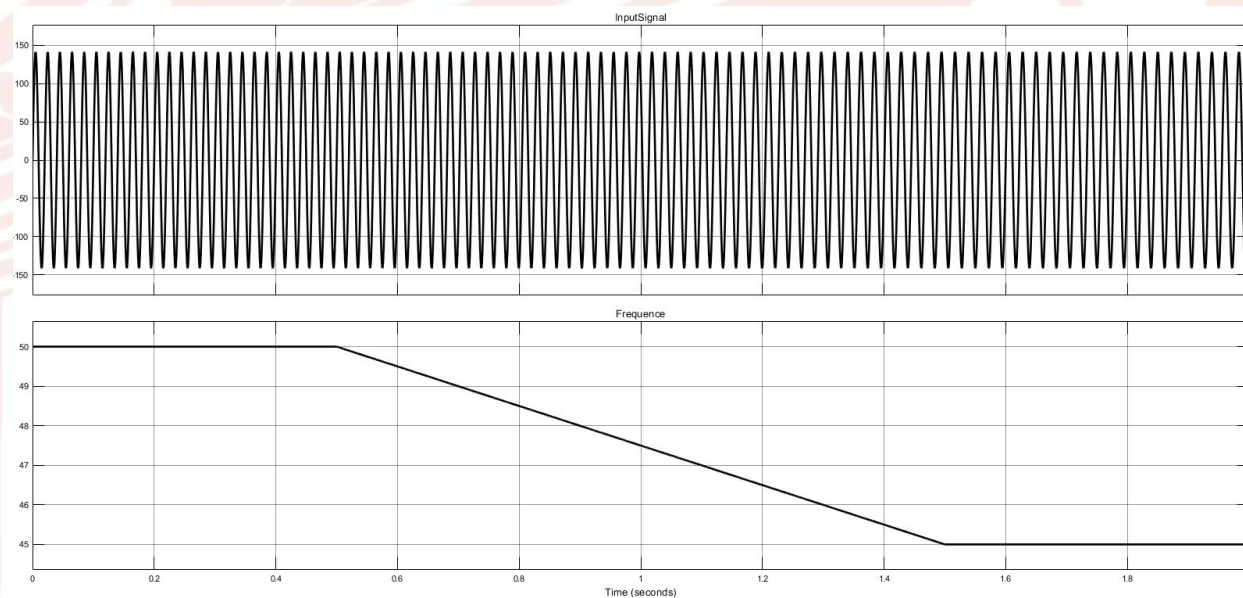


Рисунок 9 . Осциллограмма исследуемого сигнала и его частоты

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы блока RMXU в Matlab/Simulink

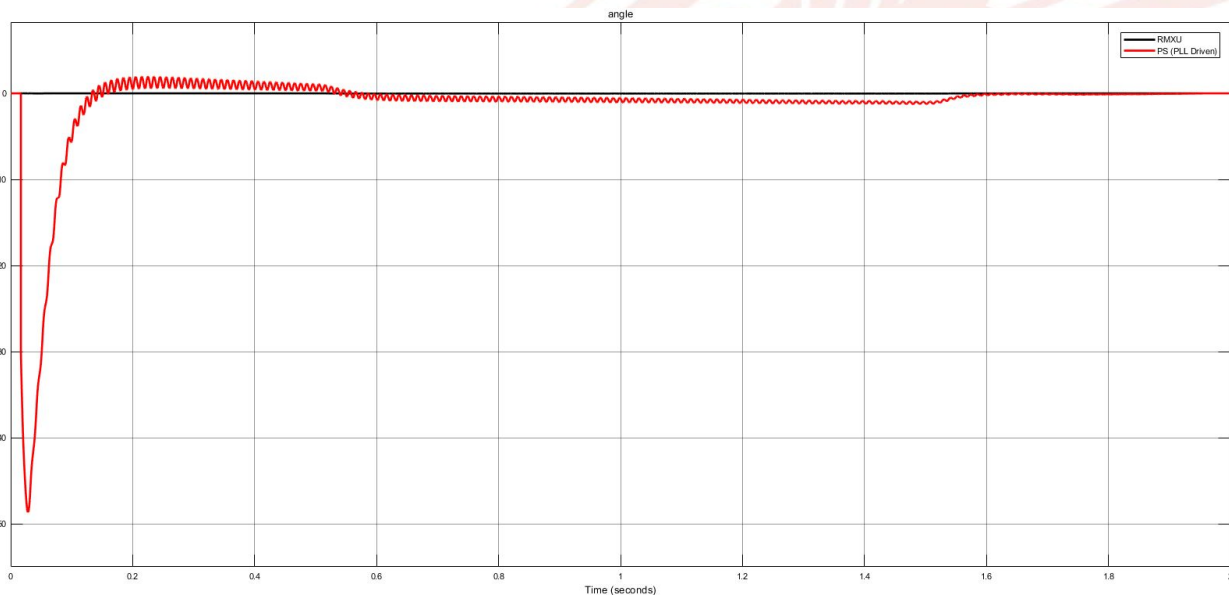


Рисунок 10 . Осциллограмма фазы сигнала InputSignal с выходов RMXU и PS (PLL Driven)

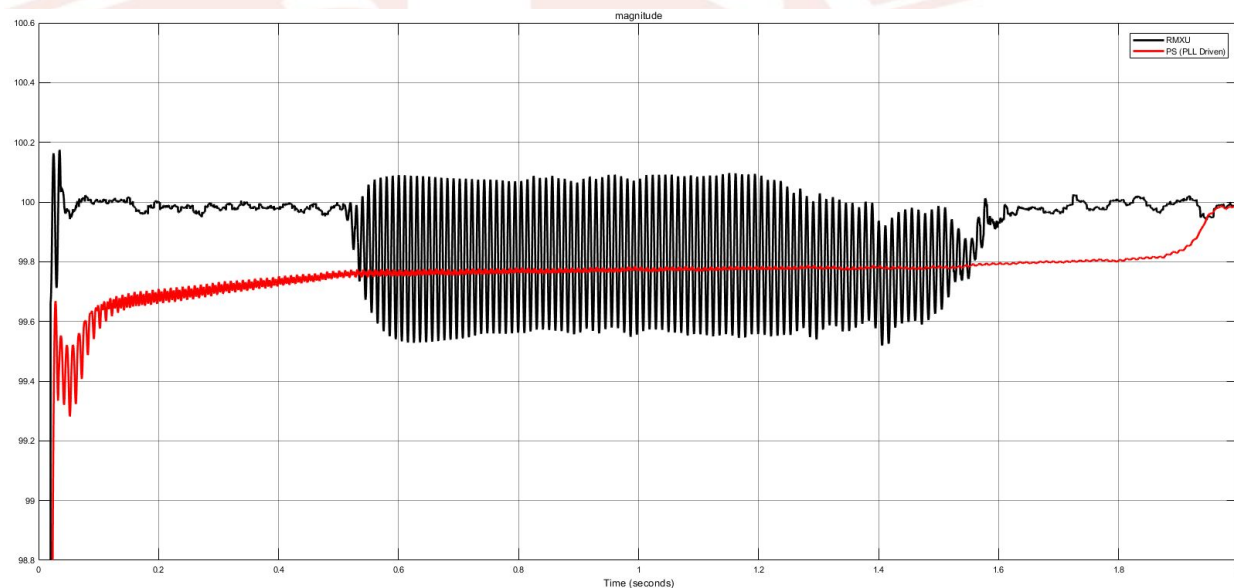


Рисунок 11 . Осциллограмма действующего значения сигнала InputSignal с выходов RMXU и PS (PLL Driven)

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы блока RMXU в Matlab/Simulink

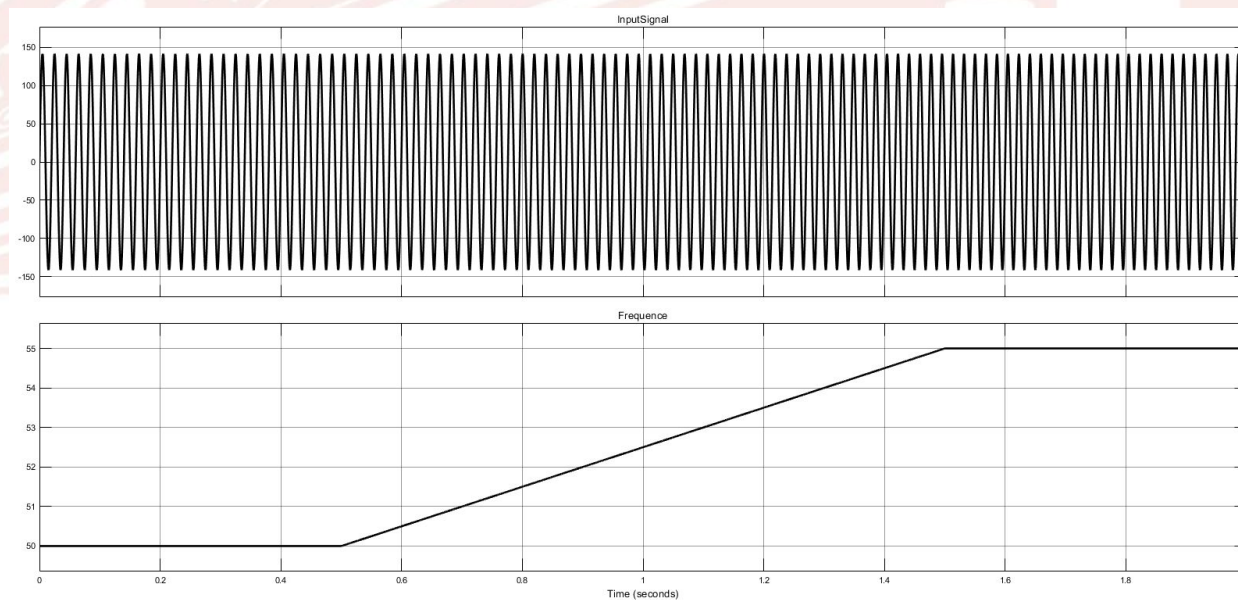


Рисунок 12 . Осциллограмма исследуемого сигнала и его частоты

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы блока RMXU в Matlab/Simulink

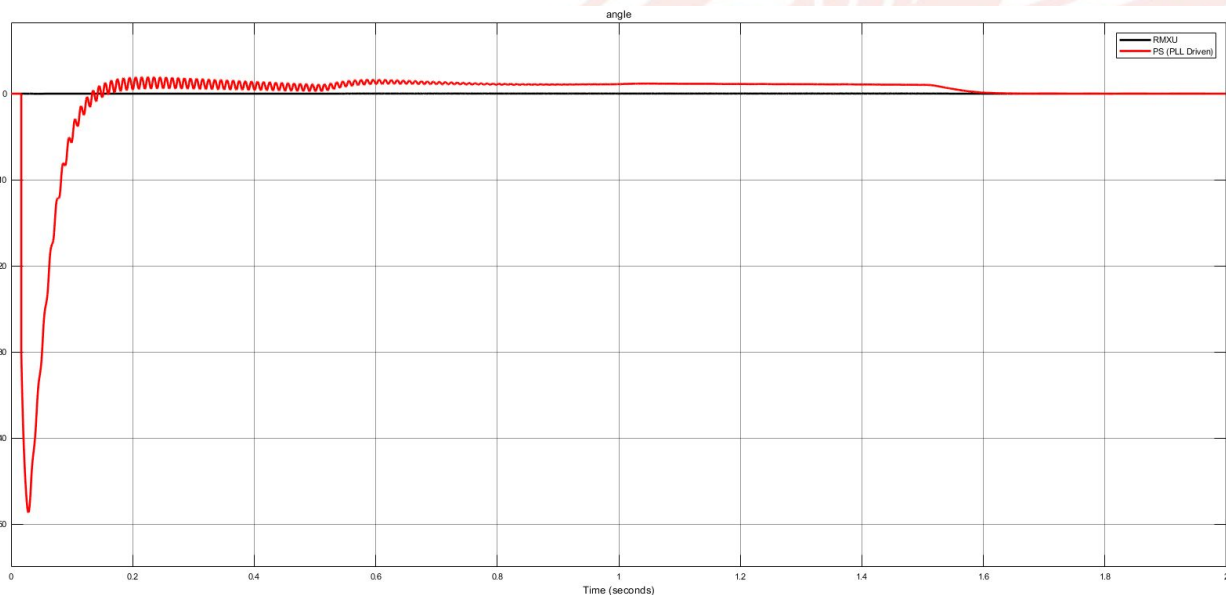


Рисунок 13 . Осциллограмма фазы сигнала InputSignal с выходов RMXU и PS (PLL Driven)

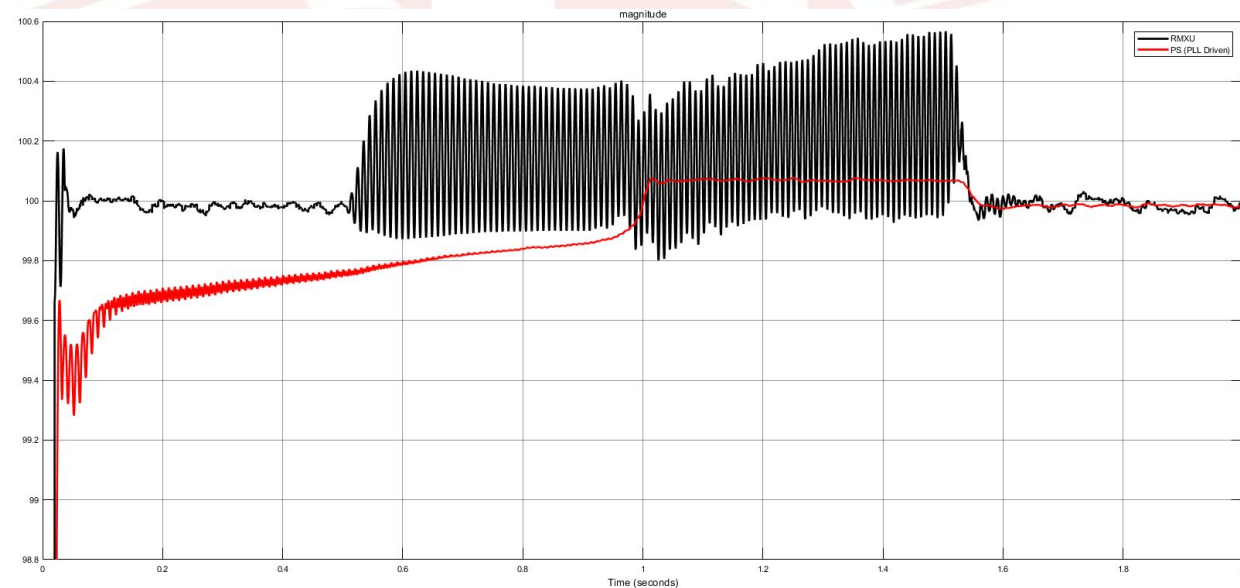


Рисунок 14 . Осциллограмма действующего значения сигнала InputSignal с выходов RMXU и PS (PLL Driven)

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы блока RMXU в Matlab/Simulink

Таблица 4. Погрешности блоков RMXU и PS (PLL Driven)

| | действующее значение | | фаза | |
|----------------|----------------------|-----------|-------------|-----------|
| | перех.режим | уст.режим | перех.режим | уст.режим |
| RMXU | 0,5% | 0,04% | 0,01% | 0,001% |
| PS(PLL Driven) | 0,3% | 0,02% | 0,55% | 0,01% |

Погрешности расчета действующего значения и фазы исследуемого сигнала в переходном режиме (резкое изменение частоты в течение короткого промежутка времени) функциональным блоком RMXU не превышает 10%, что является допустимым для устройств РЗиА. В отличие от блока Positive-Sequence (PLL Driven), блок RMXU способен рассчитывать действующее значение и фазу сигнала независимо для каждой фазы отдельно, что является существенным преимуществом при несимметричных коротких замыканиях.

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Конфигурация прототипа устройства АЛАР

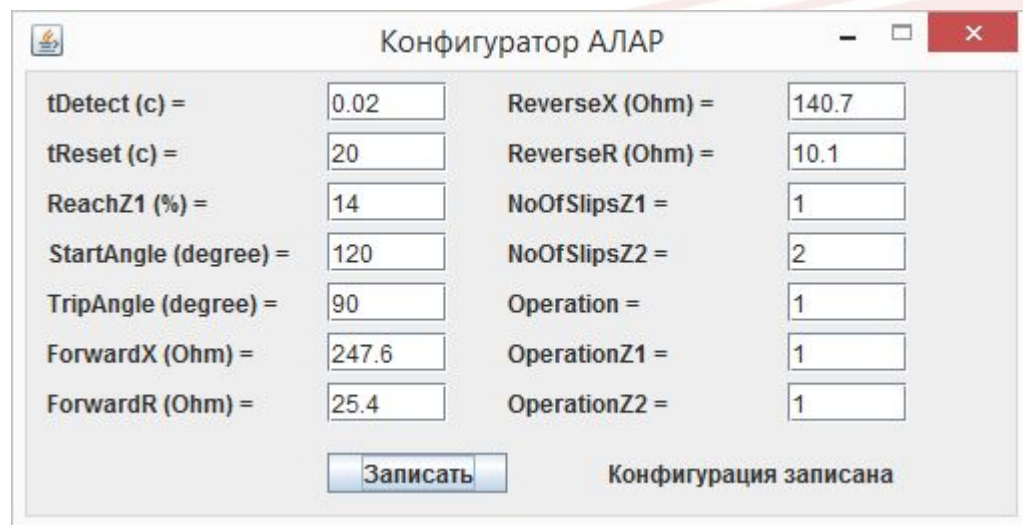


Рисунок 8 . Интерфейс конфигуратора прототипа устройства АЛАР

Часть конфигурационного файла:

```
<LN lnType="POOS" prefix=""  
lnClass="POOS" inst="1" desc="АЛАР">  
<DOI name="ForwardR">  
<DAI name="setVal" valKind="Set">  
    <Val sGroup="1">25.4</Val>  
</DAI>  
</DOI>  
<DOI name="ForwardX">  
<DAI name="setVal" valKind="Set">  
    <Val sGroup="1">247.6</Val>  
</DAI>  
</DOI>  
<DOI name="ReverseR">  
<DAI name="setVal" valKind="Set">  
    <Val sGroup="1">10.1</Val>  
</DAI>  
</DOI>
```

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы прототипа устройства АЛАР

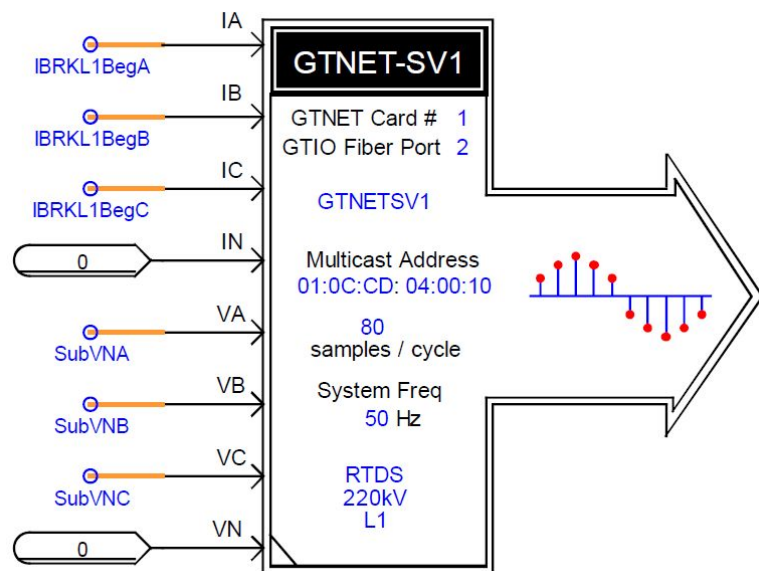


Рисунок 15 . Блок передачи и получения SV-пакетов в RSCAD

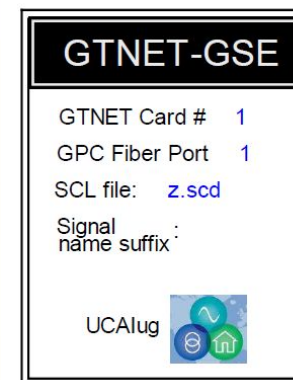


Рисунок 16 . Блок передачи и получения GOOSE-сообщений в RSCAD

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы прототипа устройства АЛАР

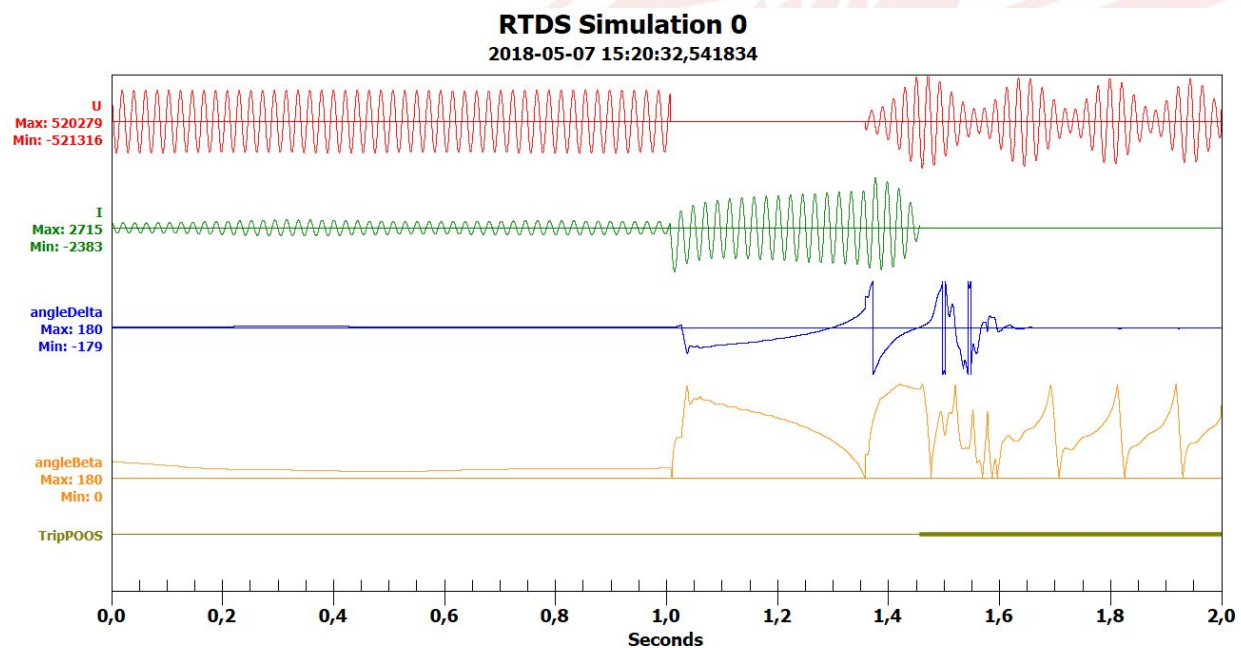


Рисунок 17 . Осциллограмма аналоговых сигналов мгновенных напряжения на шинах ЭС-1 (U) и тока в линии L1 (I), взаимного угла между напряжениями начала и конца линии L1 (angleDelta), угла мощности между током и напряжением (angleBeta) и дискретного сигнала срабатывания АЛАР (TripPOOS) при КЗ на шинах ВН

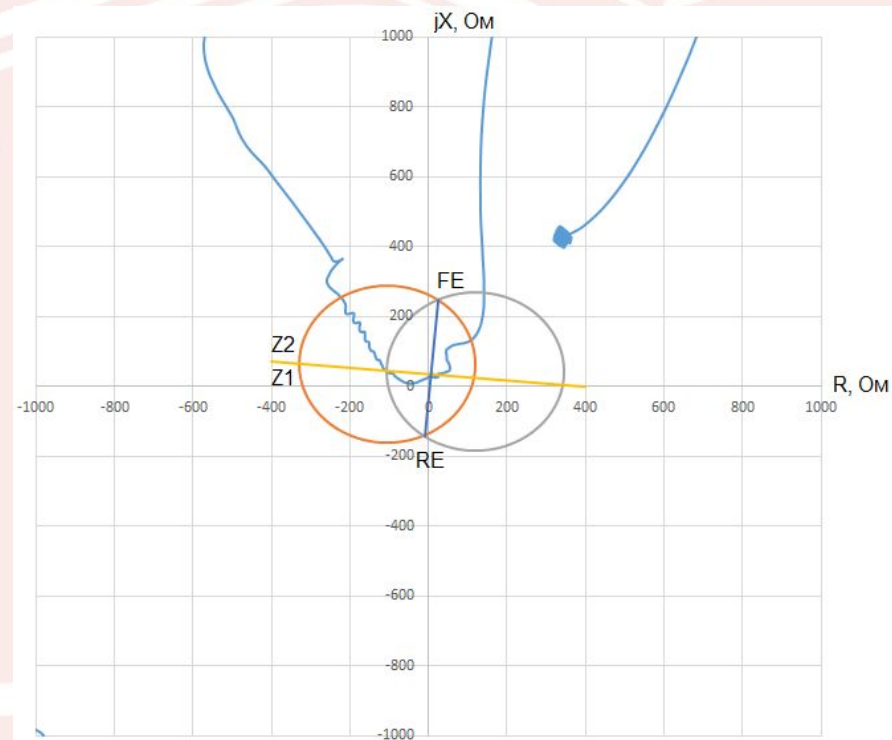


Рисунок 18 . Годограф комплексного сопротивления при КЗ на шинах ВН

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Анализ работы прототипа устройства АЛАР

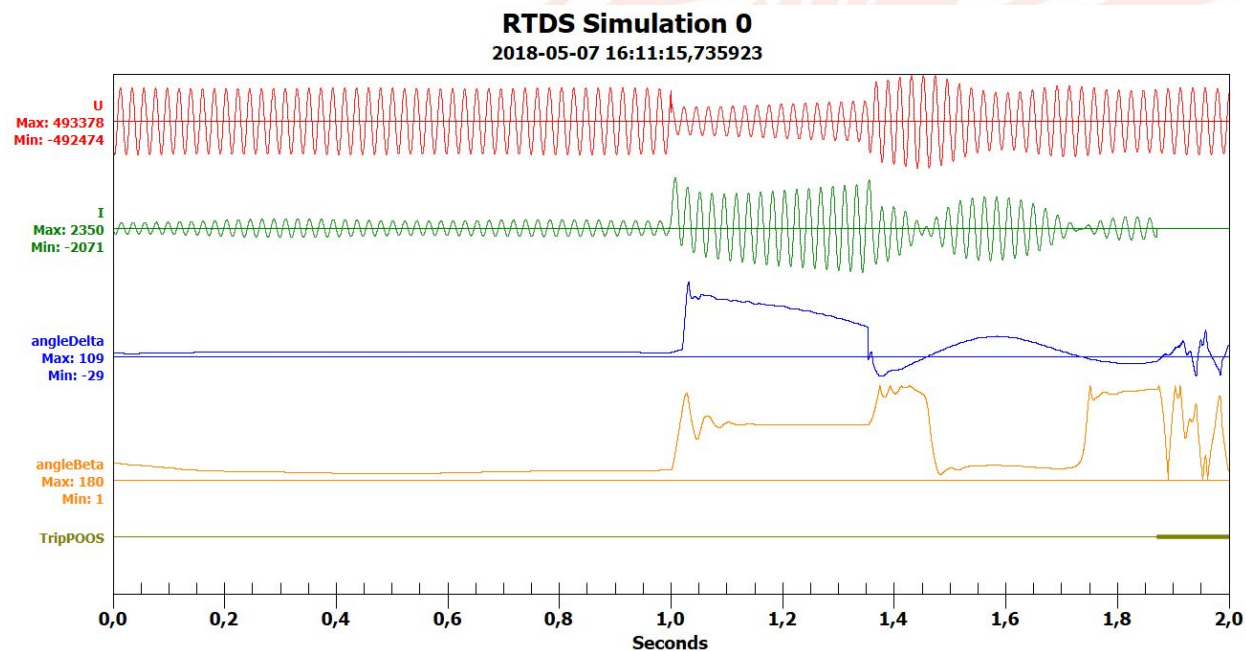


Рисунок 19 . Осциллограмма аналоговых сигналов мгновенных напряжения на шинах ЭС-1 (U) и тока в линии L1 (I), взаимного угла между напряжениями начала и конца линии L1 (angleDelta), угла мощности между током и напряжением (angleBeta) и дискретного сигнала срабатывания АЛАР (TripPOOS) при КЗ на шинах СН

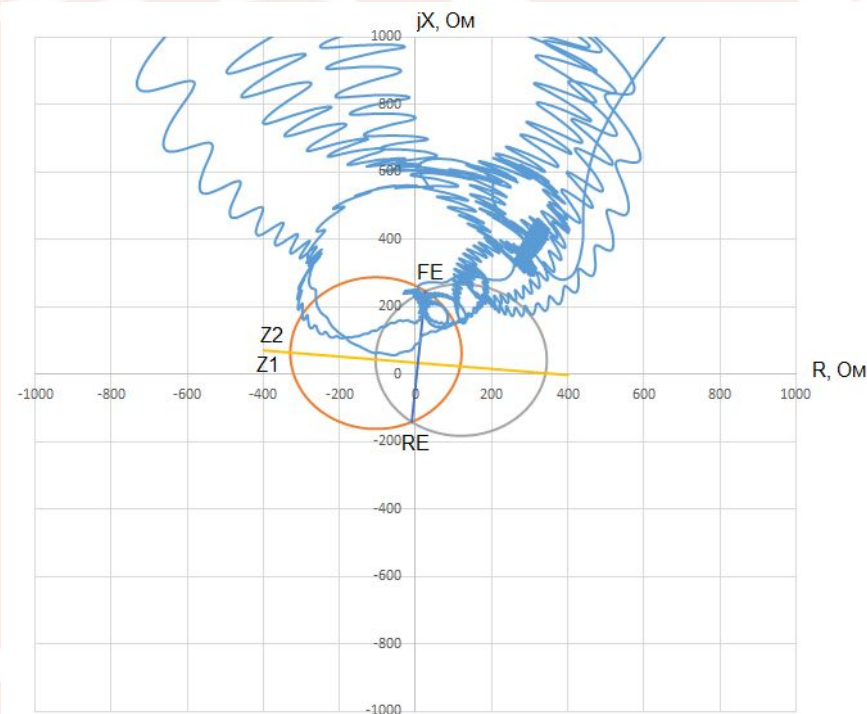


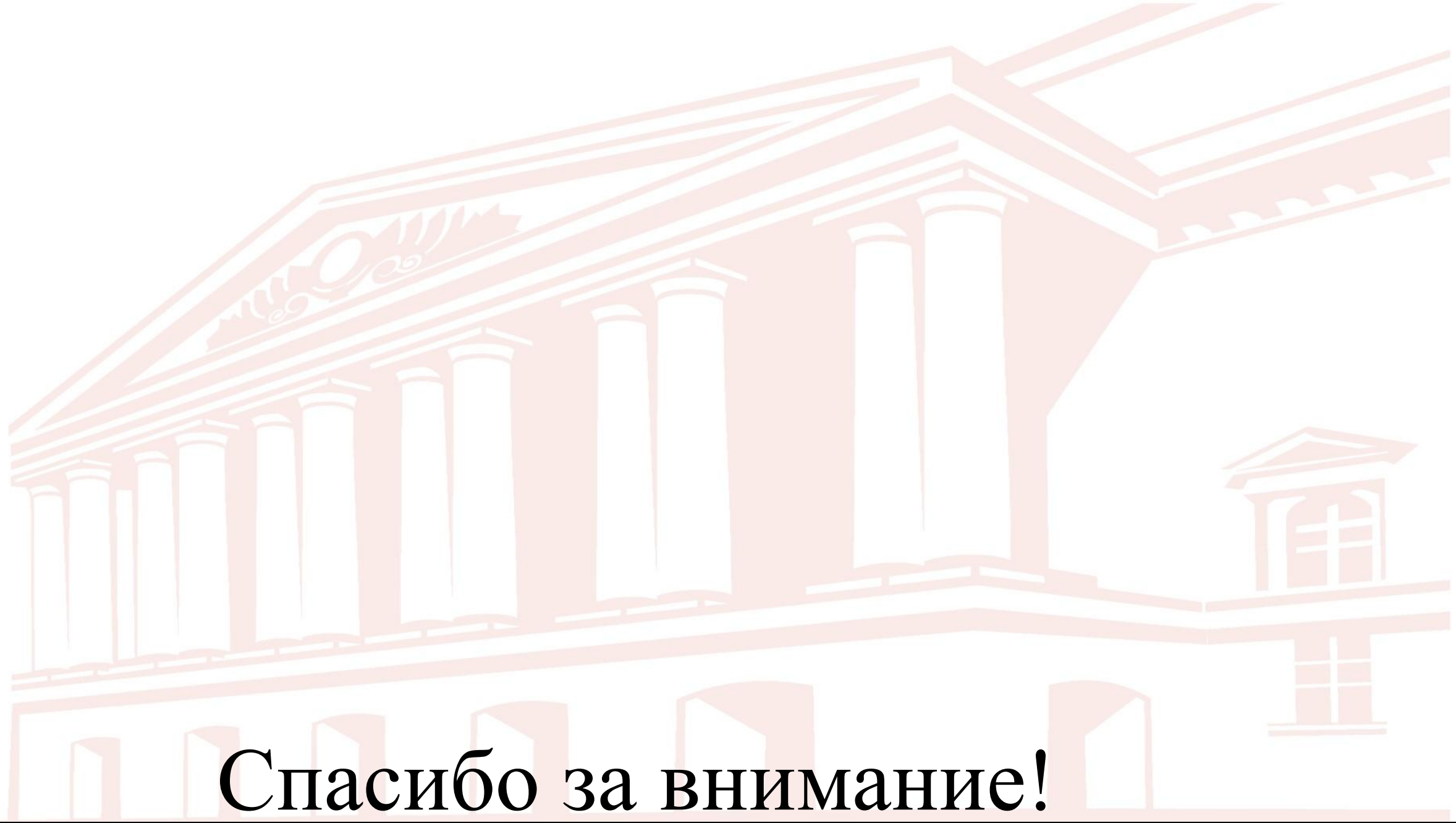
Рисунок 20 . Годограф комплексного сопротивления при КЗ на шинах СН

Разработка и описание программной реализации алгоритма АЛАР

Заключение

Разработанный прототип устройства АЛАР по стандарту МЭК 61850 отвечает поставленным требованиям ОАО «СО ЕЭС» «Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования», фиксирует циклы асинхронного режима, ведет их подсчет и срабатывает при достижении заданного значения количества циклов. Не срабатывает в отсутствии асинхронного режима (в нормальном режиме и в режиме КЗ). Прототип устройства способен работать в реальном времени и в заданной частотной области (45-55 Гц).

Разработанная объектная модель устройства позволяет частично решить проблему взаимозаменяемости физических устройств от разных производителей, реализующих функцию АЛАР на микропроцессорной элементной базе.



Спасибо за внимание!