

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический

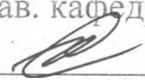
Кафедра энергетики

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) программы Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина

« 09 » 06 2018 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Повышение качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой в районе подстанции Сковородино Амурской области

Исполнитель

студент группы 642 ом

 06.08.2018

(подпись, дата)

Е.А. Шванева

Руководитель

профессор, доктор

технических наук

 08.06.2018

(подпись, дата)

Н.В. Савина


Руководитель научного

содержания программы

магистратуры

профессор, доктор

технических наук

 08.06.2018

(подпись, дата)

Н.В. Савина

Нормоконтроль

доцент, кандидат

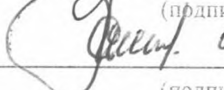
технических наук

 08.06.2018

(подпись, дата)

А.Н. Козлов

Рецензент

 08.06.2018

(подпись, дата)

С.А. Нарубайева

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина

« 21 » 03 2018 г.

ЗАДАНИЕ

К магистерской диссертации студента Шваневой Екатерины Анатольевны

1. Тема магистерской диссертации: Повышение качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой в районе подстанции Сковородино Амурской области

(утверждено приказом от 27.10.2017 № 2651-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной диссертации 05.06.2018 г.

3. Исходные данные к магистерской диссертации: материалы преддипломной практики

4. Содержание магистерской диссертации (перечень подлежащих разработке вопросов):

Характеристика объекта исследования, оценка качества электрической энергии, способы улучшения качества электрической энергии, оценка экономической эффективности от улучшения качества электрической энергии

5. Перечень материалов приложения: Приложение А Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, Приложение Б Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности, Приложение В Расчет показателей качества электрической энергии после установки фильтросимметрирующего устройства, 3 листа графической части

6. Консультанты по диссертации (с указанием относящихся к ним разделов):

7. Дата выдачи задания 21.03.2018

Руководитель магистерской диссертации: Савина Наталья Викторовна, доктор технических наук, профессор

(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата):  21.03.2018

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 98 с., 29 рисунков, 26 таблиц, 80 источников, 3 приложения.

ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ, КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ФИЛЬТРОСИММЕТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО, АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ, НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ, НЕСИММЕТРИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.

В магистерской диссертации рассмотрены способы улучшения качества электрической энергии в сетях с тяговой нагрузкой.

Проанализировано влияние тяговой нагрузки на качество электрической энергии, произведен анализ схемно-режимной ситуации выбранного участка электрической сети, рассчитаны показатели качества электрической энергии, произведен анализ мероприятий для повышения качества электрической энергии, рассмотрено влияние низкого качества электроэнергии на потери в электрооборудовании.

СОДЕРЖАНИЕ

Нормативные ссылки	6
Определения, обозначения, сокращения	7
Введение	8
1 Характеристика объекта исследования	10
1.1 Структурный анализ электрической сети	10
1.1.2 Выделение и структурный анализ источников питания	12
1.1.3 Структурный анализ линий электропередачи	17
1.1.4 Подробный анализ ПС Сковородино	19
1.2. Анализ режимной ситуации	25
1.2.1 Выбор участка сети для расчета режима	25
1.2.2 Выбор и характеристика ПВК для расчета режима	27
1.2.3. Подготовка исходных данных и расчет режима	28
1.3 Особенности электроснабжения железнодорожного транспорта	39
1.4 Влияние тяговой нагрузки на качество электрической энергии	43
1.5 Негативные последствия от низкого качества электрической энергии	45
1.5.1 Отклонение напряжения	45
1.5.2 Несимметрия напряжения	46
1.5.3 Несинусоидальность напряжения	48
2 Оценка качества электрической энергии	49
2.1 Нормативные значения показателей качества электрической энергии	50
2.1.1 Отклонение напряжения	50
2.1.2 Несинусоидальность напряжения	51
2.1.3. Несимметрия напряжения	53
2.2 Методика расчета показателей качества электрической энергии	54
2.2.1 Расчет несинусоидальности напряжения	54
2.2.2 Расчет несимметрии напряжений	59
3 Способы улучшения качества электрической энергии	65
3.1 Схемные решения	65

3.2 Технические средства	67
3.3 Расчет фильтросимметрирующего устройства	80
3.4 Расчет и анализ показателей качества электрической энергии после установки фильтросимметрирующего устройства	82
4 Оценка экономической эффективности от повышения качества электрической энергии	85
4.1. Расчет потерь в силовом трансформаторе	85
4.2 Оценка стоимости установки фильтросимметрирующего устройства	90
Заключение	91
Библиографический список	92
Приложение А Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения	99
Приложение Б Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности	183
Приложение В Расчет показателей качества электрической энергии после установки фильтросимметрирующего устройства	211

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей магистерской диссертации использованы ссылки на следующие стандарты и нормативные документы:

ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Приказ от 23 июня 2015 г. № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии».

ГОСТ Р 57382-2017 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Стандартный ряд номинальных и наибольших рабочих напряжений.

ГОСТ Р 56303-2014 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление. Нормальные схемы объектов электроэнергетики. Общие требования к графическому исполнению.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- АТ – автотрансформатор;
- БК – батарея конденсаторов;
- ВГ – высшие гармоники;
- ВН – высокое напряжение;
- ГЭН – график электрической нагрузки;
- КЗ – короткое замыкание;
- КРМ – компенсация реактивной мощности;
- КЭ – качество электрической энергии;
- НН – низкое напряжение;
- НПС – нефтеперекачивающая станция;
- НФ – ненастроенный фильтр;
- ПБВ – переключение без возбуждения;
- ПКЭ – показатели качества электрической энергии;
- ПС – подстанция;
- РПН – регулирование под нагрузкой;
- РУ – распределительное устройство;
- СН – среднее напряжение;
- СРФ – силовой резонансный фильтр;
- СТ – силовой трансформатор;
- СУ – симметрирующие устройства;
- ТН – трансформатор напряжения;
- ТТ – трансформатор тока;
- ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство;
- ФСУ – фильтросимметрирующее устройство;
- ЭП – электрический приемник.

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт является эффективным и экономичным способом транспортировки большого количества пассажиров и грузов на дальние расстояния. Поскольку наша страна богата полезными ископаемыми, именно железнодорожный транспорт является оптимальным способом доставки больших грузов на дальние расстояния, от шахт и мест производства, до рынков сбыта. Железная дорога является той нитью, которая связывает столь большую страну воедино.

Общая протяженность железнодорожных путей в Российской Федерации составляет 87 тыс. км. Из них 52 % составляют электрифицированные железнодорожные пути. Электровоз при тех же габаритах, массе и технологическом уровне имеет значительно большую мощность, чем тепловоз или паровоз. К тому, электровозы лучше с экологической точки зрения, поскольку не создают выбросов в атмосферу. Данные преимущества обосновывают стремление многих стран к электрификации железнодорожного транспорта.

Кроме преимуществ электрифицированный железнодорожный транспорт имеет и ряд недостатков, одним из которых является негативное влияние тяговой нагрузки на качество электрической энергии. Очевидной особенностью тяговой нагрузки является непрерывное изменение числа, величины и местоположения нагрузки на межподстанционной зоне, что приводит к изменениям напряжения электропитания. Тяговые подстанции питают только две однофазные нагрузки, что приводит к несимметрии напряжений, а оборудование электровозов является источником высших гармоник, что в свою очередь приводит к несинусоидальности напряжений.

Неудовлетворительное качество электрической энергии отрицательно сказывается на остальных потребителях электрической энергии, оборудовании, системах связи и т.д.

Объектом исследования магистерской диссертации является электрическая сеть с тяговой нагрузкой в районе подстанции Сковородино Амурской области. Предметом данного исследования является качество электрической энергии.

Целью данной магистерской диссертации является – повышение качества электрической энергии на участке электрической сети вблизи ПС Сковородино Амурской области.

Для реализации поставленной цели необходимо выполнить ряд задач:

- произвести анализ схемно-режимной ситуации в районе ПС Сковородино Амурской области. Для выполнения данного пункта необходимо:
 - произвести структурный анализ выбранного участка электрической сети,
 - выполнить расчет режима электрической сети,
 - произвести анализ режимной ситуации на основании рассчитанного режима;
- подробно рассмотреть влияние тяговой нагрузки на качество электрической энергии и выявить на какие параметры в большей мере влияет электрифицированный железнодорожный транспорт;
- рассчитать показатели качества электрической энергии на ПС Сковородино;
- произвести анализ возможных вариантов повышения качества электрической энергии в сетях с тяговой нагрузкой;
- предложить вариант улучшения качества электрической энергии и оценить эффективность выбранного варианта;
- произвести расчет экономической эффективности выбранного варианта.

В ходе выполнения магистерской диссертации были использованы лицензионные программно-вычислительные комплексы RastrWin3 и Mathcad15.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

ПС 220 кВ Сковородино входит в Западный энергорайон Амурской энергосистемы. Данный район характеризуется высоким количеством тяговых подстанций. В связи с этим возникла необходимость анализа качества электрической энергии вблизи выбранной подстанции.

Также стоит отметить, что ПС Сковородино питает таких крупных потребителей как: ОАО «РЖД», ООО «Транснефть» НПС-21, ООО «Березитовый рудник».

Для начала необходимо произвести анализ схемно-режимной ситуации выбранного участка электрической сети.

1.1. Структурный анализ электрической сети

Для начала выделим участок электрической сети, для которого будем производить анализ схемно-режимной ситуации. Выделим часть Амурской энергосистемы, ограниченной на севере – Нерюнгринской ГРЭС, поскольку данная станция является источником питания для ПС Тынды, которая в свою очередь связана двумя КВЛ 220 кВ с ПС Сковородино. С запада выделенный участок сети ограничен энергосистемой Забайкальского края. Связь Амурской и Забайкальской энергосистем осуществляется по линиям: ВЛ 220 кВ Хани – Чара, ВЛ 220 кВ Ерофей Павлович – Чичатка и ВЛ 220 кВ Аячи/т – Амазар. С востока выделенный участок электрической сети ограничивается Зейской ГЭС, поскольку данная станция является источником питания для ПС Сковородино, также данная станция будет являться в данном эквиваленте балансирующим узлом. РУ 220 кВ Зейской ГЭС связана с ПС Ключевая и Магдагачи, данные подстанции являются транзитными и будут учтены в дальнейшем анализе.

На рисунке 1 представлен граф рассматриваемой электрической сети.

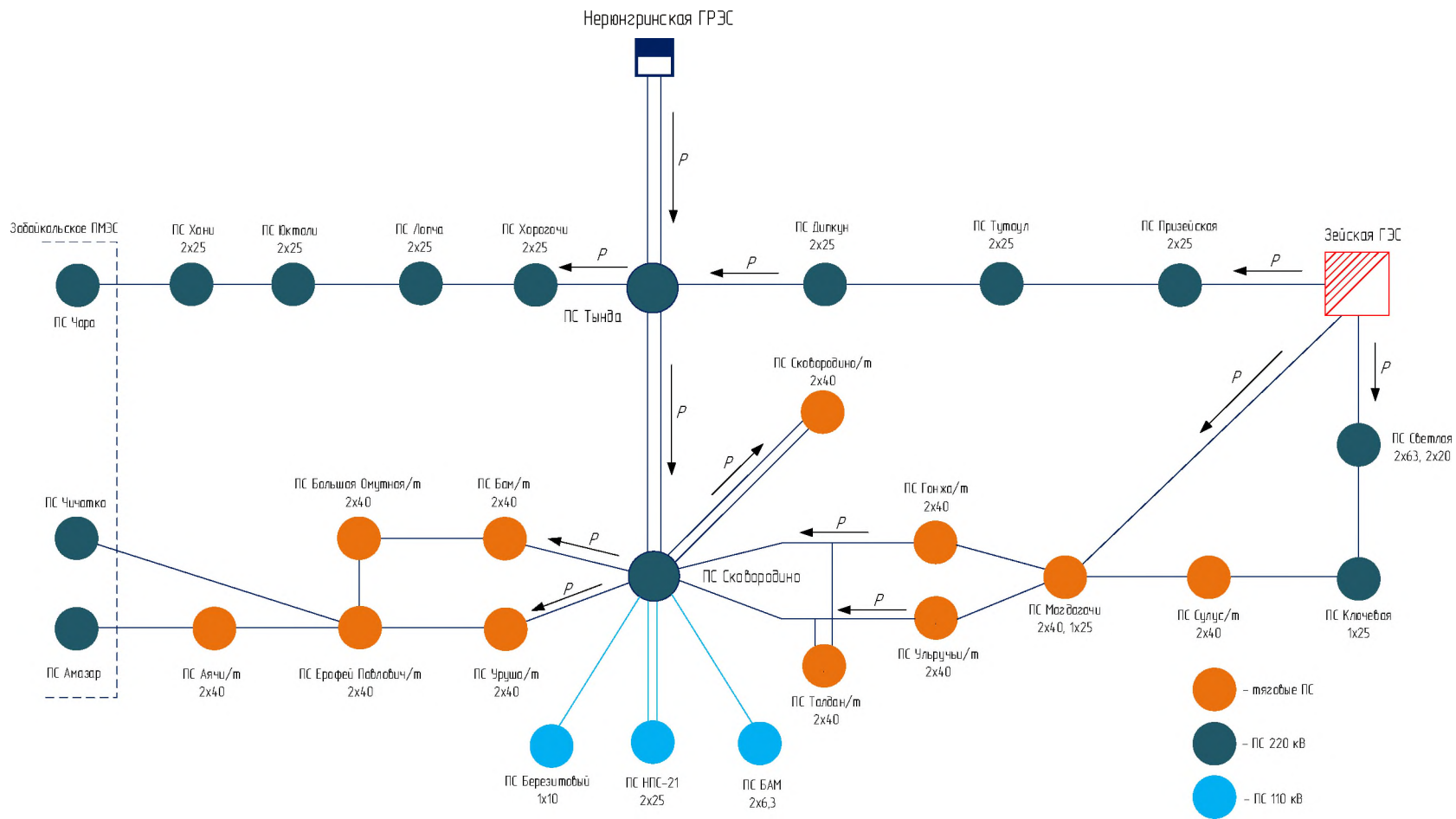


Рисунок 1 – Граф электрической сети

Из графа электрической сети видно, что ПС Сквородино связана линиями 220 кВ со следующими тяговыми ПС: ПС Сквородино/т, ПС Гонжа/т, ПС Ульручи/т, ПС Талдан/т, ПС Магдагачи, ПС Уруша/т, ПС БАМ/т, ПС Большая Омутная/т, ПС Ерофей Павлович/т, ПС Аячи/т. Представленный участок электрической сети и будет объектом исследования данной работы.

Однолинейная схема выбранного участка электрической сети представлена на листе 1 графической части.

1.1.2 Выделение и структурный анализ источников питания

ПС Сквородино получает питание от Нерюнградской ГРЭС, через ПС Тынды и от Зейской ГЭС, через ПС Магдагачи, ПС Гонжа/т, ПС Ульручи/т. Далее произведем анализ источников питания.

Нерюнградская ГРЭС расположена в пгт. Серебряный бор, Нерюнградского района Республики Саха (Якутия). Строительство станции было начато в 1980 году, в декабре 1983 года был введен в эксплуатацию первый энергоблок.

Установленная электрическая мощность – 570 МВт. Основное топливо – каменный уголь Нерюнградского месторождения.

Основное энергетическое оборудование НГРЭС включает в себя:

- три котлоагрегата ТПЕ-214 СЗХЛ производства Таганрогского котельного завода производительностью 670 тонн в час;
- турбины 1хЛ-210-130-3, 2хТ-180/210-130-3 производства Ленинградского завода номинальной электрической мощностью 210 МВт. Номинальная тепловая нагрузка на теплофикационных турбинах 2х260 Гкал/час, давление пара на турбину 130 кгс/см² (килограмм сила на метр в квадрате), температура пара у турбины 540 °С;
- генераторы 3хТГВ-200-2МУЗ производства Харьковского завода «Электротяжмаш» с тиристорным возбуждением, водородно-водяным охлаждением и напряжением на выводах 15,75 кВ [47].

Схема выдачи электрической мощности включает в себя семь ЛЭП-110 кВ и три ЛЭП-220 кВ.

ОРУ 220 кВ выполнено по схеме – 13Н-Две рабочие и обходная системы шин, ОРУ 110 кВ выполнено по схеме – 13Н-Две рабочие и обходная системы шин. Связь между двумя ОРУ осуществляется с помощью двух АТ связи марки АТДЦТН-125000/220/110.

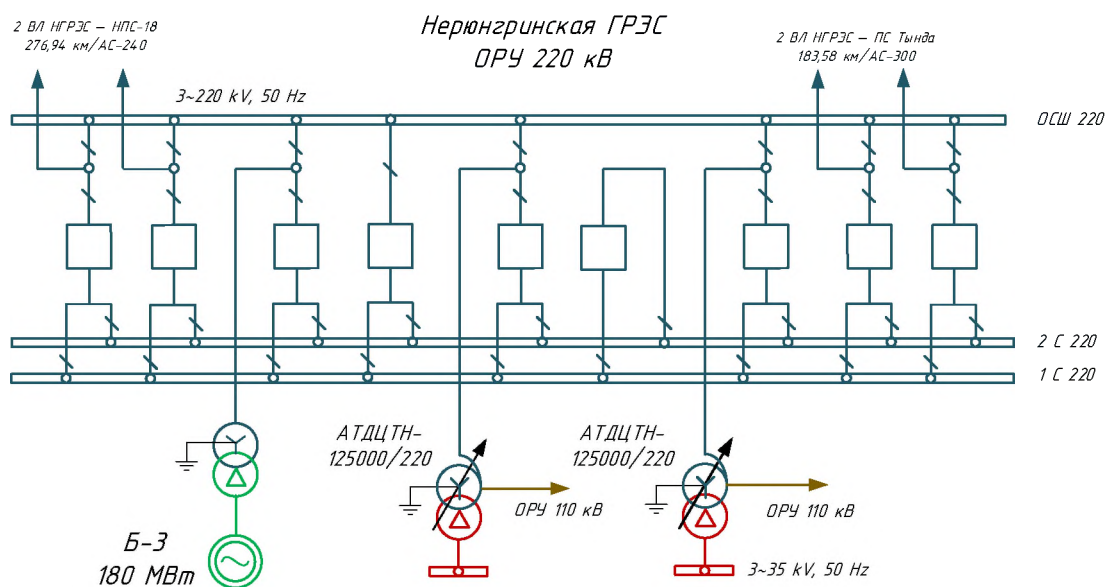


Рисунок 2 – Схема ОРУ 220 кВ Нерюнгринской ГРЭС

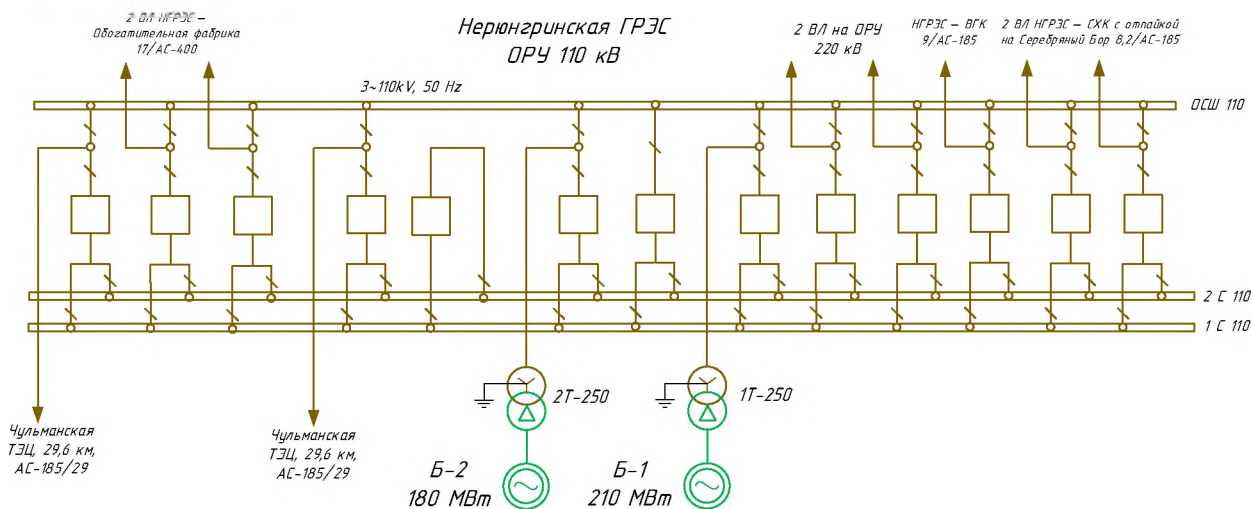


Рисунок 3 – Схема ОРУ 110 кВ Нерюнгринской ГРЭС

Нерюнгринская ГРЭС имеет резервы роста мощности при дальнейшем развитии региона и увеличении потребности в энергообеспечении за счет дополнительного строительства энергоблоков. Имеющаяся база позволяет в

кратчайшие сроки построить и ввести в эксплуатацию от двух до четырех энергоблоков аналогичной мощности.

Зейская ГЭС расположена на реке Зее в Амурской области, в 660 км от областного центра – г. Благовещенска. Ее мощность – 1330 МВт, среднегодовая выработка электроэнергии – 4,91 млрд.кВт.ч. В дальневосточной энергосистеме Зейская ГЭС играет особую роль, обеспечивая ее надежное функционирование. Гидроэлектростанция осуществляет регулирование частоты энергосистемы, регулирует суточные и недельные неравномерности нагрузки – ее гидроагрегаты легко увеличивают и уменьшают мощность, в соответствии с колебаниями нагрузки в энергосистеме. Кроме того, Зейская ГЭС служит аварийным резервом – ее гидроагрегаты в течение нескольких минут способны набрать полную мощность, не допуская отключения потребителей при аварийных ситуациях в энергосистеме [51].

Зейская ГЭС связана с Дальневосточной энергосистемой двумя линиями 500 кВ через ПС Амурская. По четырем линиям 220 кВ связь с энергосистемой Дальнего Востока осуществляется через ПС Призейская, ПС Светлая, ПС Магдагачи.

На Зейской ГЭС установлено шесть гидрогенераторов типа СВ-1130/220-44ХЛ суммарной мощностью 1330 МВт (СВ – синхронный вертикальный, 1130 – наружный диаметр сердечника статора, см; 220 – длина сердечника статора, см; количество полюсов – 44; ХЛ4 – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ). Четыре гидрогенератора №1, №2, №4 и №5 имеют установленную мощность 225 МВт, а два №3 и №6 – по 215 МВт [51].

Первый гидроагрегат пущен в работу в 1975 году, в 1980 году запущен шестой гидроагрегат и станция вышла на полную мощность.

До 2025 года планируется произвести замену всех 6 гидроагрегатов.

Главная электрическая схема ГЭС построена следующим образом: два гидрогенератора (№1 и №2) соединены в блоки с повышающими трансформаторами типа ТЦ-250000/220 и ТНЕРЕ-265000/242 и выдают мощность на напряжении 220 кВ, и четыре гидрогенератора (г№3 - г№6) соединены в блоки

с повышающими трансформаторами типа ТЦ-250000/500 и ТНЕРЕ-265000/525 для выдачи мощности на напряжении 500 кВ. Последние попарно объединены в укрупненные блоки (3ГТ - 4ГТ и 5ГТ - 6ГТ). В 2008 году была произведена замена повышающих трансформаторов фирмы АВВ для 1 и 6 генераторов.

На ГЭС смонтировано два открытых распределительных устройства ОРУ-500 и ОРУ-220 кВ. На ОРУ-500 кВ применена схема 17 – Полупортальная с тремя выключателями на два присоединения. ОРУ-220 кВ выполнено по схеме 12 – Одиночная секционированная система шин с обходной с секционной связью через два обходных выключателя. Связь двух распределительных устройств осуществляется через группу автотрансформаторов типа АОДЦТН-167000/500/220-75-У1, имеющих резервную фазу [51].

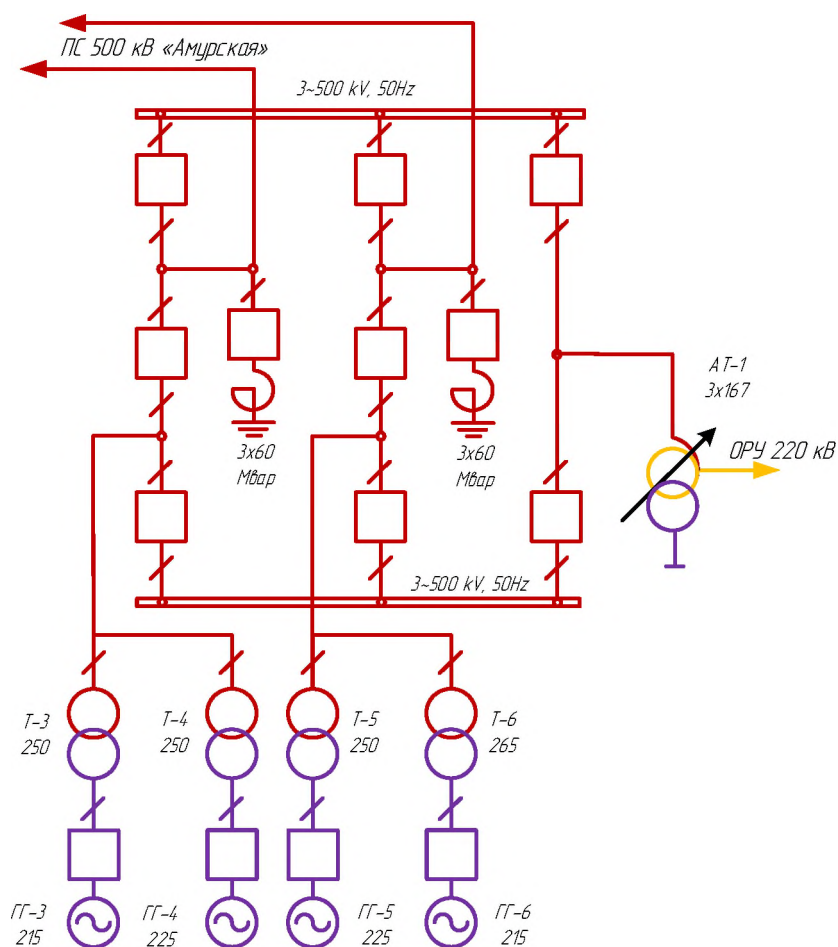


Рисунок 4 – Схема ОРУ 500 кВ Зейской ГЭС

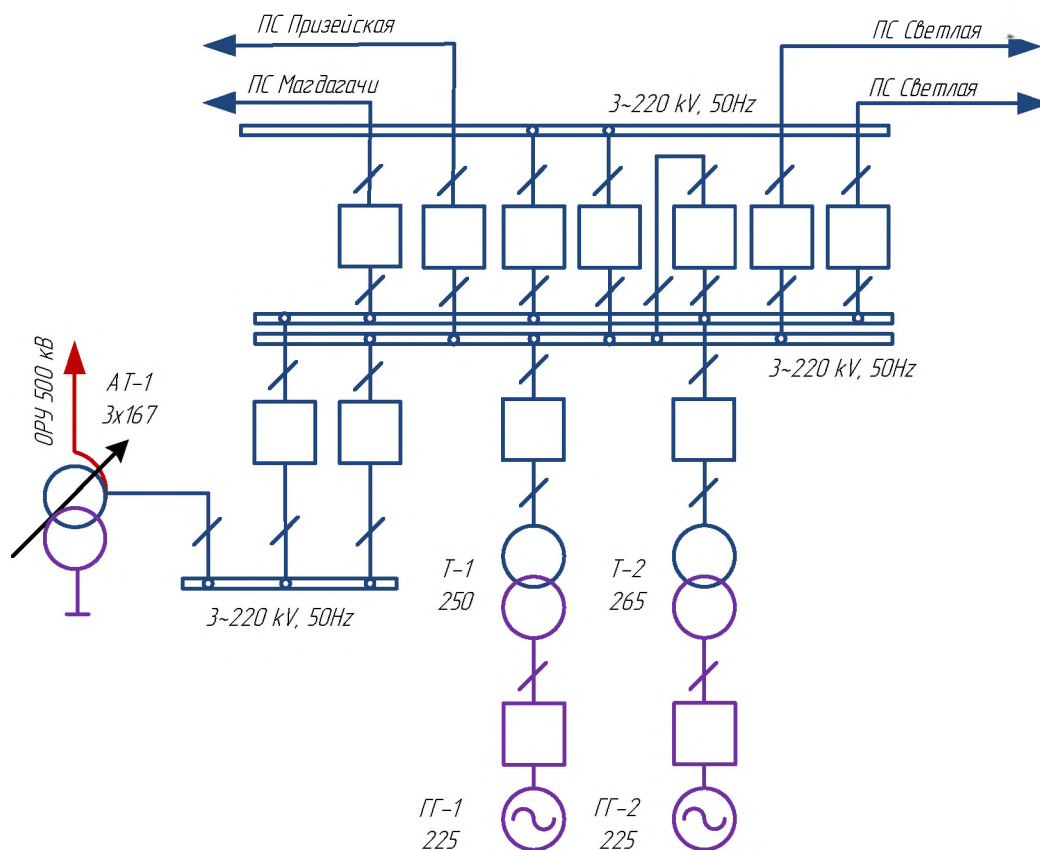


Рисунок 5 – Схема ОРУ 220 кВ Зейской ГЭС

На ОРУ 500 кВ установлено следующее оборудование:

- выключатели ВВБ-500 (выключатель воздушный баковый, номинальное напряжение – 500 кВ);
- разъединители РНДЗ-500/3200 (разъединитель наружной установки, двухколонковый заземляющими ножами, номинальное напряжение – 500 кВ, номинальный ток – 3200 А);
- трансформаторы тока ТРН-500У1 (трансформатор тока с рывовидной обмоткой, для наружной установки, номинальное напряжение – 500 кВ) и ТФНКД-500 (трансформатор тока в фарфоровой крышке с конденсаторной изоляцией, наружной установки, Д – имеет вторичные обмотки, предназначенные для релейной защиты, номинальное напряжение – 500 кВ);
- трансформаторы напряжения СРВ-550 (емкостной трансформатор напряжения, 550 - класс напряжения первичной обмотки, кВ) и НДЕ-500 (Н –

трансформатор напряжения, ДЕ - делитель емкостный, 500 - класс напряжения первичной обмотки, кВ);

- ограничители перенапряжения ОПН-500 (номинальное напряжение – 500 кВ);

- три рабочие и одна резервная фазы шунтирующий реактора типа РОДЦ-6000/500 (реактор однофазный с системой охлаждения типа ДЦ - масляное охлаждение с дутьем и ненаправленной циркуляцией масла, номинальная мощность – 6000 кВА, номинальное напряжение – 500 кВ).

ОРУ 220 кВ состоит из 12 ячеек. На ОРУ 220 кВ установлено следующее высоковольтное оборудование:

- выключатели ВВБ-220 (выключатель воздушный баковый, номинальное напряжение – 220 кВ);

- разъединители РНДЗ-220ХЛ (разъединитель наружной установки, двухколонковый заземляющими ножами, номинальное напряжение – 220 кВ);

- трансформаторы тока ТФНД-220 (трансформатор напряжения в фарфоровой крышке, наружной установки, с сердечником для дифференциальной защиты);

- трансформаторы напряжения СРВ-220 (емкостной трансформатор напряжения, 220 - класс напряжения первичной обмотки, кВ);

- ограничители перенапряжения ОПН-220 (номинальное напряжение – 220 кВ).

1.1.3 Структурный анализ линий электропередачи

Из графа электрической сети мы видим связи подстанции в энергосистеме между собой и с источниками питания, на выбранном участке сети. Далее произведем подробный структурный анализ линий электропередачи. В таблице 1 приведены основные характеристики линий 110 – 220 кВ на выбранном участке сети.

Таблица 1 – Анализ линий электропередачи

№	Участок	Длина, км	Марка провода	Тип
1	2	3	4	5
220 кВ				
1.	Сковородино – Тында №1	3,3	АС-300	КВЛ
2.		153,5	3х АС-300	КВЛ
3.		0,1	ПвПу2г 127/220	КВЛ
4.	Сковородино – Тында №2	155,2	АС-300	КВЛ
5.		0,1	ПвПу2г 127/220	КВЛ
6.	Сковородино – БАМ/т	25,9	АС-300	ВЛ
7.	Бам/т – Большая Омутная/т	106,9	АС-300	ВЛ
8.	Сковородино – Уруша/т	75,5	АС-300	ВЛ
9.	Уруша/т – Ерофей Павлович/т	66,9	АС-300	ВЛ
10.	Большая Омутная/т – Ерофей Павлович/т	23,9	АС-300	ВЛ
11.	Ерофей Павлович/т – Чичатка	29,7	АС-300	ВЛ
12.	Ерофей Павлович/т – Аячи/т	26,5	АС-300	ВЛ
13.	Аячи/т – Амазар	4,3	АС-300	ВЛ
14.	Тында – Хорогочи	74,45	АС-300	КВЛ
15.	Хорогочи – Лопча	87,11	АС-300	ВЛ
16.	Лопча – Юктали	146,07	АС-300	ВЛ
17.	Юктали – Хани	133,40	АС-300	ВЛ
18.	Нерюнгринская ГРЭС – Тында I цепь	184	АС-300	КВЛ
19.		0,130	ПвПу2г 1х500гж/95- 127/220кВ	КВЛ
20.	Нерюнгринская ГРЭС – Тында II цепь	184	АС-300	КВЛ
21.		0,09	ПвПу2г 1х500гж/95- 127/220кВ	КВЛ
22.	ЗГЭС – Призейская	183,81	АС-300	ВЛ
23.	Призейская – Тутаул	98,715	АС-300	ВЛ
24.	Тутаул – Дипкун	54,284	АС-300	ВЛ
25.	Дипкун – Тында	147,556	АС-300	КВЛ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
26.	Сковородино – Сковородино/т	5,2	АС-300	
27.	Гонжа/т – Сковородино	114,887	АС-300	ВЛ
28.	Сковородино – Ульручы/т	29,6	АС-300	ВЛ
29.	Магдагачи – Гонжа/т	35,97	АС-300	ВЛ
30.	Магдагачи – Ульручы/т	124,15	АС-240	ВЛ
31.	Магдагачи – Зейская ГЭС	133,5	АС-400	ВЛ
32.	Магдагачи – Сулус/т	33,6	АС-240	ВЛ
33.	Ключевая – Сулус/т	20,61	АС-240	ВЛ
34.	Светлая – Ключевая	110,2	АС-300	ВЛ
35.	Светлая – Зейская ГЭС I цепь	10,4	АС-300	ВЛ
36.	Светлая – Зейская ГЭС II цепь	10,1	АС-300	ВЛ
110 кВ				
37.	Сковородино – БАМ	23,6	АС-150	ВЛ
38.	Сковородино – Березитовый	103,0	АС-120	ВЛ
39.	Сковородино – НПС-21	2x24,2	АС-120	ВЛ
35 кВ				
40.	Сковородино – Невер	2x13,8	АС-150	ВЛ
41.	Сковородино – Джалинда	64,5	АС-95	ВЛ

Из анализа линий мы видим, что тяговые ПС расположены на достаточно близком расстоянии от ПС Сковородино. Из данной таблицы также можно сделать вывод, что линии 220 кВ выполнены в основном проводом АС-300, КВЛ присутствует только на линиях, соединяющих КРУЭ ПС Тында с другими ПС.

1.1.4 Подробный анализ ПС Сковородино

ПС Сковородино трансформаторной мощностью 126 МВА расположена в городе Сковородино Амурской области, введена в эксплуатацию в 1977 году. Являясь узловой подстанцией, она обеспечивает электроснабжение потребителей Сковородинского района Амурской области, в том числе Березитового рудника, тяговых подстанций РЖД, НПС-21. ПС Сковородино

осуществляет прием, распределение и передачу электрической энергии на напряжениях 220, 110, 35, 10 кВ.

РУ 220 кВ выполнено по схеме 220-12 Одна рабочая секционированная выключателем и обходная сиситемы шин, РУ 110 кВ выполнено по схеме 110-12 Одна рабочая секционированная выключателем и обходная сиситемы шин, РУ 35 кВ выполнено по схеме 35-9 Одна рабочая секционированная выключателем система шин. РУ 10 кВ выполнено по схеме 10-1 – Одна секционированная выключателем сиситема шин.

От РУ 220 кВ отходят линии:

- КВЛ 220 кВ Сквородино – Тында I и II цепь;
- ВЛ 220 кВ Сквородино – Сквородино/т I и II цепь;
- ВЛ 220 кВ Сквородино – БАМ/т;
- ВЛ 220 кВ Сквородино – Уруша/т;
- ВЛ 220 кВ Сквородино – Гонжа/т с отпайкой на ПС Талдан;
- ВЛ 220 кВ Сквородино – Ульручы/т с отпайкой на ПС Талдан;

От РУ 110 кВ отходят линии:

- ВЛ 110 кВ Сквородино – Березитовый;
- ВЛ 110 кВ Сквородино – НПС-21;
- ВЛ 110 кВ Сквородино – БАМ;

От РУ 35 кВ отходят линии:

- ВЛ 35 кВ Сквородино – Джалинда;
- ВЛ 35 кВ Сквородино – Невер;

На ПС Сквородино установлены автотрансформаторы марки АДЦТН-63000/220 (автотрансформатор трехфазный трехобмоточный, охлаждение – принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла, оборудован устройством РПН). Год ввода в эксплуатацию АТ-1 – 1977 г., АТ-2 – 1981 г. Нормативный срок службы – 25 лет.

Силовые трансформаторы 2хТДТН-25000/110/35/10. Трансформатор Т-3 установлен 1978 г., Т-4 в 1977 г. Нормативный срок службы – 25 лет.

Марка и параметры выключателей ОРУ 220 кВ ПС Сковородино приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики выключателей 220 кВ

Тип выключателя	ЗАР1ДТ-245 (Элегазовые баковые)	GL-314 (Элегазовые колонковые)
Диспетчерское наименование	ОВ-220, В-220 АТ-1, В-220 АТ-2	СВ-22, выключатели на линиях, УШР
Год ввода	2012	2010
Номинальное напряжение, кВ	220	220
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	252	252
Полное время отключения, с	0,037	0,040
Номинальный ток отключения, кА	31,5	40
Номинальный ток, А	2000	2000

Марка и параметры выключателей ОРУ 110 кВ ПС Сковородино приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики выключателей 110 кВ

Тип выключателя	ВЭБ-110 П-40/2500 УХЛ1	ЛТВ-145D1 (Элегазовые колонковые)	МКП-110Б-1000/630- 20У1 (Масляный камерный подстанционный)
Диспетчерское наименование	В-110 ВЛ НПС №1	В-110 ВЛ НПС №2, В-110 ВЛ Березитовый	В-110 АТ-2 В-110 АТ-1 В-110 ВЛ Бам, ОВ-110, В-110, Т-3, В-110 Т-4, СВ- 110
Год ввода	2005	2008	1981
Номинальное напряжение, кВ	110	110	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	126	126	126
Полное время отключения, с	0,055	0,04	0,06
Номинальный ток отключения, кА	40	40	18,4
Номинальный ток, А	2500	3150	1000

На ОРУ 220 кВ установлены следующие типы разъединителей:

– РНДЗ.16–220/1000 У1 – разъединитель наружной установки, с двумя опорно-изоляционными колонками, с одним заземляющим ножом, номинальный ток – 1000 А.

– РНДЗ.16–220/2000 У1 – разъединитель наружной установки, с двумя опорно-изоляционными колонками, с одним заземляющим ножом, номинальный ток – 2000 А.

– РДЗ-2-220/1000 УХЛ1 – разъединитель двухколонковый с двумя заземляющими ножами, номинальный ток – 1000 А.

Разъединители марки РНДЗ.16–220/1000 У1, РНДЗ.16–220/2000 У1, РДЗ-2-220/1000 УХЛ1 были установлены в 1977 и 1987 гг.

– РНГ-1-220-II/1000-40 – разъединитель горизонтально-поворотного типа с нормальным уровнем изоляции, номинальный ток – 1000 А. Разъединители данной марки были установлены в 2016 году.

На ОРУ 110 кВ установлены разъединители следующих марок:

– РНДЗ.2 – 110/1000У1 – разъединитель наружной установки, с двумя опорно-изоляционными колонками, с одним заземляющим ножом, номинальный ток – 1000 А. Разъединители данной марки были установлены в 1977-1978 гг.

– РГП-1-110/1000УХЛ1 – разъединитель горизонтально-поворотного типа, номинальный ток – 1000 А. Разъединители данной марки были установлены в 2005 и 2009 году.

Далее рассмотрим измерительные трансформаторы установленные на ОРУ 220 кВ и ОРУ 110 кВ ПС Сковородино.

В таблицах 4, 5 и 6 представлены данные о ТТ и ТН установленных на ОРУ 220 и ОРУ 110 кВ ПС Сковородино.

Частично ТТ на ОРУ 220 кВ были заменены на новые в 2016 году. Изношенность оборудования влияет на эксплуатационные характеристики электрооборудования, а также является основной причиной аварий.

Таблица 4 – Данные ТТ ОРУ 220 кВ

Тип трансформатора тока	СА-245, маслонаполненный с фарфоровой изоляцией	AGU-245, маслонаполненный с фарфоровой изоляцией	ТФЗМ 220 Б-ЩУ-1, ТТ маслонаполненный, с фарфоровой крышкой, вторичная обмотка звеньевое типа.
Диспетчерское наименование	ТТ СВ-220	ТТ В-220 УШР	ТТ В-220 Сковородино/т 1 цепь, 2 цепь, ТТ В-220 ВЛ Бам/т, ТТ В-220 Гонжа/т, ТТ В-220 Тында №1, №2, ТТ В-220 Ульручы/т, ТТ В-220 Уруша/т
Год ввода	2016	2016	1989, 1989, 1987, 1989, 1987, 1985, 1987, 2005
Класс напряжения, кВ	220	220	220
Номинальный ток (первичный), А	600	600	600
Номинальный ток (вторичный), А	5	5	5
Класс	0,2	0,2	0,5
Номинальная мощность, ВА	40	30	50

Таблица 5 – Данные ТТ ОРУ 110 кВ

Тип трансформатора тока	ТФЗМ 110	ТФЗМ-110 2000 УХЛ-1	ІВМ-123
Диспетчерское наименование	ТТ В-110 Бам, ТТ ОМВ-110	ТТ В-110 Березитовый	ТТ В-110 НПС-1, ТТ В-110 НПС-2
Год ввода	2005	2013	2008
Класс напряжения, кВ	110	110	110
Номинальный ток (первичный), А	200	600	400
Номинальный ток (вторичный), А	5	5	5
Класс	0,5	0,5	0,5
Номинальная мощность, ВА	30	30	30

Таблица 6 – Данные ТН ОРУ 220 и 110 кВ

Тип трансформатора напряжения	VPU-245	НДКМ-110	НАМИ-110 УХЛ 1
Диспетчерское наименование	ТН-220 1С, 2С, ТН-220 ОСШ, ф.В,	ТН-110 1СШ	ТН-110 2СШ
Год ввода	2014 г.	2013 г.	2004 г.
Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	220	110	110
Наибольшее рабочее напряжение первичной обмотки, кВ	220	110	110
Номинальное напряжение вторичной (вторичных) обмоток, В	$100/\sqrt{3}$	0,1	0,1
Класс	0,2	0,2	0,2
Номинальная мощность, ВА	300;600;120	120;200;400	400;600;1200

Гибкая ошиновка на ОРУ 220 кВ выполнены проводом АС-300/39 и АС-300/48, с величиной допустимой токовой перегрузки равной 801 и 798 А, номинальным током 701 и 690 А соответственно.

Гибкая ошиновка на ОРУ 110 кВ выполнены проводом АС-240/39, с величиной допустимой токовой перегрузки равной 686 А, номинальным током 610 А.

В 2016 году на ПС Сквородино был установлен УШР марки РТУ-100000/220 У1 (реактор трехфазный управляемый, номинальной мощностью 100000 кВА, номинальным напряжением 220 кВ).

Таблица 7 – Технические характеристики РТУ-100000/220 У1

Параметр	Величина параметра
Номинальное напряжение, кВ	242
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	252
Номинальная мощность, МВар	100
Индуктивное сопротивление, ом	572,6
Потери активной мощности, кВт	600
Номинальное напряжение нулевых выводов, кВ	35
Допустимое напряжение изоляции нулевых выводов, кВ	35/10
Диапазон регулирования мощности*, % от Qном	5...130
Время изменения нагрузки между границами регулировочного диапазона*, с	1
Скорость изменения нагрузки*, Мвар/с	135,7

Из произведенного анализа ПС Сковородино мы видим, что основное оборудование ПС, такое как автотрансформаторы, силовые трансформаторы, масляные выключатели 110 кВ, трансформаторы тока 110 кВ служат второй срок. Изношенность оборудования приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик, снижению надежности, увеличению потерь, повышает вероятность развития аварий.

Потери от низкого качества электрической энергии присутствуют по всех элементах электрической сети. При замене старого оборудования, необходимо не забывать, о влиянии тяги на качество электроэнергии и принимать к установке инновационные устройства, например такие как – ненасыщающиеся трансформаторы тока.

На ПС присутствуют средства регулирования напряжения, такие как РПН, ПБВ установленные на силовых трансформаторах и автотрансформаторах, а также УШР 220 кВ, позволяющий плавно регулировать напряжение на шинах 220 кВ. Поскольку тяга переменного тока является непостоянной нагрузкой, что приводит к постоянным изменениям напряжения, устройство УШР позволяет поддерживать заданный уровень напряжения на шинах 220 кВ ПС Сковородино.

1.2. Анализ режимной ситуации

1.2.1 Выбор участка сети для расчета режима

Эквивалентом сети для расчета режима принимается участок Амурской энергосистемы, включающий в себя подстанции: ПС Тында, ПС Сковородино, ПС Ульручи/т, ПС Гонжа/т, ПС Талдан/т, ПС Магдагачи, ПС Дипкун, ПС Тутаул, ПС Призейская, ПС Светлая, ПС Ключевая, ПС Сулус/т, ПС Сковородино/т, ПС БАМ/т, ПС Большая Омутная/т, ПС Уруша/т, ПС Ерофей Павлович/т, ПС Аячи/т, ПС Березитовый, ПС НПС-21, ПС БАМ, Зейскую ГЭС и Нерюнгринскую ГРЭС.

Балансирующим узлом является Зейская ГЭС.

Эквивалент сети для расчета режима представлен на рисунке 6.

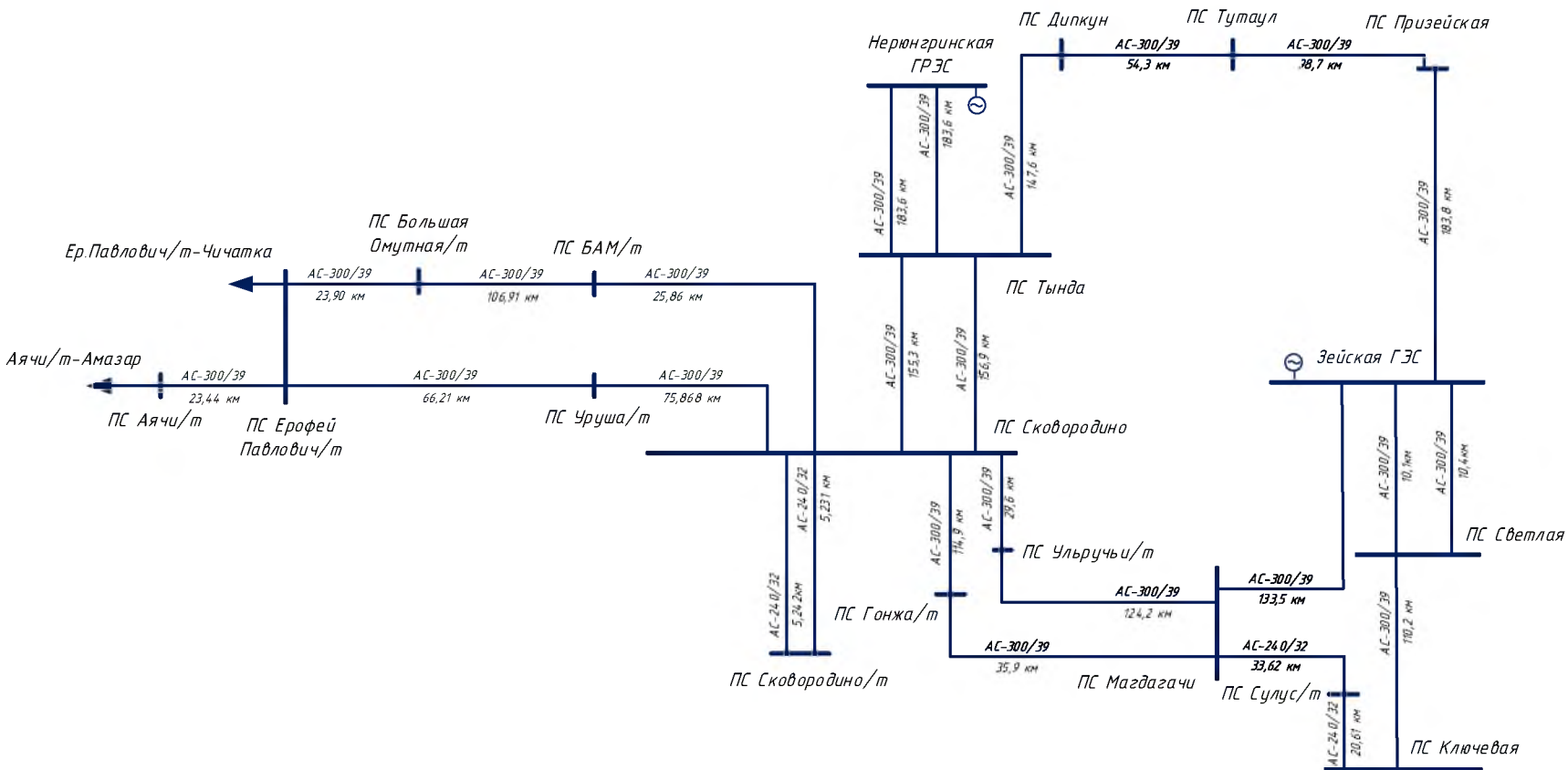


Рисунок 6 – Эквивалент сети для расчета режима

1.2.2 Выбор и характеристика ПВК для расчета режима

Программный комплекс RastrWin3 предназначен для решения задач по расчету, анализу и оптимизации режимов электрических сетей и систем. В России основными пользователями RastrWin3 являются Системный Оператор Единой Энергетической Системы (СО ЕЭС) и его филиалы, Федеральная Сетевая Компания (ФСК), МРСК, проектные и научно-исследовательские институты (Энергосетьпроект, ВНИИЭ, НИИПТ и т.д.) [50].

С помощью данной программы можно производить [50]:

- расчёт установившихся режимов электрических сетей произвольного размера и сложности, любого напряжения. Полный расчет всех электрических параметров режима (токи, напряжения, потоки и потери активной и реактивной мощности во всех узлах и ветвях электрической сети) [50];
 - проверка исходной информации на логическую и физическую непротиворечивость;
 - эквивалентирование электрических сетей;
 - оптимизация электрических сетей по уровням напряжения, потерям мощности и распределению реактивной мощности;
 - расчет положений регуляторов трансформатора под нагрузкой и положений вольтодобавочных трансформаторов;
 - учет изменения сопротивления автотрансформатора при изменении положений РПН;
 - расчет предельных по передаваемой мощности режимов энергосистемы, определение опасных сечений;
 - структурный анализ потерь мощности – по их характеру, типам оборудования, районам и уровням напряжения;
 - моделирование отключения ЛЭП, в том числе одностороннего, и определение напряжения на открытом конце;
 - моделирование линейных и шинных реакторов, в том числе с возможностью их отключения [50];

- анализ допустимой токовой загрузки ЛЭП и трансформаторов, в том числе с учетом зависимости допустимого тока от температуры [50];
- расчет сетевых коэффициентов, позволяющих оценить влияние изменения входных параметров на результаты расчета, и наоборот, проанализировать чувствительность результатов расчета к изменению входных параметров [50].

1.2.3. Подготовка исходных данных и расчет режима

Для расчета режима в ПВК RastrWin 3 необходимо рассчитать параметры линий, трансформаторов, шунтирующих реакторов.

Активное сопротивление линии:

$$R_{ВЛ} = r_0 \cdot l_{ВЛ}, \quad (1)$$

где r_0 – погонное индуктивное сопротивление, Ом/км

Индуктивное сопротивление линии:

$$X_{ВЛ} = x_0 \cdot l_{ВЛ}, \quad (2)$$

где x_0 – погонное индуктивное сопротивление, Ом/км

Реактивная мощность, генерируемая ЛЭП моделируется реактивной проводимостью ВЛ:

$$B = b_0 \cdot l_{ВЛ}, \quad (3)$$

где b_0 – погонная емкостная проводимость, мкСм/км

Потери на коронный разряд моделируются активной проводимостью ВЛ:

$$G = g_0 \cdot l_{ВЛ}, \quad (4)$$

где g_0 – погонная емкостная проводимость, мкСм/км

Коэффициенты трансформации силовых трансформаторов и АТ находим по формулам:

$$K_{TH} = \frac{U_{HH}}{U_{BH}} \quad (5)$$

$$K_{TC} = \frac{U_{CH}}{U_{BH}} \quad (6)$$

$$K_{TB} = \frac{U_{BH}}{U_{BH}} = 1 \quad (7)$$

где K_{TH}, K_{TC}, K_{TB} – соответственно коэффициенты трансформации для низкой, средней и высокой сторон соответственно;

U_{HH}, U_{CH}, U_{BH} – соответственно напряжения на низкой, средней и высокой сторонах трехобмоточного трансформатора.

Реактивные проводимости трансформаторов вычисляются по формулам:

$$B_T = \frac{\Delta Q_{XX}}{U_{BH}^2} \cdot 10^3, \quad (8)$$

где ΔQ_{XX} – реактивные потери холостого хода, кВар.

$$G_T = \frac{\Delta P_{XX}}{U_{BH}^2} \cdot 10^3, \quad (9)$$

где ΔP_{XX} – активные потери холостого хода, кВт.

Генераторы задаются вырабатываемой активной мощностью, заданным модулем напряжения, пределами выработки и потребления реактивной мощности.

Балансирующий узел задается заданным модулем напряжения.

Узлы задаются номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ и мощностью нагрузки $P_{\text{н}}$ и $Q_{\text{н}}$. Если к узлу (шинам) подключено устройство компенсации реактивной мощности, в таком узле задается проводимость шунта $B_{\text{ш}}$. Если подключен реактор (индуктивность), проводимость со знаком плюс, если

емкость, т.е. батарея конденсаторов, тогда проводимость шунта $V_{ш}$ задается со знаком минус.

1.2.4. Расчет и анализ режима электрической сети

В таблицах 8 и 9 приведены основные параметры расчета режима.

Таблица 8 – Параметры узлов расчетной модели

Название	Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	Мощность нагрузки		Мощность генерации		Заданный модуль напряжения $V_{зд}$, кВ	Проводимость шунта $V_{ш}$, мкСм	Расчетный модуль напряжения V , кВ
		$P_{н}$, МВт	$Q_{н}$, МВар	$P_{г}$, МВт	$Q_{г}$, МВар			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сковородино 1С 220 кВ	220						698	233,92
Сковородино 2С 220 кВ	220							233,94
о.т. АТ-1	220							230,4
о.т. АТ-2	220							229,8
Сковородино 1С 110 кВ	110	6,3	2,2					112,69
Сковородино 2С 110 кВ	110	11,1	1,9					112,6
НН АТ-1	35							36,65
НН АТ-2 Р=20 МВар	35							36,56
о.т. СТ-3	110							112,31
о.т. СТ-4	110							110,74
СН СТ-3	35							36,84
СН СТ-4	35	9,9	3,1					36,33
НН СТ-3	10	2,9	0,6					10,19
НН СТ-4	10							11,02
ПС Березитовый	110	7	2					110,24
ПС БАМ	110	1,8	0,8					112,45
ПС НПС-21	110	11	3,5					112,18
Сковородино/т	220	11	11,9					233,87
БАМ/т	220	16,6	24					233,58
Уруша/т	220	22,5	24,6					231,31
Большая Омутная/т	220	11,8	14,4					229,39
Ерофей Павлович/т СШ-1 220 кВ	220	2,5	3					228,83

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ерофей Павлович/т СШ-2 220 кВ	220	2,5	3					231,44
Аячи/т	220	9,9	12					228,21
Гонжа/т СШ-1 220 кВ	220	4,1	2,4					237,76
Гонжа/т СШ-2 220 кВ	220	4,1	2,4					237,75
Ульручы/т СШ-1 220 кВ	220	5,6	4,3					234,79
Ульручы/т СШ-2 220 кВ	220	5,6	4,3					234,78
Сулус/т СШ-1 220 кВ	220	4,8	4,6					239,47
Сулус/т СШ-2 220 кВ	220	4,8	4,6					239,46
Нерюнгринская ГРЭС	220			158	-34,1	245,4		245,4
Зейская ГЭС	220			241,9	-35,6	242		242
ПС Дипкун ВН 220 кВ	220							239,4
Дипкун о.т.	220							223,01
ПС Дипкун СН	35	0,6	18,8				5690	37,24
ПС Дипкун НН 10 кВ	10	1	0,3					10,66
ПС Тутаул ВН 220 кВ	220							239,88
ПС Тутаул о.т.	220							239,87
ПС Тутаул СН 35 кВ Р=20 МВар	35	0,2						37,21
ПС Тутаул НН 10 кВ	10	0,3						10,79
ПС Ключевая 1С 220 кВ	220	38,8	-11,8					240,26
ПС Ключевая 2С 220 кВ	220	38,8	-11,8					240,25
Тында 1С-220 кВ	220							241,93
Тында 2С-220 кВ	220	47,6	-38,9				62	241,95
о.т. АТ-1	220							240,05
о.т. АТ-2	220							240,83
Тында 1С-110 кВ	110	14,3	4					122,44
Тында 2С-110 кВ	110	14,2	4					122,49

1	2	3	4	5	6	7	8	9
НН АТ-1 Р=20 МВар	35							
НН АТ-2 Р=20 МВар	35							
Светлая 1С-220 кВ	220	17,6	1,3					241,85
Светлая 2С-220 кВ	220	17,6	1,3					241,85
Призейская ВН 220 кВ	220							238,82
Призейская о.т.	220							219,16
Призейская	35	2,1	15,6				12730	35,73
Призейская НН 10 кВ	10	1,3						10,86
Магдагачи 1С- 220 кВ	220	9,2	8,6					238,69
Магдагачи 2С- 220 кВ	220	9,2	8,6					238,69

Таблица 9 – Параметры ветвей расчетной модели

Название	Активное сопротив- ление R, Ом	Реактивное сопротив- ление X, Ом	Реактив- ная проводим- ность B, мкСм	Активная проводим- ность G, мкСм	Кoeffи- циент транс- формации Кт/г
1	2	3	4	5	6
Сковородино 1С 220 кВ - о.т. АТ-1	1,73	104,12	2,4	0,6	1
Сковородино 2С 220 кВ - о.т. АТ-2	1,74	102,86	2,7	0,6	1
о.т. АТ-1 - Сковородино 1С 110 кВ	3,28	3,36			0,49
о.т. АТ-1 - НН АТ-1	8,14	225,03			0,159
о.т. АТ-2 - Сковородино 2С 110 кВ	3,26	-10,5			0,49
о.т. АТ-2 - НН АТ-2	8,12	188,51			0,159
Сковородино 1С 110 кВ - о.т. СТ-3	1,89	57,34	9,4	0	1
Сковородино 2С 110 кВ - о.т. СТ-4	1,79	56,76	11,3	0	1
о.т. СТ-3 - СН СТ-3	1,1				0,31
о.т. СТ-3 - НН СТ-3	1,25	35,49			0,091

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6
о.т. СТ-4 - СН СТ-4	1,01				0,31
о.т. СТ-4 - НН СТ-4	1,17	36,29			0,1
Сковородино 1С 110 кВ - ПС Березитовый	25,65	43,98	-2,7		
Сковородино 1С 110 кВ - ПС НПС-21	6,03	10,33	-0,6		
Сковородино 2С 110 кВ - ПС БАМ	4,67	9,91	-0,6		
Сковородино 2С 110 кВ - ПС НПС-21	6,03	10,33	-0,6		
Сковородино 1С 220 кВ - Сковородино/т	0,51	2,27	-14	0,8	
Сковородино 2С 220 кВ - Сковородино/т	0,51	2,27	-14	0,8	
Сковородино 1С 220 кВ - БАМ/т	0,44	1,92	-11,9	0,7	
Сковородино 2С 220 кВ - Уруша/т	7,25	32,41	-199,8	11,7	
Уруша/т - Ерофей Павлович/т СШ-2 220	6,42	28,7	-177	10,4	
БАМ/т - Большая Омутная/т	10,26	45,86	-282,8	16,6	
Большая Омутная/т - Ерофей Павлович/т СШ-1 220 кВ	2,29	10,25	-63,2	3,7	
Ерофей Павлович/т СШ-1 220 кВ - Аячи/т	2,54	11,35	-70	4,1	
Сковородино 1С 220 кВ - Гонжа/т СШ-2 220 кВ	11,09	49,57	-305,6	17,9	
Гонжа/т СШ-1 220 кВ - Магдагачи 2С-220	3,45	15,42	-95,1	5,6	
Сковородино 2С 220 кВ - Ульручьи/т СШ-2 220 кВ	3,49	12,3	-77,2	4,9	
Ульручьи/т СШ-1 220 кВ - Магдагачи 1С-220 кВ	15,16	52,19	-328,3	21	
Магдагачи 1С-220 кВ - Сулус/т СШ-2 220	4,01	13,91	-87,5	5,6	
Сулус/т СШ-1 220 кВ - ПС Ключевая 2С 220	2,44	8,95	-53,6	3,4	
ПС Ключевая 1С 220 кВ - Светлая 2С-220	10,81	48,18	-297	17,4	
Светлая 1С-220 кВ - Зейская ГЭС	1,23	5,21	-32,3	27	
Светлая 2С-220 кВ - Зейская ГЭС	1,25	5,33	-33	27	

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6
Магдагачи 2С-220 кВ - Зейская ГЭС	10,01	56,03	-360,2	14	
Зейская ГЭС - Призейская ВН 220	17,64	78,85	-486,2	28,5	
Призейская ВН 220 кВ - Призейская о.т.	3,4	134,84	8,3	1,7	1
Призейская о.т. - Призейская СН 35 кВ	2,12				0,163
Призейская о.т. - Призейская НН 10 кВ	1,79	66,18			0,05
Призейская ВН 220 кВ - ПС Тутаул ВН 220 кВ	9,4	42,32	-261,3	15,2	
ПС Тутаул ВН 220 кВ - ПС Тутаул о.т.	3,42	134,69	1,9	8,6	1
ПС Тутаул о.т. - ПС Тутаул СН 35 кВ	2,13				0,155
ПС Тутаул о.т. - ПС Тутаул НН 10 кВ	1,79	67,4			0,045
ПС Тутаул ВН 220 кВ - ПС Дипкун ВН 220	5,21	23,29	-143,6	8,4	
ПС Дипкун ВН 220 кВ - Дипкун о.т.	7,39	134,95	1,7	1,9	1
Дипкун о.т. - ПС Дипкун СН 35 кВ	8,8				0,167
Дипкун о.т. - ПС Дипкун НН 10 кВ	0,69	68,19			0,048
ПС Дипкун ВН 220 кВ - Тында 2С-220 кВ	14,16	63,3	-390,3	22,9	
Тында 1С-220 кВ - о.т. АТ-1	1,85	102,9	1,5	0,7	1
о.т. АТ-1 - Тында 2С- 110 кВ	0,82	-10,62			0,51
о.т. АТ-1 - НН АТ-1	6,42	185,44			0,167
Тында 2С-220 кВ - о.т. АТ-2	1,7	58,36	2,1	0,7	1
о.т. АТ-2 - Тында 1С- 110 кВ	3,41	32,33			0,51
о.т. АТ-2 - НН АТ-2	8,16	229,65			0,167
Сковородино 1С 220 кВ - Тында 1С-220 кВ	5,7	49,15	-407,8	24,3	
Сковородино 2С 220 кВ - Тында 2С-220	14,9	66,59	-410,6	24,1	
Тында 1С-220 кВ - Нерюнгринская ГРЭС	17,32	77,42	-477,3	28	
Тында 2С-220 кВ - Нерюнгринская ГРЭС	17,66	78,94	-486,7	28,5	

Таблица 10 – Отклонения напряжения в узлах

Название	Номинальное напряжение, U_ном, кВ	Фактическое напряжение, V, кВ	Отклонение напряжения, dV, %
Сковородино 1С 220 кВ	220	233,92	6,33
Сковородино 2С 220 кВ	220	233,94	6,33
Сковородино/т	220	233,86	6,3
БАМ/т	220	233,58	6,17
Уруша/т	220	231,3	5,14
Ерофей Павлович/т СШ-2 220 кВ	220	231,44	5,2
Гонжа/т СШ-1 220 кВ	220	237,75	8,07
Гонжа/т СШ-2 220 кВ	220	237,75	8,07
Ульручы/т СШ-1 220 кВ	220	234,79	6,72
Ульручы/т СШ-2 220 кВ	220	234,78	6,72
Сулус/т СШ-1 220 кВ	220	239,47	8,85
Сулус/т СШ-2 220 кВ	220	239,46	8,84
Нерюнгринская ГРЭС	220	245,4	11,55
Зейская ГЭС	220	242	10
ПС Дипкун ВН 220 кВ	220	239,43	8,83
ПС Тутаул ВН 220 кВ	220	239,91	9,05
ПС Ключевая 1С 220 кВ	220	240,26	9,21
ПС Ключевая 2С 220 кВ	220	240,25	9,21
Тында 1С-220 кВ	220	241,92	9,96
Тында 2С-220 кВ	220	241,94	9,97
Тында 1С-110 кВ	110	120,03	9,12
Тында 2С-110 кВ	110	120,03	9,16
Светлая 1С-220 кВ	220	241,85	9,93
Светлая 2С-220 кВ	220	241,85	9,93
Призейская ВН 220 кВ	220	238,84	8,56
Магдагачи 1С-220 кВ	220	238,69	8,49
Магдагачи 2С-220 кВ	220	238,68	8,49

Из расчёта режима можно видно, что напряжения на подстанциях выбранного участка электрической сети находятся в допустимых пределах, не превышают значение наибольшего рабочего напряжения для электрооборудования, равного для номинального напряжения 220 кВ значения 252 кВ. Отклонение напряжения на СН и НН не превышает 10 %, нормированных ГОСТ 32144-2013.

Малая загруженность линий электропередачи вызывает генерирование зарядной мощности, для недопущения увеличений напряжения в узлах сети на

ПС Дипкун, ПС Призейская включены ШР, на ПС Тында – УШР. Напряжение на СН и НН осуществляется с помощью устройств ПБВ и РПН.

Смоделируем послеаварийный режим. Отключим две линии: КВЛ 220 кВ ПС Тында – ПС Сковородино и ВЛ 220 кВ ПС Гонжа/т – ПС Магдагачи.

В таблице 11 приведен расчет послеаварийного режима.

Таблица 11 – Параметры узлов расчетной модели

Название	Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	Мощность нагрузки		Мощность генерации		Заданный модуль напряжения $V_{зд}$, кВ	Проводимость шунта $V_{ш}$, мкСм	Расчетный модуль напряжения V , кВ
		$P_{н}$, МВт	$Q_{н}$, МВар	$P_{г}$, МВт	$Q_{г}$, МВар			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сковородино 1С 220 кВ	220							231,56
Сковородино 2С 220 кВ	220							231,55
о.т. АТ-1	220							227,98
о.т. АТ-2	220							227,37
Сковородино 1С 110 кВ	110	6,3	2,2					111,5
Сковородино 2С 110 кВ	110	11,1	1,9					111,4
НН АТ-1	35							36,27
НН АТ-2	35							36,17
о.т. СТ-3	110							111,12
о.т. СТ-4	110							109,52
СН СТ-3	35							36,24
СН СТ-4	35	9,9	3,1					35,69
НН СТ-3	10	2,9	0,6					10,08
НН СТ-4	10							10,9
ПС Березитовый	110	7	2					109,03
ПС БАМ	110	1,8	0,8					111,26
ПС НПС-21	110	11	3,5					110,99
Сковородино/т	220	11	11,9					231,49
БАМ/т	220	16,6	24					231,26
Уруша/т	220	22,5	24,6					228,13
Большая Омутная/т	220	11,8	14,4					227,99

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ерофей Павлович/т СШ-1 220 кВ	220	2,5	3					227,64
Ерофей Павлович/т СШ-2 220 кВ	220	2,5	3					227,64
Аячи/т	220	9,9	12					227,01
Гонжа/т СШ-1 220 кВ	220	4,1	2,4					231,85
Гонжа/т СШ-2 220 кВ	220	4,1	2,4					231,85
Ульручы/т СШ-1 220 кВ	220	5,6	4,3					232,83
Ульручы/т СШ-2 220 кВ	220	5,6	4,3					232,82
Сулус/т СШ-1 220 кВ	220	4,8	4,6					239,73
Сулус/т СШ-2 220 кВ	220	4,8	4,6					239,72
Нерюнгринская ГРЭС	220			158	-33,9	245,4		245,4
Зейская ГЭС	220			241	-38	242		242
ПС Дипкун ВН 220 кВ	220							239,4
Дипкун о.т.	220							223,14
ПС Дипкун СН 35 кВ Р=3х6.6 МВар	35	0,6	18,6				5690	37,26
ПС Дипкун НН 10 кВ	10	1	0,3					10,66
ПС Тутаул ВН 220 кВ	220							239,88
ПС Тутаул о.т.	220							239,87
ПС Тутаул СН 35 кВ	35	0,2						37,21
ПС Тутаул НН 10 кВ	10	0,3						10,79
ПС Ключевая 1С 220 кВ	220	38,8	-11,8					240,48
ПС Ключевая 2С 220 кВ	220	38,8	-11,8					240,48
Тында 1С-220	220							241,89
Тында 2С-220	220	47,6	-38,6				62	241,92
о.т. АТ-1	220							240,01
о.т. АТ-2	220							240,79
Тында 1С-110	110	14,3	4					120,02
Тында 2С-110	110	14,2	4					120,07

1	2	3	4	5	6	7	8	9
НН АТ-1	35							
НН АТ-2	35							
Светлая 1С-220	220	17,6	1,3					241,86
Светлая 2С-220	220	17,6	1,3					241,87
Призейская ВН 220 кВ	220							238,82
Призейская о.т.	220							219,16
Призейская СН 35 кВ	35	2,1	15,6				12730	35,73
Призейская НН 10 кВ	10	1,3						10,86
Магдагачи 1С- 220 кВ	220	9,2	8,6					239,01
Магдагачи 2С- 220 кВ	220	9,2	8,6					239,01

Уровни напряжений в послеаварийном режиме находятся в допустимых пределах. Управляемые технические устройства, такие как УШР на ПС Тынды и ПС Сквородино позволяют поддерживать необходимые напряжение в узлах сети и в послеаварийных режимах.

Также из расчета режим видно, что тяговые ПС потребляют большое количество реактивной мощности.

Таблица 12 – Нагрузки тяговых ПС

ПС	Активная мощность, МВт	Реактивная мощность, МВар	Коэффициент реактивной мощности, $tg\varphi$
ПС Сквородино/т	11,0	11,9	1,1
ПС Ульручи/т	11,2	8,6	0,8
ПС Гонжа/т	8,2	4,9	0,6
ПС Сулус/т	9,5	9,2	1,0
ПС БАМ/т	16,6	24,0	1,4
ПС Большая Омутная/т	11,8	14,4	1,2
ПС Уруша/т	22,5	24,6	1,1
ПС Ерофей Павлович/т	5,0	6,1	1,2
ПС Аячи/т	9,9	12,0	1,2

Тяговые ПС имеют высокий коэффициент реактивной мощности. В настоящий момент коэффициент реактивной мощности регламентируется

приказом от 23 июня 2015 г. N 380 Министерства энергетики Российской Федерации «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии». Согласно которому, значения коэффициента реактивной мощности должны быть не выше, значений, указанных в таблице 13.

Таблица 13 – Максимальные значения коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети

Уровень напряжения в точке поставки потребителя электрической энергии	Максимальное значение коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети
110 кВ (154 кВ)	0,5
35 кВ (60 кВ)	0,4
1 - 20 кВ	0,4
ниже 1 кВ	0,35

Коэффициент реактивной мощности на тяговых ПС выше регламентированных [55] значений. Компенсация реактивной мощности на тяговых ПС позволит увеличить пропускную способность линий, поддерживать напряжение на тяговых ПС на требуемом уровне. Такое устройство как СТАТКОМ активно внедряется на тяговых ПС, оно позволяет плавно регулировать генерацию реактивной мощности, а в месте с тем способствует стабилизации напряжения в тяговой сети.

1.3 Особенности электроснабжения железнодорожного транспорта

Электрификация железных дорог – комплекс мероприятий, выполняемых на участке железной дороги для возможности использовать на нем электроподвижной состав.

В системе электроснабжения электрифицированной железной дороги можно выделить две части:

- первичную (внешнюю), которая включает в себя все элементы от электрической станции до тяговой ПС;

- тяговую, состоящую из тяговых ПС и тяговой сети [66].

Тяговая сеть состоит из контактной сети, рельсового пути, питающих и отсасывающих линий тяговых подстанций, а также других устройств, присоединенных к контактной сети и рельсам по длине участка железной дороги.

Изначально, для электрификации железнодорожного транспорта применялся постоянный ток, поскольку электромеханические характеристики двигателей постоянного тока идеально подходят для целей тяги.

Недостатком применения постоянного тока являются сравнительно низкое напряжение в контактной сети. Это в свою очередь вынуждает использовать большее суммарное сечение контактных проводов, уменьшать расстояние между тяговыми подстанциями, увеличивать площадь контакта с токоприёмником электровоза за счет увеличения числа проводов. В связи с этим, электрификация железной дороги постоянным током не прижилась на обширной территории России. На железных дорогах России на участках, электрифицированных по системе постоянного тока, используется напряжение 3 кВ.

В системе постоянного тока напряжение 3 кВ выпрямление переменного тока происходит на тяговой подстанции, и по линиям контактной сети протекает постоянный ток напряжением 3 кВ, поступающий на тяговые двигатели электроподвижного состава. Данная система электрификации является простой, но более дорогостоящей с точки зрения тягового электроснабжения, поскольку требует установки тяговых подстанций на достаточно близком расстоянии 5-25 км, использование большого суммарного сечения контактных проводов и т.д.

Наибольшее распространение получила система электрификации железных дорог однофазным переменным током промышленной частоты напряжением 25 кВ.

Как правило, тяговые подстанции получают питание от энергосистем, по линиям 110-220 кВ. На тяговых подстанциях установлены однофазные или

трехфазные трансформаторы, которые снижают напряжение до необходимого значения. В настоящее время на большинстве тяговых подстанций применяются трехфазные трансформаторы со схемой соединения обмоток $Y/Y/\Delta-0-11$ или $Y/\Delta/\Delta-11-11$. Одна из обмоток низшего напряжения предназначена для питания нетяговой нагрузки и соединяется либо в звезду при напряжении 35 кВ, либо в треугольник, при напряжении 10(6) кВ. Обмотка для питания тяговой нагрузки напряжением 27,5 кВ всегда соединена в треугольник. От этой стороны питаются две однофазные нагрузки, т.е. электровозы, находящиеся слева и справа от тяговой подстанции, поскольку, на железных дорогах России применяют схему двухстороннего питания контактной сети, когда определенный участок сети получает питание от двух тяговых подстанций. К рельсам на стороне 27,5 кВ всегда присоединяется начало обмотки фазы С.

При электрификации данным способом, в основном используют двигатели постоянного тока и трехфазные асинхронные двигатели, также возможно применение синхронных двигателей со статическими (вентильными) преобразователями.

Непосредственно в электровозе установлен понижающий трансформатор и выпрямитель – для двигателей постоянного тока, расщепитель фаз – для трехфазных асинхронных двигателей.

Также в последнее время внедряется система электрификации переменным током промышленной частоты 2х25 кВ, которая используется для малонаселенных территорий. Особенность данной системы является то, что кроме контактного провода подвешивается дополнительный питающий провод, напряжение которого по отношению к земле равно 25 кВ, в к контактному проводу – 50 кВ. Питание электровозов осуществляется через линейные автотрансформаторы, устанавливаемые между тяговыми подстанциями через 8-15 км и подключаемые крайними выводами к контактному и питающему проводам, а средний к рельсам. На тяговых ПС устанавливаются однофазные

трансформаторы с двумя вторичными обмотками 27,5 кВ каждая, соединяемые последовательно.

Данная система позволяет реже строить тяговые подстанции, а также уменьшить тепловые потери. Электровозы и электропоезда переменного тока в переделке не нуждаются.

В Амурской области электрификация железнодорожного транспорта выполнена переменным током промышленной частоты напряжением 25 кВ.

Электрифицированный железнодорожный транспорт является потребителем первой категории, поэтому тяговые подстанции имеют как правило, двухстороннее питание от двух подстанций энергосистемы или по двум радиальным линиям от разных систем шин одной подстанции, в свою очередь получающей питание не менее чем от двух источников питания. По двухцепной тупиковой линии допускается питание не более одной тяговой подстанции.

При построении схемы питания тяговых подстанций учитывают, что тяговая подстанция может быть опорной или промежуточной. Последняя может быть отпаечной или транзитной.

При двухстороннем питании подстанций по одноцепным линиям число промежуточных подстанций, включаемых в рассечку, как правило, не должно быть более трех [66].

Рассмотрим, каким образом получают питание тяговые ПС в Амурской области.

ПС Сковородино/т получает питание по двум радиальным линиям от разных систем шин ПС Сковородино.

ПС Ульручи/т и Гонжа/т являются транзитными ПС, получают питание по одноцепным линиям от ПС Сковородино и ПС Магдагачи, в свою очередь эти ПС получают питание от разных источников питания, Нерюнгринской ГРЭС и Зейской ГЭС.

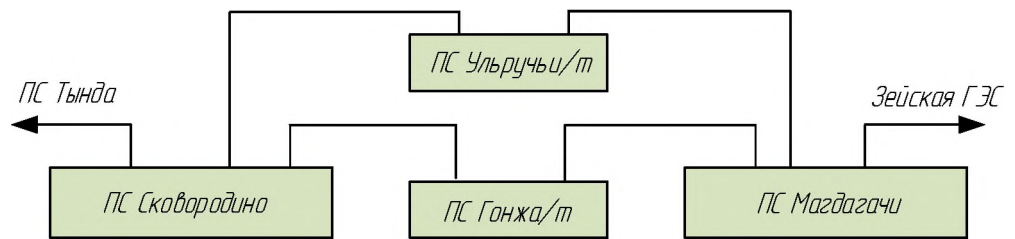


Рисунок 7 – Схема питания тяговых подстанций Ульручьи/т, Гонжа/т

ПС Ерофей Павлович/т является опорной ПС, может получать питание по линиям: ВЛ 220 кВ Ерофей Павлович/т – Чичатка, ВЛ 220 кВ Ерофей Павлович/т – Аячи/т, ВЛ 220 кВ Ерофей Павлович/т – Уруша/т, ВЛ 220 кВ Ерофей Павлович/т – Большая Омутная/т.

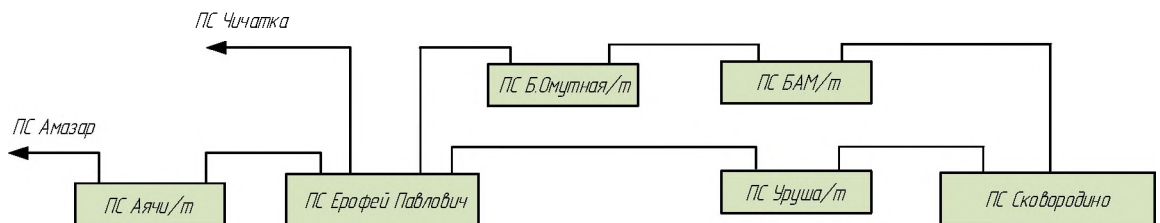


Рисунок 8 – Схема питания тяговых подстанций

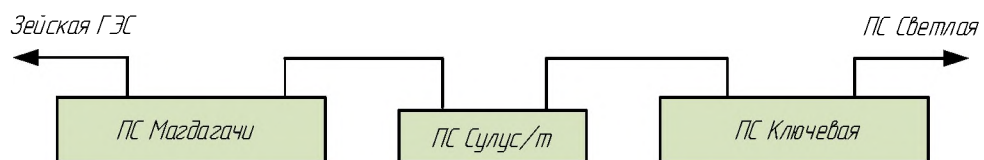


Рисунок 9 – Схема питания тяговых подстанций

Таблица 16 – Тип тяговых ПС

Тяговая ПС	Тип
ПС Ерофей Павлович/т	Опорная
ПС Ульручьи/т	Проходная (транзитная)
Гонжа/т	Проходная (транзитная)
Талдан/т	Ответвительная (отпаечная)
Сквородино/т	Тупиковая
БАМ/т	Проходная (транзитная)
Сулус/т	Проходная (транзитная)
Большая Омутная/т	Проходная (транзитная)
Уруша/т	Проходная (транзитная)
Аячи/т	Проходная (транзитная)

1.4 Влияние тяговой нагрузки на качество электрической энергии

Для решения задачи улучшения качества электрической энергии в сетях с тяговой нагрузкой для начала необходимо разобраться, на какие показатели качества электрической энергии в большей мере влияет тяговая нагрузка.

От трехфазного трансформатора установленного на тяговой ПС получают питание только две однофазные нагрузки, т.е. электровозы, находящиеся справа и слева от тяговой нагрузки. Эта особенность электроснабжения электровозов приводит к несимметричной загрузке фаз линий. Несимметричная нагрузка в свою очередь вызывает несимметрию напряжений.

Электрифицированная железная дорога является переменной нагрузкой, поскольку на межподстанционной зоне непрерывно изменяется число, величина и местоположение тяговой нагрузки. Изменение нагрузки приводит к изменениям напряжения электропитания [66].

Поскольку наиболее распространенной системой электрификации железнодорожного транспорта является система электрификации переменным током промышленной частоты напряжения 25 кВ, а наиболее подходящими для тяги являются двигатели постоянного тока, непосредственно в электровозе установлены выпрямители, которые в свою очередь потребляют ток несинусоидальной формы. Это является причиной возникновения несинусоидального тока, который протекая по элементам сети вызывает несинусоидальное падение напряжения и в результате вся система приобретает несинусоидальный характер.

Также во время проведения структурного анализа было выявлено, что железная дорога потребляет большое количество реактивной мощности. Протекание по линиям некомпенсированной реактивной мощности приводит к излишнему нагреву проводов и повышенным потерям.

Показатели качества электроэнергии, на которые в больше мере влияет тяговая нагрузка:

– Отклонение напряжения электропитания;

– Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;

– Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения;

– Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

1.5 Негативные последствия от низкого качества электрической энергии

Отклонения ПКЭ от нормируемых значений ухудшают условия эксплуатации электрооборудования и потребителей электроэнергии, могут привести к значительным убыткам.

В данном пункте подробно рассмотрим влияние отклонения напряжения электропитания, несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу различных электроприемников и электрооборудования.

1.5.1 Отклонение напряжения

Отклонения напряжения оказывают значительное влияние на работу асинхронных двигателей, являющихся наиболее распространенными приемниками электроэнергии в промышленности.

При изменении напряжения изменяется механическая характеристика асинхронных двигателей – зависимость его вращающего момента от скольжения или частоты вращения. Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату напряжения на его выводах. При снижении напряжения уменьшается вращающий момент и частота вращения ротора двигателя, так как увеличивается его скольжение. При значительном снижении напряжения на выводах двигателей, работающих с полной нагрузкой, момент сопротивления механизма может превысить вращающий момент, что приводит к остановке двигателя.

Повышение напряжения на выводах двигателя приводит к увеличению потребляемой им реактивной мощности. При этом удельное потребление реактивной мощности растет с уменьшением коэффициента загрузки двигателя.

Лампы накаливания характеризуются номинальными параметрами: потребляемой мощностью, световым потоком световой отдачей и средним

номинальным сроком службы. Эти показатели в значительной мере зависят от напряжения на выводах ламп накаливания. При снижении напряжения наиболее заметно падает световой поток. При повышении напряжения сверх номинального увеличивается световой поток, мощность лампы и световая отдача, но резко снижается срок службы ламп и в результате они быстро перегорают. При этом имеет место и перерасход электроэнергии.

Люминесцентные лампы менее чувствительны к отклонениям напряжения. При повышении напряжения потребляемая мощность и световой поток увеличиваются, а при снижении – уменьшаются, но не в такой степени как у ламп накаливания. При пониженном напряжении условия зажигания люминесцентных ламп ухудшаются, поэтому срок их службы, определяемый распылением оксидного покрытия электродов, сокращается как при отрицательных, так и при положительных отклонениях напряжения.

Вентильные преобразователи обычно имеют систему автоматического регулирования постоянного тока путем фазового управления. При повышении напряжения в сети угол регулирования автоматически увеличивается, а при понижении напряжения уменьшается. Повышение напряжения приводит к увеличению потребления реактивной мощности преобразователем, что приводит к ухудшению коэффициента мощности. В то же время другие показатели вентильных преобразователей с повышением напряжения улучшаются, и поэтому выгодно повышать напряжение на их выводах в пределах допустимых значений.

Электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. Понижение напряжения электродуговых печей приводит к удлинению процесса плавки стали. Повышение напряжения приводит к перерасходу электроэнергии.

Отклонения напряжения отрицательно влияют на качество работы и срок службы бытовой электронной техники.

1.5.2 Несимметрия напряжения

Несимметрия напряжения в сети отрицательно сказывается на работе асинхронных двигателей, приводит к ускоренному старению изоляции и

уменьшению располагаемой мощности двигателя. Особое значение для асинхронных двигателей имеет напряжение обратной последовательности, в свою очередь даже небольшая несимметрия напряжений вызывает значительные токи обратной последовательности. Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора.

При несимметрии напряжений сети в синхронных машинах наряду с возникновением дополнительных потерь активной мощности и нагревом статора и ротора могут возникнуть опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети. При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, а в особенности при недостаточной прочности и наличии дефектов сварных соединений.

В случае наличия токов обратной и нулевой последовательности увеличиваются суммарные токи в отдельных фазах элементов сети, что приводит к увеличению потерь активной мощности и может быть недопустимо с точки зрения нагрева. Токи нулевой последовательности протекают постоянно через заземлители. При этом дополнительно высушивается и увеличивается сопротивление заземляющих устройств. Это может быть недопустимым с точки зрения работы релейной защиты, а также из-за усиления воздействия на низкочастотные установки связи и устройства железнодорожной блокировки.

Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных вентильных выпрямителей: значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, ухудшаются условия работы системы импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

Конденсаторные установки при несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование установленной конденсаторной мощности. Кроме того, конденсаторные установки в этом случае усиливают уже существующую

несимметрию, так как выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах (пропорционально квадрату напряжения на конденсаторной установке).

1.5.3 Несинусоидальность напряжения

Рассмотрим негативные последствия от несинусоидальности системы напряжения.

Во вращающихся машинах гармоники тока приводят к дополнительным потерям в обмотках ротора и статора, перегреву частей, а это в свою очередь приводит к преждевременному старению оборудования, выходу из строя. При наложении гармоник может возникнуть механическая вибрация ротора.

Компоненты гармонической частоты значительно повышают потери в силовых трансформаторах из-за увеличения вихревых токов, так как подобные потери пропорциональны квадрату значения частоты. При росте потерь вырастает и фактическая рабочая температура трансформатора, что значительно сокращает срок службы.

В конденсаторных батареях и кабелях протекание несинусоидального тока приводят к дополнительному нагреву и увеличению диэлектрических потерь. Также возможно повреждение конденсатора при возникновении гармонических резонансов в сети.

Проникновение высших гармоник в сеть приводит к нарушениям работы устройств телемеханики, автоматики, релейной защиты. В сети возможно возникновение резонансных режимов на высших гармониках, при этом резко возрастают токи и напряжения на отдельных участках сети.

Влияние гармоник на индукционные приборы измерения мощности и учета электроэнергии приводит к увеличению погрешности результатов их измерений.

Экономическими последствиями гармонических искажений являются более короткие сроки эксплуатации оборудования, снижение энергоэффективности, а также тенденция к необоснованным аварийным отключениям.

2 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Качество электроэнергии представляет собой степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электроэнергии. Параметры качества электроэнергии количественно описываются показателями качества электроэнергии ПКЭ. Электроэнергия как товар должна соответствовать определенному качеству, поэтому ПКЭ нормируются [61].

Электрифицированный железнодорожный транспорт негативно сказывается на следующих параметрах качества электроэнергии: отклонение напряжения, колебания напряжения, несинусоидальность напряжения, несимметрия напряжения трехфазной системы. Произведем расчет показателей качества электрической энергии непосредственно для выбранного участка электрической сети и оценим рассчитанные показатели качества электроэнергии на соответствие действующему стандарту – ГОСТ 32144-2013.

В первом разделе был произведен расчет режима электрической сети и его анализ, из которого был сделан вывод, что такой ПКЭ, как установившееся отклонение напряжения находится в допустимых пределах.

Поскольку тяговая нагрузка особенно сильно влияет на несимметрию и несинусоидальность напряжения, в данной главе произведем расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Для улучшения качества электрической энергии, применяют различные технические устройства. Расчет токов высших гармоник, токов обратной последовательности, суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности и других параметров позволят корректно выбрать данные технические устройства. Расчет показателей несимметрии и несинусоидальности напряжений будет произведен в программе MathCad 15.

2.1 Нормативные значения показателей качества электрической энергии

Действующим стандартом, регламентирующим качество электроэнергии является ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Показатели качества электроэнергии, на которые в больше мере влияет тяговая нагрузка:

- Отклонение напряжения электропитания;
- Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения;
- Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

Далее рассмотрим как эти показатели нормируются в ГОСТ 32144-2013.

2.1.1 Отклонение напряжения

Данный ПКЭ определяется в точке передачи электрической энергии следующим образом:

$$\delta U_{(-)} = \frac{(U_{\text{ном}} - U_{(-)})}{U_{\text{ном}}} \times 100, \% \quad (10)$$

$$\delta U_{(+)} = \frac{(U_{(+)} - U_{\text{ном}})}{U_{\text{ном}}} \times 100, \% \quad (11)$$

где $U_{(-)}, U_{(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие и большие номинального напряжения соответственно, усредненные в интервале 10 минут.

$U_{\text{ном}}$ – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению или согласованному напряжению электропитания.

Согласно [12] отклонение напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течении 100 % времени интервала в одну неделю.

Из расчета режима в ПВК RastrWin 3 можно сделать вывод, что отклонение напряжения на рассматриваемом участке сети не выходят за пределы, установленные в ГОСТ 32144-2013.

2.1.2 Несинусоидальность напряжения

Гармонические составляющие напряжения в точке передачи электрической энергии учитываются до 40-го порядка [12].

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими ПКЭ:

- Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U ;
- Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, $K_U, \%$ – это отношение среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратичному значению основной составляющей в точке передачи электрической энергии находится по формуле:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \times 100, \% \quad (12)$$

где U_1 – значение основной гармонической составляющей напряжения, кВ,

n – номер гармонической составляющей напряжения,

U_n – значения n -ой гармонической составляющей, кВ.

Для суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, $K_U, \%$ установлены следующие нормы:

1) Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_U, \%$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 17, в течение 95 % времени интервала в одну неделю [12];

2) Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_U, \%$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны

превышать значений, установленных в таблице 18, в течение 100 % времени интервала в одну неделю [12].

Таблица 17 – Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U [12]

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 - 25	35	110 - 220
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица 18 – Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U [12]

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 - 25	35	110 - 220
12,0	8,0	6,0	3,0

Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, в процентах напряжения основной гармоникой составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии находится по формуле:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \times 100, \% \quad (13)$$

В данной работе будет произведен расчет ВГ 3, 5 и 7 порядка.

Для коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ установлены следующие нормы:

1) Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 минут, не должны превышать значений, установленных в таблице 19 в течении 95 % времени интервала в неделю [12].

2) Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать

значений, установленных в таблице 19, увеличенных в 1,5 раза, в течение 100 % времени каждого периода в одну неделю [12].

Таблица 19 – Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ [12]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих $K_{U(n)}$, %			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 - 25	35	110 - 220
3	5	3	3	1,5
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1

2.1.3. Несимметрия напряжения

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю [12];

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю [12].

2.2 Методика расчета показателей качества электрической энергии

2.2.1 Расчет несинусоидальности напряжения

В тяговой сети железных дорог однофазного переменного тока, кроме тока основной частоты 50 Гц, присутствуют нечетные гармоники тока, кратные основной частоте, т. е. гармоники с частотами 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750 Гц и т. д. Произведем расчет 3, 5 и 7 гармоники. Рассчитаем суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения на ПС Сковородино.

Пассивные элементы сети, такие как трансформаторы, линии, замещают активным R , реактивным X_L и емкостными X_C сопротивлениями. В качестве активных элементов принимают электроприемники генерирующие высшие гармоники, которые представляют в схемах замещения источниками высших гармоник неограниченной мощности. При расчетах параметров несинусоидальности в электрических сетях напряжением выше 1000 В допускается схемы замещения составлять только из реактивных элементов [10].

Пример схемы замещения для расчета несинусоидальности напряжения представлен на рисунке 10.

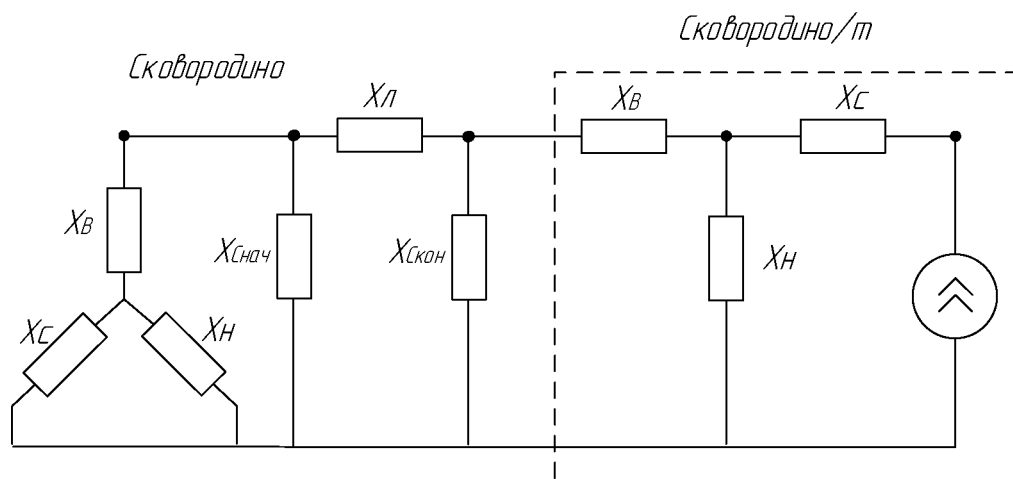


Рисунок 10 – Схема замещения участка электрической сети
ПС Сковородино – ПС Сковородино/т

После составления схемы замещения и расчета параметров сети производится последовательное свертывание схемы замещения в направлении источников тока.

В качестве примера рассмотрим расчет токов высших гармоник для участка сети ПС Сковородино – ПС Сковородино/т.

Значения сопротивлений трансформатора на ПС Сковородино:

$$X_B = 52 \cdot n \text{ Ом}$$

$$X_C = 0 \cdot n \text{ Ом}$$

$$X_H = 97.8 \cdot n \text{ Ом}$$

Значения сопротивлений трансформатора на ПС Сковородино/т:

$$X_B = 82,5 \cdot n \text{ Ом}$$

$$X_C = 0 \cdot n \text{ Ом}$$

$$X_H = 62,5 \cdot n \text{ Ом}$$

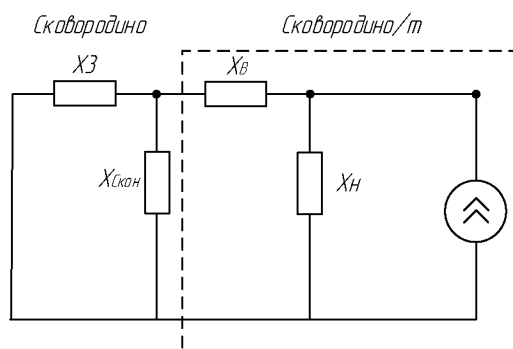
Параметры линии:

$$X_L = x_{уд} \cdot l \cdot n = 1,14 \cdot n \text{ Ом}$$

$$X_C = -\left(\frac{l}{b_{уд}}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0,5 \cdot n \text{ Ом}$$

Для расчетов токов и напряжений 3, 5 и 7 гармоники необходимо активные сопротивления умножить, а емкостное сопротивление линии разделить на номер гармоники n . В данном примере произведем расчёт токов и напряжений 3 гармоники.

Произведем преобразование схемы замещения.



Сопротивление X_3 находим по формуле:

$$X_3 = \frac{(X_{\text{ВСковородино}} + X_{\text{НСковородино}}) \cdot X_C}{(X_{\text{ВСковородино}} + X_{\text{НСковородино}}) + X_C} + X_{\text{Л}} = 3,24 \text{ Ом} \quad (14)$$

Преобразуем звезду в треугольник:

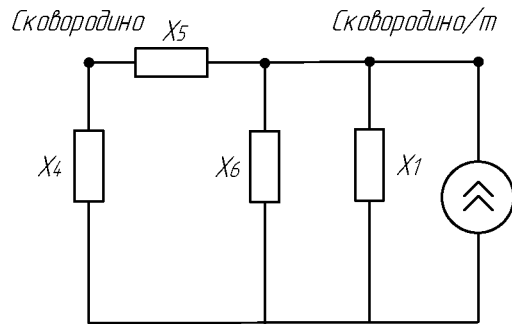


Рисунок 12 – Эквивалентирование схемы замещения

Сопротивления X_4 , X_5 , X_6 находим по формулам:

$$X_4 = X_3 + X_C + \frac{X_3 \cdot X_C}{X_{\text{ВСковородиноТяга}}} = 3,075 \quad (15)$$

$$X_5 = X_3 + X_{\text{ВСковородиноТяга}} + \frac{X_3 \cdot X_{\text{ВСковородиноТяга}}}{X_C} = -4,6 \cdot 10^3 \quad (16)$$

$$X_6 = X_C + X_{\text{ВСковородиноТяга}} + \frac{X_C \cdot X_{\text{ВСковородиноТяга}}}{X_3} = 234,6 \quad (17)$$

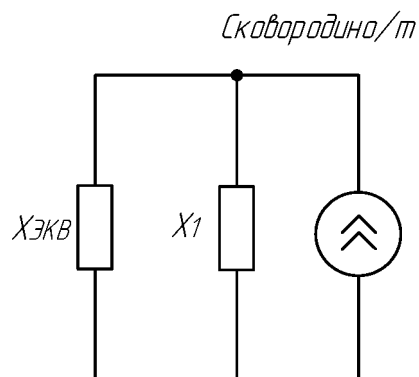


Рисунок 13 – Эквивалентная схема замещения

$$X_{\text{ЭКВ}} = \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 247,3 \text{ Ом} \quad (18)$$

$$X_1 = X_{\text{НСковородиноТяга}} = 187,5 \text{ Ом}$$

После этого определяем токи гармоник в ветвях сети.

Для определения напряжений высших гармоник в какой-либо ветви схемы пользуются коэффициентами токораспределения.

$$K_1 = \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0,569$$

Вычислим ток генерируемый источником токов высших гармоник по следующей формуле:

$$I_V = \frac{I}{n} = \frac{S_{\Pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{CT} \cdot n} \quad (19)$$

где S_{Π} – полная расчетная мощность преобразователя, МВА;

n – номер гармоники;

U_{CT} – номинальное напряжение, кВ.

Нагрузка на ПС Сковородино/т:

$$S_{\text{СковородиноТяга}} = \sqrt{11^2 + 11,9^2} = 16,21 \text{ МВА}$$

Ток на ПС Сковородино/т:

$$I = \frac{S_{\text{СковородиноТяга}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0,014 \text{ кА} \quad (20)$$

Ток третьей гармоники:

$$I_{1\text{СковородиноТяга}} = K_1 \cdot I = 8,063 \cdot 10^{-3} \text{ кА} \quad (21)$$

Напряжение третьей гармоники:

$$U_{1\text{СковородиноТяга}} = I_{1\text{СковородиноТяга}} \cdot X_1 = 1,512 \text{ кВ} \quad (22)$$

В Приложении А приведен подробный расчет несинусоидальности напряжения выбранного участка электрической сети.

После произведенного расчета каждого участка электрической сети находим суммарный ток третьей гармоники на ПС Сковородино по следующей формуле:

$$I_{\Sigma 3} = \sqrt{I_{СковородиноГ}^2 + I_{БАМ}^2 + I_{БОмутнаяГ}^2 + I_{ЕПавлович1}^2 + I_{Уруша}^2 + I_{ЕПавлович2}^2 + I_{Аячи}^2 + I_{Ульручы}^2 + I_{Талдан1}^2 + I_{Магдагачи1}^2 + I_{Талдан2}^2 + I_{Гонжа}^2 + I_{Магдагачи2}^2} = 0,02 A \quad (23)$$

Напряжение третьей гармоники на ПС Сковородино:

$$U_{\Sigma 3} = I_{\Sigma 3} \cdot X_{Сковородино} = 8,853 кВ \quad (24)$$

Далее произведен расчет токов и напряжений 5 и 7 гармоники.

Таблица 20 – Значения токов и напряжений ВГ

Параметр	$n=3$	$n=5$	$n=7$
Ток, кА	0,02	0,012	0,00849
Напряжение, кВ	8,853	8,89	8,902

Коэффициент искажения несинусоидальности кривой напряжение на ПС Сковородино:

$$K_U = \frac{\sqrt{U_{\Sigma 3}^2 + U_{\Sigma 5}^2 + U_{\Sigma 7}^2}}{U_{НОМ}} \cdot 100 = 6,9\%$$

Коэффициент n-ой гармонической составляющей:

$$K_{U3} = \frac{U_{\Sigma 3}}{U_{НОМ}} \cdot 100 = 4,02\%$$

$$K_{U5} = \frac{U_{\Sigma 5}}{U_{НОМ}} \cdot 100 = 4,04\%$$

$$K_{U5} = \frac{U_{\Sigma 5}}{U_{НОМ}} \cdot 100 = 4,05\%$$

Таблица 21 – Сравнение расчетных и нормируемых значений ПКЭ

ПКЭ		Расчетное значение, %	Нормируемое значение, %
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , %		6,9	3,0
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$, %	3	4,02	1,5
	5	4,04	1,5
	7	4,05	1

Расчитанные ПКЭ не соответствуют нормам ГОСТ 32144-2013.

2.2.2 Расчет несимметрии напряжений

Несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии по обратной последовательности K_{2U} и коэффициентом несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Поскольку сторона трансформатора питающая тяговую нагрузку соединена в треугольник, ток нулевой последовательности отсутствует.

Произведем расчет коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} . Данный коэффициент рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{2U} = \frac{U_{2s}}{U_1} \cdot 100\% \quad (25)$$

где U_{2s} – напряжение обратной последовательности, кВ,

U_1 – номинальное напряжение, кВ.

Расчет несимметрии напряжения производится по следующему алгоритму:

1) Составляется схема замещения, все элементы схемы вводятся своими сопротивлениями обратной последовательности. Производится эквивалентирование схемы замещения.

2) Несимметричная нагрузка вводится в схему замещения в виде тока обратной последовательности I_2 .

3) Определяется значение I_2 и U_2 в ветвях и узлах схемы.

4) Определяется коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} .

Для нахождения коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} в первую очередь необходимо найти токи обратной последовательности на тяговых подстанциях. Для этого воспользуемся методом симметричных составляющих.

Трехфазная несимметричная система токов или напряжений может быть разложена на три составляющие: систему прямой, обратной и нулевой последовательностей. В методе симметричных составляющих для этого используется оператор поворота $a = e^{j120^\circ}$. Этот оператор является единичным вектором (модуль его равен единице), аргумент которого равен 120° .

Совместное решение приведенной системы трех уравнений позволяет определить токи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

$$\begin{cases} \dot{I}_{A1} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) \\ \dot{I}_{A2} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) \\ \dot{I}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) \end{cases} \quad (26)$$

В нашем случае удобней рассмотреть нагрузку непосредственно на тяговой сети. На фазе А с напряжением $U_A = U_1$ имеется нагрузка I_1 , на фазе с напряжением $U_B = U_{11}$ – нагрузка I_{11} , на фазе с напряжением U_C нагрузка равна нулю [37]. Тогда:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_1 + a\dot{I}_{11}) \quad (27)$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_{11}) \quad (28)$$

Таким способом рассчитаем токи обратной последовательности на каждой тяговой подстанции.

В качестве примера рассмотрим расчет токов и напряжений обратной последовательности на ПС Сковородино/т.

Составление схемы замещения и ее эквивалентирование аналогично расчету несинусоидальности напряжения.

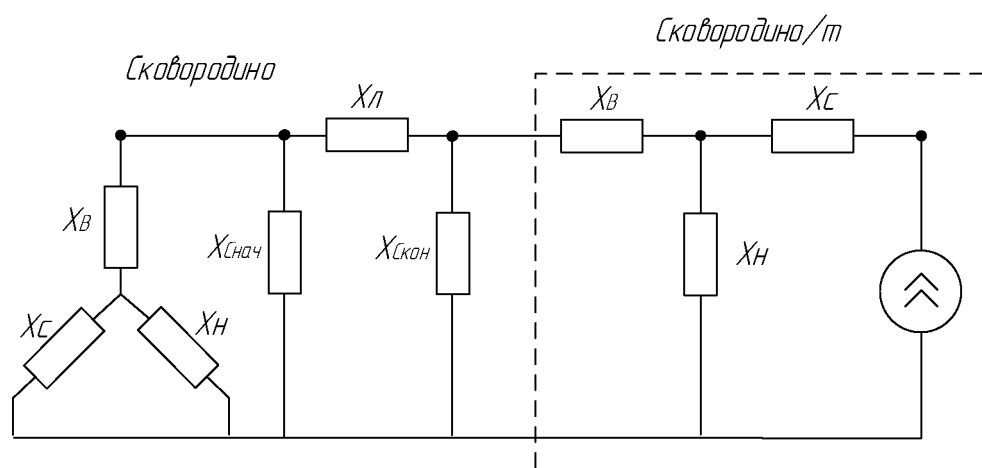


Рисунок 14 – Схема замещения участка электрической сети ПС Сковородино – ПС Сковородино/т

Значения сопротивлений трансформатора на ПС Сковородино:

$$X_B = 52 \text{ Ом}$$

$$X_C = 0 \text{ Ом}$$

$$X_H = 97.8 \text{ Ом}$$

Значения сопротивлений трансформатора на ПС Сковородино/т:

$$X_B = 82,5 \text{ Ом}$$

$$X_C = 0 \text{ Ом}$$

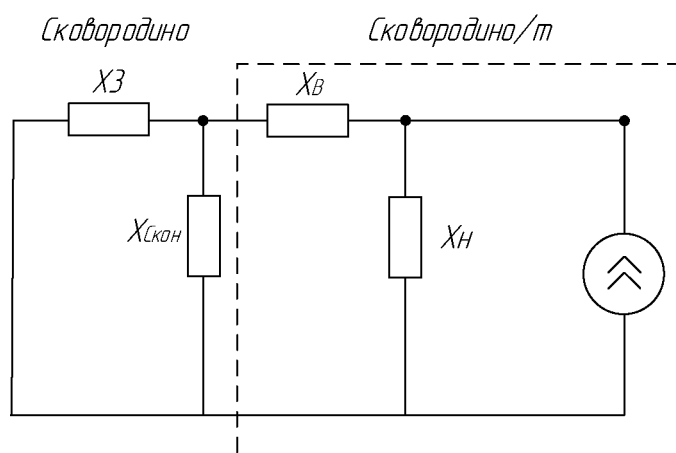
$$X_H = 62,5 \text{ Ом}$$

Параметры линии:

$$X_L = x_{уд} \cdot l = 1,14 \text{ Ом}$$

$$X_C = -\left(\frac{l}{b_{уд}}\right) = -0,5 \text{ Ом}$$

Произведем преобразование схемы замещения.



15 – Эквивалентирование схемы замещения

Сопротивление X_3 находим по формуле:

$$X_3 = \frac{(X_{ВСковородино} + X_{НСковородино}) \cdot X_C}{(X_{ВСковородино} + X_{НСковородино}) + X_C} + X_{Л} = 3,24 \text{ Ом}$$

Преобразуем звезду в треугольник:

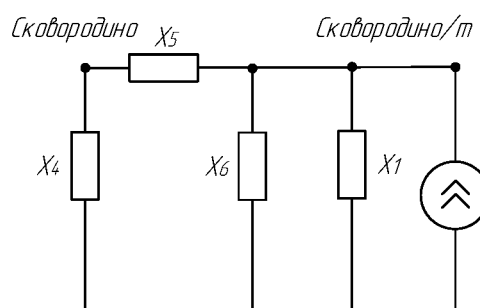


Рисунок 16 – Эквивалентирование схемы замещения

Сопротивления X_4 , X_5 , X_6 находим по формулам:

$$X_4 = X_3 + X_C + \frac{X_3 \cdot X_C}{X_{ВСковородиноТяга}} = 3,075$$

$$X_5 = X_3 + X_{ВСковородиноТяга} + \frac{X_3 \cdot X_{ВСковородиноТяга}}{X_C} = -4,6 \cdot 10^3$$

$$X_6 = X_C + X_{\text{СковородиноТяга}} + \frac{X_C \cdot X_{\text{СковородиноТяга}}}{X_3} = 234,6$$

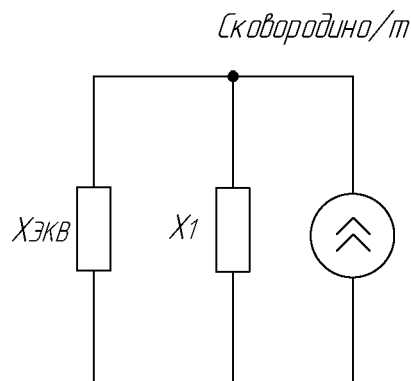


Рисунок 17 – Эквивалентная схема замещения

$$X_{\text{ЭКВ}} = \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 247,3 \text{ Ом}$$

$$X_1 = X_{\text{НСковородиноТяга}} = 187,5 \text{ Ом}$$

Несимметричная нагрузка представляется током обратной последовательности.

Найдем ток обратной последовательности через оператор a по формуле 27.

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_{11}) = 6,913 \cdot 10^{-3} - j1,564 \cdot 10^{-3}$$

$$I_2 = \sqrt{\text{Re}(I_2)^2 + \text{Im}(I_2)^2} = 7,088 \cdot 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_2 = I_2 \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0,581 \text{ кВ}$$

Аналогичный расчет производим для остальной схемы сети. Подробный расчет приведен в Приложении Б.

После произведенного расчета каждого участка электрической сети находим суммарный ток обратной последовательности на ПС Сковородино по следующей формуле:

$$I_{2\Sigma} = \sqrt{I_{2СковородиноГ}^2 + I_{2БАМ}^2 + I_{2БОмутнаяГ}^2 + I_{2ЕПавлович1}^2 + I_{2Уруши}^2 + I_{2ЕПавлович2}^2 + I_{2Аячи}^2 + I_{2Ульручи}^2 + I_{2Талдан1}^2 + I_{2Магдагачи1}^2 + I_{2Талдан2}^2 + I_{2Гонжа}^2 + I_{2Магдагачи2}^2} = 0,025 A$$

Напряжение обратной последовательности на ПС Сковородино:

$$U_{2\Sigma} = I_{2\Sigma} \cdot X_{Сковородино} = 7,487 кВ$$

Коэффициент несимметрии по обратной последовательности:

$$K_{2U} = \frac{U_{2s}}{U_1} \cdot 100 = \frac{7,487}{220} \cdot 100 = 3,403\%$$

Сравним получившиеся значение с действующим стандартом на качество электроэнергии.

Таблица 22 – Сравнение расчетных и нормируемых значений ПКЭ

ПКЭ	Расчетное значение, %	Нормируемое значение, %
Коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %	3,4	2,0

Расчитанный коэффициент несимметрии по обратной последовательности не соответствует нормам ГОСТ 32144-2013.

Из произведенного расчета можно сделать вывод о неудовлетворительном качестве электрической энергии на ПС Сковородино. Не соответствуют действующему стандарту ПКЭ, характеризующие несимметрию и несинусоидальность напряжения. Требуется провести мероприятия по улучшению качества электрической энергии.

3 СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Поскольку качество электрической энергии на ПС Сковородино не удовлетворяет требованиям действующего стандарта, необходимо провести мероприятия по улучшению качества электрической энергии.

Существуют следующие варианты решения проблемы плохого качества электрической энергии:

- схемные решения;
- применение технических устройств, для улучшения КЭЭ.

3.1 Схемные решения

К схемным решениям, снижающим несинусоидальность напряжения, относятся:

- увеличение мощности КЗ на шинах источника ВГ;
- раздельное питание линейных и нелинейных нагрузок;
- увеличение числа фаз выпрямления ВП [61].

Увеличение мощности КЗ на шинах источника ВГ осуществляется за счет повышения напряжения для нелинейных нагрузок или снижения сопротивления питающей сети. Мощные нелинейные нагрузки подключаются через специальные трансформаторы к сетям 35-220 кВ, где мощность КЗ больше, чем на шинах 6-10 кВ [61].

Раздельное питание линейных и нелинейных нагрузок осуществляется путем выделения нелинейных нагрузок на отдельную секцию шин или применением сдвоенных реакторов. В этом случае на шинах питания нелинейных нагрузок допускается высокий уровень коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, поскольку его значение ограничивается только условиями надежности работы автоматических систем управления и самих нагрузок, например условиями надежной коммутации тиристорных преобразователей [61].

Основным средством ограничения ВГ, генерируемых вентильными преобразователями, является увеличение числа фаз выпрямления. Это

объясняется тем, что их спектральный состав тока определяется числом фаз выпрямления m . С увеличением m форма первичного тока преобразователя приближается к синусоидальной, а количество ВГ, содержащихся в токе и напряжении сети, понижается [61].

Вышеперечисленные схемные решения для снижения несинусоидальности напряжения не подходят для нашего случая.

Поскольку тяговые ПС получают питание по линиям 220 кВ, а напряжение стороны, питающей электровозы должно быть 27,5 кВ, такие варианты как увеличение мощности КЗ на шинах источника ВГ и отдельное питание линейных и нелинейных нагрузок, требуют кардинальной перестройки сети, и являются совершенно нецелесообразными для данного случая.

Такое схемное решение, как увеличение числа фаз выпрямления вентильных выпрямителей может быть, но больше относится к сфере машиностроения и в данной работе рассматриваться не будет.

К схемным решениям, снижающим несимметрию напряжения, относятся:

- подключение однофазных ЭП к шинам с более высоким значением мощности КЗ;
- рациональное распределение нагрузок – перераспределение нагрузок между фазами при систематической несимметрии, а при вероятностной несимметрии – с помощью устройств автоматического перераспределения нагрузок [61].

Перераспределение нагрузок между фазами при систематической несимметрии применяется при питании тяговых подстанций. Это специальная схема подключения, которая носит название «встречного» или «двойного винта». Данная схема применяется, если к одной линии присоединяется несколько тяговых подстанций. Если эти подстанции присоединить к линии одинаково, то все они будут недогружать одну и ту же фазу [66].

Принцип данной схемы заключается в чередовании менее нагруженной фазы от тяговых подстанций при переходе от одной ПС к другой.

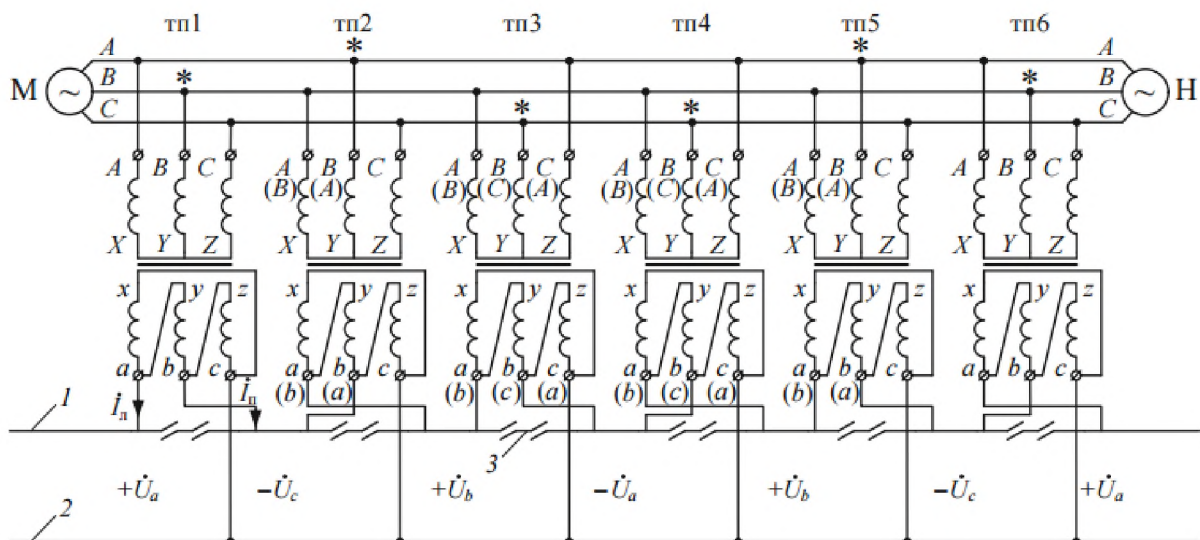


Рисунок 18 – Подключение тяговых ПС по схеме «встречного винта» [66]

Данный метод выравнивания токов и напряжений по фазам питающей линий электропередачи является идеализированным. В реальных условиях добиться абсолютно симметричного режима работы невозможно, поскольку нагрузка постоянно меняется, в зависимости от количества поездов на участке, профиля пути, массы и т.д.

3.2 Технические средства

Для снижения уровня ВГ используют такие технические средства как: силовые резонансные фильтры (СРФ), фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), ненастроенные фильтры (НФ), гибридные и активные фильтры. Также могут способствовать фильтрации ВГ такие современные технические устройства как СТАТКОМ.

Силовой резонансный фильтр состоит из последовательно соединенных реактора и батареи конденсаторов. СРФ подключается параллельно источнику ВГ. Схема СРФ приведена на рисунке 12.

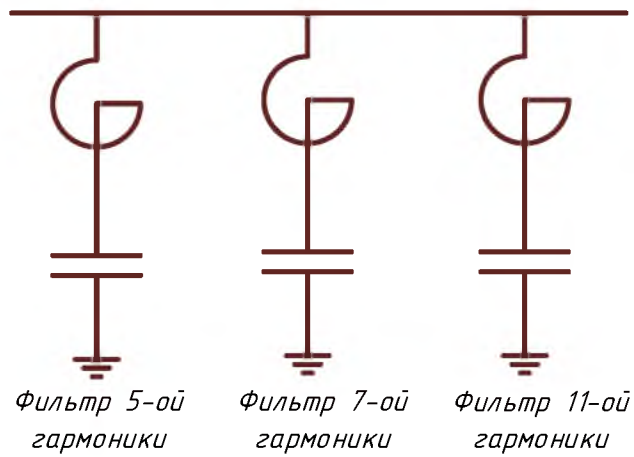


Рисунок 19 – Схема СРФ

Каждый фильтр настраивается на частоту ВГ так, чтобы сопротивление реактора было равно сопротивлению БК.

$$n\omega L = \frac{1}{n\omega C} \quad (29)$$

Помимо фильтрации высших гармоник СРФ генерирует реактивную мощность на основной частоте. А также при определенных условиях такие фильтры могут использоваться для симметрирования линейных напряжений. Для этих целей используются однофазные конденсаторы с мощностью 100-150 квар, которые собираются в группы и включаются в треугольник или звезду.

При наличии фильтров возможно подключение БК без защитных реакторов. Во избежание резонансных явлений в сети необходим следующий порядок включения фильтров: Ф3-Ф5-Ф7-Ф11-Ф13-БК. Отключение должно производиться в обратном порядке. Настраивают фильтры на резонансную частоту с точностью, равной величине ступени регулирования индуктивности фильтра α [61].

Фильтросимметрирующие устройства представляют собой несимметричный фильтр, который подключен на линейное напряжение сети. Расчет параметров данного устройства производится по условиям симметрирования напряжения [61].

Схема фильтросимметрирующие устройства приведена на рисунке 18.

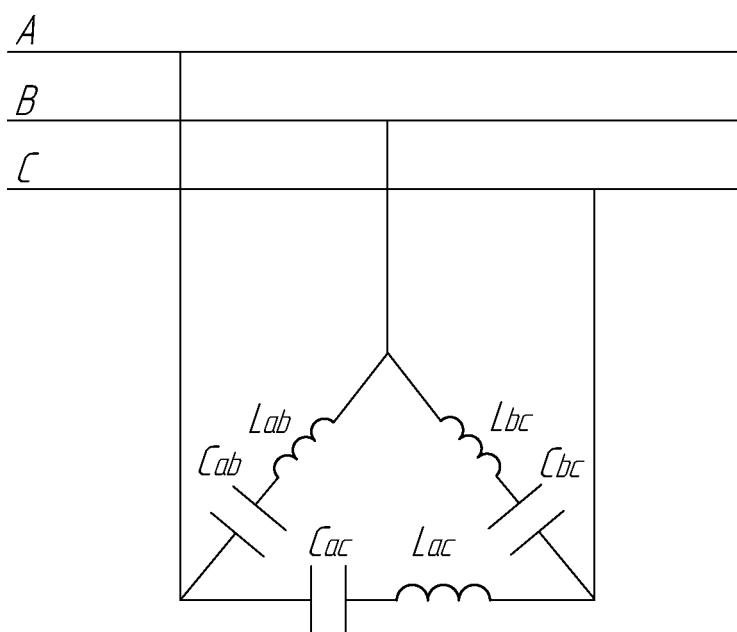


Рисунок 20 – Схема фильтросимметрирующие устройства

Фильтросимметрирующие устройства позволяют решать одновременно две проблемы: снижают несимметрию напряжений и уровень ВГ в сети.

Поскольку СРФ являются фильтрами малой мощности при их неточной настройке возможны перегрузы по току и даже выход из строя. В таком случае ненастроенные фильтры предпочтительней с точки зрения загрузки фильтров токами высших гармоник [61].

Для потребителей с низким коэффициентом мощности, таких как тяговая нагрузка, актуальным является компенсация реактивной мощности. Если в составе ФКУ устанавливать батарей конденсаторов большой мощности, это позволяет уменьшить требования к точности настройки фильтров.

Ненастроенные фильтры могут состоять из одного фильтра n -той гармоники, либо на базе двух фильтров, настроенных на частоты n_p и n_{p2} . Ненастроенный фильтр может использоваться также в сочетании с отдельно стоящей БК [61].

Сравнительно новый тип устройств для отчистки напряжения и токов от гармоник и сглаживаний возмущений в системе – активные и гибридные фильтры высших гармоник.

Активные фильтры – это устройства повышения качества электроэнергии, которые способны автоматически менять свои собственные характеристики при изменении параметров сети.

Активные фильтры гармоник (АФГ) – это коммутируемые устройства, характеристики которых формируются с помощью закона управления. Они представляют собой адаптивные устройства, с параметрами, которые изменяются в зависимости от характеристик нагрузки и режима работы сети. АФГ выполняют следующие функции: подавляют высшие гармоники, корректируют коэффициент мощности, уменьшают фликер-эффект [71].

Схемы пассивных фильтров содержат только пассивные элементы: резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. В схемы активных фильтров помимо указанных элементов входят такие активные изделия, как транзисторы или интегральные микросхемы. Фильтрующие свойства устройства определяются его амплитудно-частотной характеристикой, которой называется зависимость коэффициента усиления этого устройства от частоты сигнала.

Типичная схема чисто активного фильтра включает шунтирующий управляемый выпрямитель с емкостной нагрузкой на стороне постоянного тока. Он может быть включен через трансформатор параллельно нелинейной цепи либо через последовательно врезанный в линию питания трансформатор. Управляющая часть схемы включает контроллер, реагирующий на мгновенные значения тока нагрузки, выделяющий ток гармоник и вырабатывающий сигнал управления силовой частью. Силовая электроника через трансформатор связи выдает компенсирующий ток в противофазе с токами гармоник, в результате чего они подавляются в степени, зависящей от коэффициента усиления управляющей схемы [80].

В последовательной схеме активного фильтра он вырабатывает компенсирующее напряжение, подавляющее ток гармоник. Силовая часть активного фильтра включает трансформатор связи и преобразователь на силовой электронике. Преобразователь с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) может выполняться как по схеме источника напряжения, так и по схеме источника тока. Чистые активные фильтры чаще используют преобразователь по схеме источника напряжения с ШИМ и накопительным конденсатором как звеном постоянного тока. Такая схема по сравнению со схемой источника тока выигрывает по стоимости, размерам и КПД. Активный фильтр, включаемый параллельно нагрузке, применяется, в основном, для снижения уровня гармоник тока, вызываемых наличием нелинейных устройств, входящих в состав нагрузки. Включаемый последовательно в линию активный фильтр, кроме основной функции подавления гармоник тока, может использоваться для регулирования напряжения основной гармоники в узком диапазоне значений, а также для демпфирования нарушений качества электроэнергии — несимметрии напряжений и фликкера [25].

Ограничивает применение чисто активных фильтров их высокая стоимость, определяемая большой мгновенной мощностью, необходимой для фильтрации. Чисто активные фильтры должны при этом выдавать полную мощность нелинейной нагрузки по максимальным величинам токов и напряжений. На практике мощные активные фильтры выполняются гибридными – сочетанием активного и пассивного фильтров [80].

Недостаток пассивных фильтров – невозможность управления их параметрами при изменении режима работы нагрузки устраняется в гибридных за счет возможности управления реактивными параметрами с помощью активной части схемы. Мощность активной части гибридного фильтра снижается при этом более, чем на порядок по сравнению с параллельным активным фильтром. Устраняется противоречие между высокой добротностью пассивного фильтра и его неустойчивостью в динамических режимах работы. Особенно важно это при большой требуемой мощности фильтра.

Автоматическая коррекция параметров гибридных фильтров при изменениях режима в сети дает следующие преимущества [80]:

- коррекция частотных характеристик в статических режимах работы сети;
- снижение отрицательного воздействия на фильтрацию от изменения частоты и параметров элементов фильтра во время работы;
- исключение возникновения резонансов на частотах, близких к фильтруемой гармонике;
- демпфирование резонансных явлений в пассивных элементах фильтров;
- снижение уровня гармоник тока в сети от разных источников высших гармоник [80].

Гибридный фильтр, состоящий из серийного активного фильтра и шунтирующего пассивного фильтра, для подавления гармоник в сети, питающей демонстрационный высокоскоростной поезд на магнитной левитации в Yamanashi (Япония). В этой схеме активный фильтр также демпфирует гармонический резонанс между пассивным фильтром и реактивным сопротивлением сети [80].

Для снижения несимметрии напряжений применяют специальные технические средства – сумметрирующее устройства.

В зависимости от места установки СУ различают следующие способы симметрирования: индивидуальный; групповой; централизованный; комбинированный [61].

Индивидуальные СУ целесообразны непосредственно для симметрирования отдельных ЭП [61].

Групповое симметрирование заключается в установке в различных точках сети СУ, каждое из которых симметрирует определенный участок сети (группу несимметричных ЭП) [61].

При централизованном способе в распределительной сети устанавливается одно СУ [61].

Комбинированный способ заключается в одновременном использовании нескольких способов, представленных в одной сети [61].

Индивидуальный способ симметрирования устраняет несимметрию непосредственно в месте её возникновения – на зажимах несимметричного ЭП. Однако, коэффициент использования СУ при этом низкий.

При централизованном способе установленная мощность СУ оказывается меньше, чем при индивидуальном, но и снижение несимметрии напряжения также меньше, т.е. более низкая эффективность использования СУ.

Лучшими показателями обладает групповой способ симметрирования [61].

Выбор способа симметрирования в конкретных случаях определяется параметрами сети, числом и характером работы несимметричных ЭП [61].

В нашем случае будем применять централизованный способ, установим СУ на ПС Сковородино.

В зависимости от характера нагрузки и места установки возможно применение управляемых и неуправляемых СУ. Управляемые СУ могут иметь непрерывное и дискретное управление.

Существует большое количество схем СУ, основными является: СУ трансформаторного типа и индуктивно-ёмкостные СУ.

Принцип работы СУ трансформаторного типа заключается в применении специального трансформатора, включенного между несимметричной нагрузкой и сетью, с помощью которого получают необходимое напряжение на нагрузке и добиваются выравнивания линейных токов.

Одним из примеров СУ трансформаторного типа является трансформатор Скота. Трансформаторная схема Скотта состоит из двух однофазных трансформаторов, соединенных особым способом, где создается двухфазная система напряжений, сдвинутых относительно друг друга на 90 градусов. Данная схема позволяет преобразовать симметричную трехфазную систему напряжений в двухфазную симметричную систему.

Трансформаторы Скотта применяется в электроснабжении железнодорожного транспорта. На рисунке 21 приведена схема питания тяговой сети с помощью трехфазно-двухфазного трансформатора (схема Скотта).

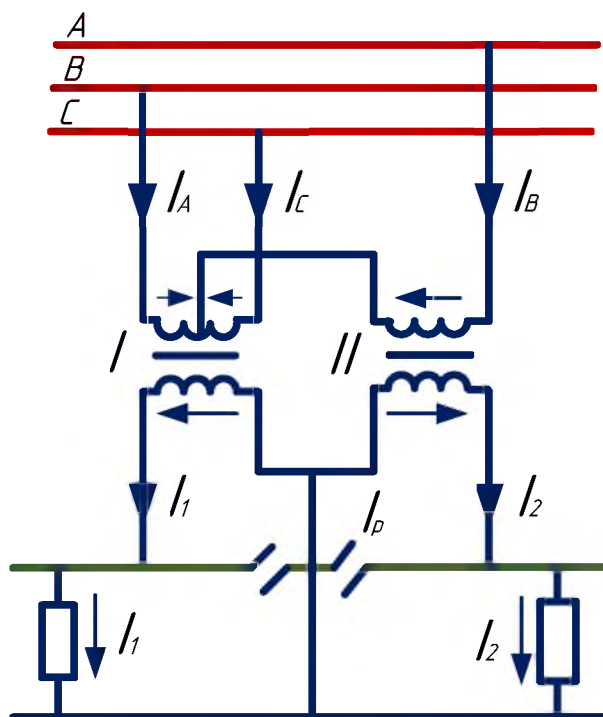


Рисунок 21 – Схема питания тяговой сети с помощью трехфазно-двухфазного трансформатора (схема Скотта)

Трансформатор Скотта состоит из двух однофазных трансформаторов с различными коэффициентами трансформации. Оба вывода трансформаторов подсоединяются к проводам линий электропередачи. Конец первичной обмотки трансформатора II соединяется со средней точкой обмотки трансформатора I.

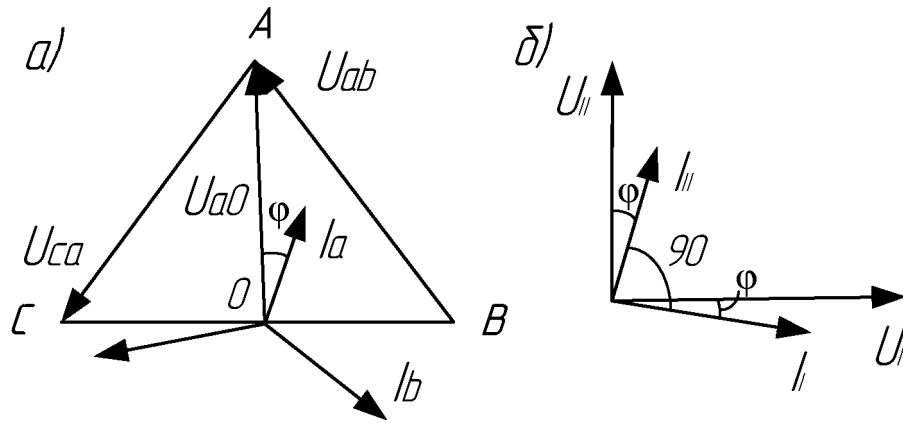


Рисунок 22 – Векторная диаграмма трансформатора (а) и векторная диаграмма для фидерных зон (б)

Из векторной диаграммы видно, что U_{a0} на первичной обмотке трансформатора II равно $\frac{\sqrt{3}}{2}U_{bc}$, где U_{bc} – линейное напряжение трансформатора I. Так как напряжения в тяговой сети на фидерных зонах слева и справа от ПС должны быть одинаковыми, коэффициенты трансформации трансформаторов I и II получаются разными. Вторичные обмотки имеют одинаковое число витков. При холостом ходе напряжения на вторичной стороне трансформаторов равны и сдвинуты на угол $\pi/2$.

Достоинство схемы Скотта состоит в том, что при симметричной двухфазной нагрузке обеспечивается симметричная нагрузка трёхфазной питающей сети.

В качестве примера также рассмотрим применение СУ с автотрансформатором, индуктивностью и ёмкостью. На рисунке 23 приведена схема данного устройства.

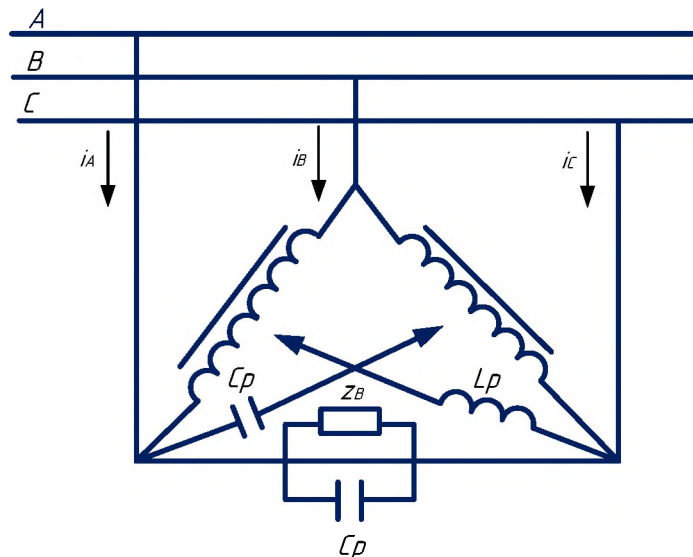


Рисунок 23 – Схема симметрирующего устройства с автотрансформатором, индуктивностью и емкостью

Соотношения витков трансформаторов выбирают таким образом, чтобы вторичные напряжения были равны. Симметрирование нагрузки в данной схеме производится с помощью изменения величины конденсатора или катушки индуктивности. Данная схема позволяет снизить коэффициент несимметрии по обратной последовательности.

Стоит отметить, что СУ трансформаторного типа являются нерегулируемыми СУ, а их симметрирующее свойства зависят от характера нагрузки [61].

Индуктивно-емкостные СУ представляют собой комбинацию индуктивных и емкостных элементов, подключенных к сети параллельно с несимметричной нагрузкой [61].

Наибольшее распространение получила схема Штейнметца. Данная схема представлена на рисунке 24.

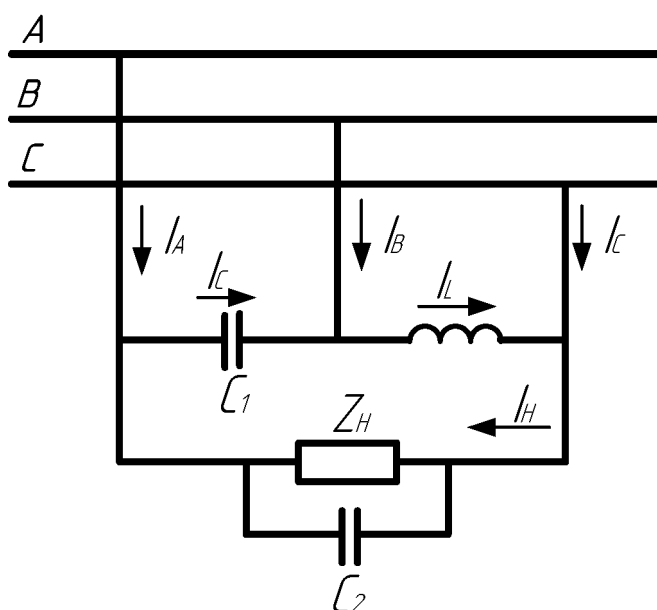


Рисунок 24 – Схема Штейнметца

Сумметрирующее устройство Штейнметца наиболее эффективно при коэффициенте мощности нагрузки равном 1. Поэтому при активно – индуктивной нагрузке параллельно ей подключается батарея конденсаторов C_2 . СУ Штейнметца обеспечивает симметрирование и активно – индуктивной нагрузки (без конденсатора C_2). Однако в этом случае коэффициент мощности значительно снижается до значений, меньших коэффициента мощности нагрузки [61].

Данная схема в основном применяется для симметрирования однофазных ЭП с незначительно меняющимися нагрузками и коэффициентом мощности близким к единице.

Электрифицированный железнодорожный транспорт в свою очередь потребляет большое количество реактивной мощности и характеризуется низким коэффициентом мощности, а также является непрерывно изменяющейся нагрузкой. В этом случае необходимо применение управляемых СУ.

Управляемые СУ могут иметь как непрерывное, так и ступенчатое (дискретное) управление.

В управляемых СУ батареи конденсаторов набирают из нескольких групп, одна из которых подключена постоянно, а другие – переменнo. Переключения осуществляются при помощи контакторов или тиристорных ключей. Недостатком тиристорного управления является генерирование ВГ тока тиристорами.

Для симметрирования несимметричных нагрузок с низким коэффициентом мощности наиболее оптимальным вариантом является применение БК с неодинаковыми мощностями фаз. На рисунке 25 приведена схема данного устройства.

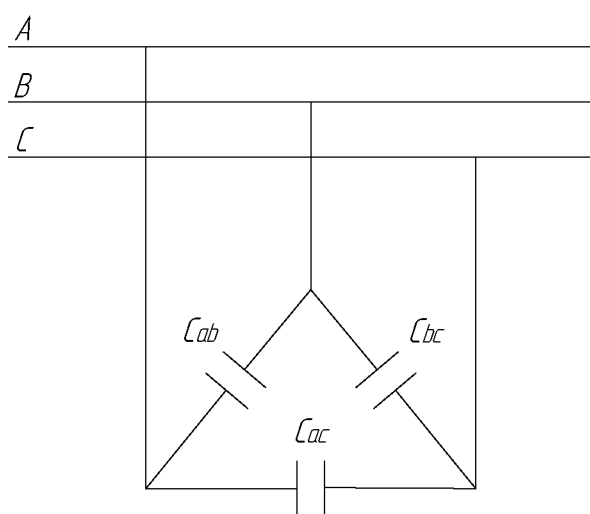


Рисунок 25 – Схема симметрирования с использованием БК

В этом случае мощность СУ выбирается из условия компенсации реактивной мощности. Мощность каждой БК выбирается таким образом, чтобы ток обратной последовательности БК компенсировал ток обратной последовательности нагрузки.

Поскольку тяга переменного тока потребляет большое количество реактивной мощности рассмотрим также современные технические устройства для компенсации реактивной мощности.

Статический тиристорный компенсатор (СТК) – регулируемый источник реактивной мощности. В состав СТК входят реактор с воздушным охлаждением и тиристорный вентиль с воздушным или водяным охлаждением, образующие тиристорные группы (ТГ). Фильтровые реакторы подключаются

последовательно батарее конденсаторов и образуют фильтрокомпенсирующие цепь (ФКЦ), настроенную на определенную резонансную частоту. ТРГ, ФКЦ и нагрузка подключаются параллельно.

Тиристорный вентиль, система охлаждения и система автоматического управления СТК размещаются в помещении с автоматической поддержкой микроклимата. Компенсирующие реакторы и ФКЦ размещаются на открытом воздухе.

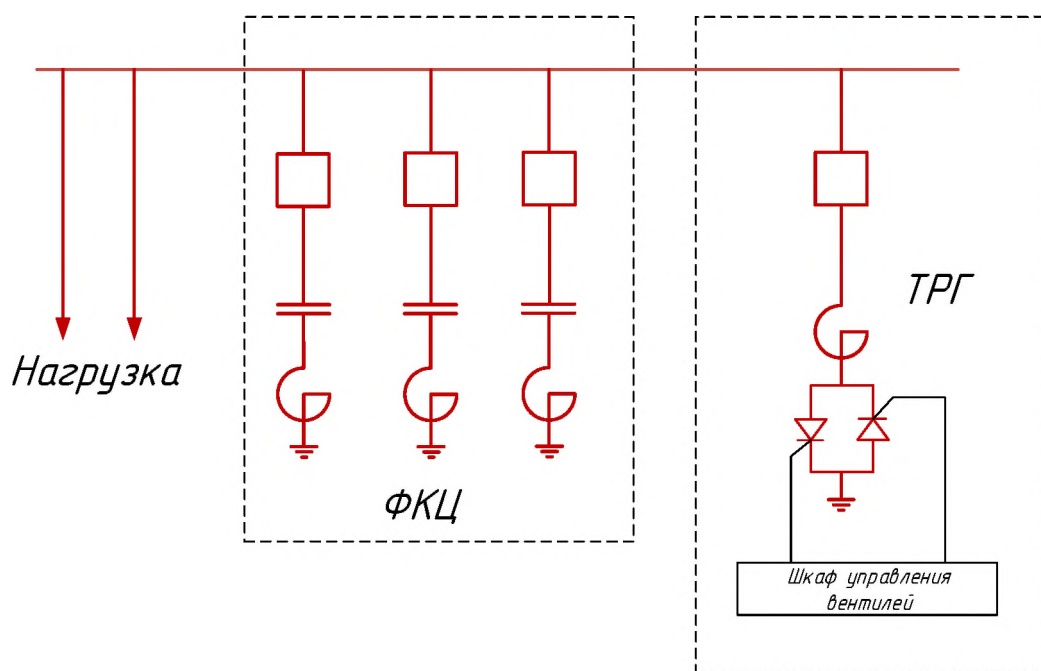


Рисунок 26 – Структурная схема СТК

Фильтрокомпенсирующие цепи являются источником реактивной мощности. Параллельно ФКЦ, подключаются три фазы управляемых тиристорами реакторов, соединенные в треугольник, являющихся плавно регулируемым потребителем реактивной мощности. Угол зажигания тиристоров ТРГ может быстро изменяться таким образом, чтобы ток в реакторе отслеживал ток нагрузки или реактивную мощность в энергосистеме. Тиристорный преобразователь является основным элементов СТК, регулирующим ток компенсирующих реакторов и, соответственно, реактивную мощность СТК.

В связи с необходимостью уменьшать несимметрию токов, каждая фаза ТРГ имеет свой канал регулирования, содержащий быстрый контур по реактивной мощности нагрузки и медленный по основному контролируемому параметру. Этим параметром может быть:

- реактивная мощность, потребляемая из энергосистемы;
- коэффициент мощности;
- среднее напряжение на шинах нагрузки [52].

Главным достоинством статического компенсатора является быстрое и плавное изменение реактивной составляющей цепи. При его применении можно регулировать коэффициент мощности $\cos\varphi$ в заданных пределах в автоматическом режиме.

СТАТКОМ – статический компенсатор реактивной мощности, выполненный на основе полностью управляемых полупроводниковых приборах, так называемых биполярных транзисторах с изолированным затвором – Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), по схеме преобразователя напряжения.

СТАТОМ обеспечивает плавную динамическую компенсацию реактивной мощности, что позволяет более эффективно сглаживать колебания напряжения и уменьшить значение дозы фликера.

Компенсатор СТАТКОМ позволяет производить полностью независимое регулирование по разным фазам и реализует обмен энергией между фазами. Это позволяет вводить и регулировать токи обратной последовательности и применять в расчетах алгоритм Штейменца. В результате возможно построить управление таким образом, чтобы выровнять неравномерную по фазам нагрузку.

Также, благодаря высокой частоте переключения приборов, СТАТКОМ может осуществлять активную фильтрацию гармонических токов нагрузки.

Возможные эффекты от внедрения устройства СТАТКОМ в сеть с тяговой нагрузкой: компенсация реактивной мощности, уменьшение колебаний напряжения, снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений.

Примем к установке на ПС Сквородино фильтросимметрирующее устройство, поскольку данное устройство позволяет решать сразу две задачи: снижает несимметрию напряжений и улучшает форму кривой напряжения.

3.3 Расчет фильтросимметрирующего устройства

Расчет фильтросимметрирующего устройства произведен с помощью методики изложенной в [61].

На рисунке 27 приведена схема ФСУ устанавливаемого на ПС Сквородино.

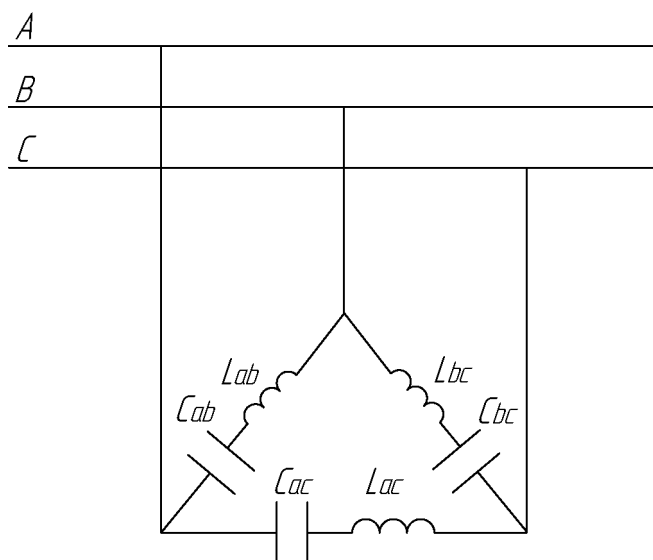


Рисунок 27 – Схема ФСУ

Мощность конденсаторов, включаемых на линейное напряжение должна удовлетворять условию:

$$Q_{БК}^{AB(BC)} > 1,2 \cdot U_{номБК} \cdot I_{n\Sigma}^{AB(BC)} \quad (30)$$

где $I_{n\Sigma}^{AB(BC)}$ – действующее значение тока ВГ, протекающего через фильтрующую цепь, настроенную на частоту n_p -той гармоники.

Мощность БК для симметрирования напряжения:

$$Q_{AC} = 7,31 \text{ МВар}$$

$$Q_{BC} = 5,96 \text{ МВар}$$

Ток $I_{n\Sigma}^{AB(BC)}$ определяется по формуле:

$$I_{n\Sigma}^{AB(BC)} = \sqrt{\sum_{n=2}^m (I_{nq} \cdot \sigma_{nq^*}^{AB(BC)})^2} \quad (31)$$

где I_{nq} – ток n_q -той гармоники источника нелинейной нагрузки;

$\sigma_{nq^*}^{AB(BC)}$ – доля тока I_{nq} , проходящего через плечо фильтра ФСУ, включенного на напряжение $U_{AB(BC)}$.

Коэффициенты $\sigma_{nq^*}^{AB(BC)}$ при включении фильтра на U_{AB} и U_{BC} будут равны:

$$\sigma_{nq^*}^{AB} = \frac{\sqrt{1 + \rho_{BC} + \rho_{BC}^2}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}} \quad (32)$$

$$\sigma_{nq^*}^{BC} = \frac{\sqrt{1 + \rho_{AB} + \rho_{AB}^2}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}} \quad (33)$$

$$\text{где } \rho_{(AB)BC} = \frac{1}{1 + \frac{3 \cdot k_{pAB(BC)} \cdot n_{pAB(BC)}^2}{1 - n_{q^*AB(BC)}^2}} \quad (34)$$

$$\text{где } k_{pAB(BC)} = \frac{Q_{BK}^{AB(BC)}}{S_K} \quad (35)$$

$n_{pAB(BC)}$ – номер ВГ, на частоту которой настроено плечо ФСУ;

S_K – мощность КЗ на шинах ФСУ;

$n_{q^*AB(BC)}$ – относительная доля n -той гармоники, протекающей через плечо ФСУ.

$$n_{q^*AB(BC)} = \frac{n_q}{n_{pAB(BC)}} \quad (36)$$

Суммарная мощность БК ФСУ не должна превышать требуемой реактивной мощности $Q_{\text{треб}}$ для узла сети [61].

Эффективность ФСУ по снижению напряжения ВГ определяется по относительным значениям ВГ напряжения после установки ФСУ по отношению к их значению до установки ФСУ:

$$U_{n^{*}AB} = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho_{AB} \cdot \sqrt{3 \cdot (1 + \rho_{BC} + \rho_{BC}^2)}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}}; \quad (37)$$

$$U_{n^{*}BC} = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho_{BC} \cdot \sqrt{3 \cdot (1 + \rho_{AB} + \rho_{AB}^2)}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}}; \quad (38)$$

$$U_{n^{*}AC} = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho_{BC} \cdot \sqrt{3 \cdot (\rho_{AB}^2 + \rho_{BC}^2 + \rho_{BC} \cdot \rho_{AB})}}{1 + \rho_{AB} + \rho_{BC}}. \quad (39)$$

Подробный расчет ФСУ произведён в программе MathCad и представлен в Приложении В.

3.4 Расчет и анализ показателей качества электрической энергии после установки ФСУ

Произведем расчет показателей качества электрической энергии после установки фильтрокомпенсирующего устройства.

ФСУ моделируется емкостным и индуктивным сопротивлением и подключается параллельно на шины 220 кВ ПС Сковородино. На рисунке 28 приведена схема замещения для расчета ПКЭ после установки ФСУ на участке электрической сети ПС Сковородино – ПС Сковородино/т. Подробный расчет приведен в Приложении Г.

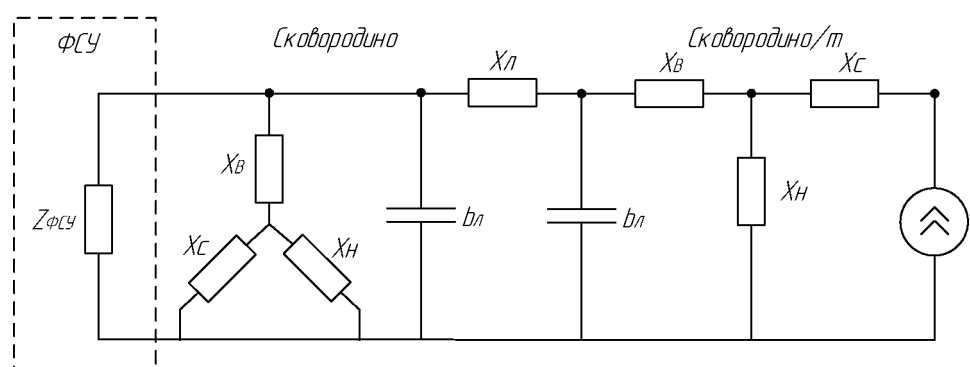


Рисунок 28 – Схема замещения для расчет ПКЭ на участке электрической сети ПС Сковородино – ПС Сковородино/т

Производится эквивалентирование схемы замещения к источнику ВГ.

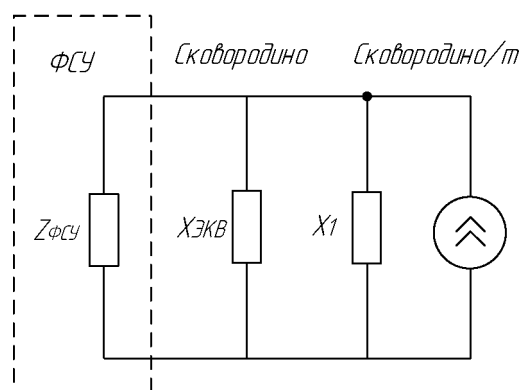


Рисунок 29 – Эквивалентная схема замещения

Эквивалентное сопротивление в этом случае находится по формуле:

$$X_{ЭКВФСУ} = \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} \quad (40)$$

Расчет аналогичен расчету ПКЭ без ФСУ.

В таблице 23 сведены напряжения и токи ВГ.

Таблица 23 – Токи и напряжения ВГ после установки ФСУ

Номер гармоники	Напряжение, кВ	Ток, кА
3	2,231	$4,964 \times 10^{-3}$
5	0,603	$1,341 \times 10^{-3}$
7	0,379	$8,427 \times 10^{-4}$

После нахождения токов ВГ рассчитаем суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U, \%$ и коэффициенты напряжения гармонических составляющих $K_{Un}, \%$. Сравним данные значения с нормируемыми значениями, приведенными в ГОСТ 32144-2013.

Таблица 24 – Сравнение расчетных и нормируемых значений ПКЭ

ПКЭ		Расчетное значение, %	Нормируемое значение, %
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U, \%$		1,064	3,0
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}, \%$	3	1,014	1,5
	5	0,274	1,5
	7	0,172	1

Аналогичным образом производится пересчет коэффициента несимметрии по обратной последовательности. Подробный расчет приведен в Приложении Г.

Таблица 25 – Сравнение расчетных и нормируемых значений ПКЭ

ПКЭ	Расчетное значение, %	Нормируемое значение, %
Коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %	1,45	2,0

После установки ФСУ на ПС Сковородино, ПКЭ характеризующие несинусоидальность и несимметрию напряжений находятся в допустимых пределах.

4 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрооборудование, используемое в электрических сетях и электроприемники, предназначены для работы в условиях симметрии напряжений и синусоидальной формы кривой. Снижение значений коэффициентов ПКЭ до нуля не всегда возможно и целесообразно, важно, чтобы эти показатели удовлетворяли требования действующего стандарта. При отклонении ПКЭ от ГОСТ-32144-2013, нормальная работа электрооборудования либо вообще невозможна, либо может быть обеспечена только при значительном снижении нагрузки.

Неудовлетворительное качество электрической энергии влечет за собой: увеличение потерь активной мощности и электроэнергии, сокращение срока службы электрооборудования, увеличение потребления реактивной мощности, нарушение нормального хода технологических процессов. Последнее сопровождается снижением количества и качества выпускаемой продукции. А поскольку ПС Сквородино питает НПС-21 и «Березитовый рудник» данный пункт является весьма актуальным.

В данном разделе произведем количественную оценку ущерба, обусловленного низким качеством электрической энергии, на примере потерь активной мощности в силовом трансформаторе от несимметрии и несинусоидальности напряжений.

4.1. Расчет потерь в силовом трансформаторе

Работа электрической сети в несимметричных и несинусоидальных режимах приводит к увеличению потерь в элементах СТ. Дополнительные потери активной мощности в силовых трансформаторах вызваны протеканием в них токов обратной последовательности и токов ВГ.

Методика оценки потерь в СТ от несимметрии напряжений выполнено по методике из [73].

Рассмотрим работу силового трехфазного трансформатора в несимметричном режиме.

Потери в трансформаторе, работающем в симметричном режиме:

$$\Delta P_T = \Delta P_{XX} + \beta \Delta P_{K3} \quad (41)$$

где ΔP_{XX} – потери холостого хода,

ΔP_{K3} – потери короткого замыкания,

β – коэффициент нагрузки.

В нормальном симметричном режиме потери холостого хода находятся по формуле:

$$\Delta P_{XX} = 3 \cdot U_H \cdot I_{XX} \cdot \cos \varphi_{XX} \quad (42)$$

где I_{XX} – номинальный ток холостого хода,

$\cos \varphi_{XX}$ – коэффициент мощности холостого хода.

Потери холостого хода при питании напряжением обратной последовательности можно определить по формуле:

$$\Delta P_{XX2} = 3 \cdot U_2 \cdot I_{XX2} \cdot \cos \varphi_{XX} \quad (43)$$

где I_{XX2} – ток холостого хода, соответствующий U_2 .

Учитывая, что номинальный ток холостого хода равен:

$$I_{XX} = \frac{U_H}{Z_{XX}}, \quad (44)$$

$$I_{XX2} = \frac{U_2}{Z_{XX}}. \quad (45)$$

где Z_{XX} – сопротивление холостого хода.

Потери холостого хода, обусловленные несимметрией напряжений можно найти по формуле:

$$\Delta P_{XX2} = \varepsilon_u^2 \cdot \Delta P_{XX} = \frac{U_2^2}{U_H^2} \cdot \Delta P_{XX} \quad (46)$$

Потери короткого замыкания трансформатора в симметричном номинальном режиме определяются по выражению:

$$\Delta P_{K3} = 3 \cdot I_{K3}^2 \cdot r_{K3} \quad (47)$$

где I_{K3} – ток короткого замыкания,

r_{K3} – активное сопротивление короткого замыкания.

Рассуждая аналогично, на основании равенств:

$$U_{K3} = I_{K3} \cdot Z_{K3}, \quad (48)$$

$$U_2 = I_2 \cdot Z_{K3}. \quad (49)$$

Потери короткого замыкания при питании напряжением обратной последовательности можно определить по формуле:

$$\Delta P_{K32} = \frac{\varepsilon_u^2}{u_{K3}^2} \cdot \Delta P_{K3}, \quad (49)$$

где u_{K3}^2 – напряжение короткого замыкания.

Таким образом, дополнительные потери в трансформаторах от несимметрии напряжений можно определить по следующей формуле:

$$\Delta P_2 = \varepsilon_u^2 \cdot \left(\Delta P_{XX} + \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \right), \quad (50)$$

Рассчитаем потери от несимметрии напряжений в АТ на ПС Сковородино.

Исходные данные:

$$\Delta P_{XX} = 45 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{K3} = 215 \text{ кВт},$$

$$U_2 = 7,487 \text{ кВ}.$$

$$\Delta P_2 = \frac{7,49^2}{220^2} \cdot \left(45 + \frac{215}{27,28^2}\right) = 52,2 \text{ кВт}$$

За год потери от несимметрии напряжения в денежном эквиваленте составят:

$$2 \cdot \Delta P_2 \cdot 8760 \cdot C = 52,2 \cdot 8760 \cdot 1,690 = 1546000 \text{ руб.} \quad (51)$$

где C – стоимость $1 \text{ кВт} \cdot \text{час} = 1,69 \text{ рублей}$

Далее рассмотрим потери в СТ от токов ВГ.

Дополнительные потери ХХ в трансформаторах от протекания токов ВГ можно также определить по выражению [73]:

$$\Delta P_{XXv} = \Delta P_{XX} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2, \quad (52)$$

Дополнительные потери ХХ в трансформаторах от протекания токов ВГ можно также определить по выражению [73]:

$$\Delta P_{K3v} = 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{K3}}{u_{K3}^2} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}, \quad (53)$$

Кроме основных потерь в трансформаторах имеют место быть добавочные потери, обусловленные вихревыми токами. В нормальных несинусоидальных режимах эти потери малы и составляют в среднем 5 % номинальных потерь КЗ. Однако при протекании токов ВГ добавочные потери резко возрастают и могут достигать 30 – 50 %.

Добавочные потери в трансформаторах возрастают пропорционально квадрату номера гармоники:

$$\Delta P_{ДОВv} = v^2 \cdot \Delta P_{ДОВ1}, \quad (54)$$

где $\Delta P_{ДОВ1}$ – добавочные потери на основной частоте.

Добавочные потери на основной частоте v -той гармоники находим по формуле:

$$\Delta P_{\text{ДОВ}} = v^2 \cdot 0,05 \cdot \Delta P_{\text{КЗ}}, \quad (55)$$

Таким образом, на основании выше представленных выражений, суммарные дополнительные потери, обусловленные несинусоидальным режимом работы трансформатора определяются по выражению [73]:

$$\Delta P_{\text{XXV}} = \Delta P_{\text{XX}} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} U_v^2 + 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{\text{КЗ}}}{u_{\text{КЗ}}^2} \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1+0,05 \cdot v^2}{v\sqrt{v}} \cdot U_v^2, \quad (56)$$

Рассчитаем потери от несимметрии напряжений в АТ на ПС Сковородино.

Исходные данные:

$$U_3 = 8,853 \text{ кВ}$$

$$U_5 = 8,89 \text{ кВ}$$

$$U_7 = 8,902 \text{ кВ}$$

По формуле (56) найдем потери в АТ ПС Сковородино:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{XXV}} = & 45 \cdot (8,853^2 + 8,89^2 + 8,902^2) + 0,607 \cdot \frac{215}{27,28^2} \cdot \left(\left(\frac{1+0,05 \cdot 3^2}{3\sqrt{3}} \cdot 8,853^2 \right) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{1+0,05 \cdot 5^2}{5\sqrt{5}} \cdot 8,89^2 \right) + \left(\frac{1+0,05 \cdot 7^2}{7\sqrt{7}} \cdot 8,902^2 \right) \right) = 37,66 \text{ кВт} \end{aligned}$$

За год потери от несинусоидальности напряжения в денежном эквиваленте составят:

$$2 \cdot \Delta P_2 \cdot 8760 \cdot C = 37,66 \cdot 8760 \cdot 1,690 = 1115000 \text{ руб.} \quad (57)$$

Таблица 26 – Потери от низкого КЭЭ в АТ на ПС Сковородино

Потери	Стоимость потерь, тыс. руб.
Потери от несимметрии напряжений	1546
Потери от несимметрии напряжений	1115
Итого:	2,661

Помимо силовых трансформаторов токи от ВГ вызывают дополнительные потери и в других элементах электрической сети. Также стоит отметить, что токи ВГ приводят к преждевременному старению изоляции, это

происходит в результате повышенного нагрева, а также необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей ВГ [16].

4.2 Оценка стоимости установки ФСУ

Рассчитаем капиталовложения на установку ФСУ. Произведем расчет по укрупненным показателям стоимости приведенном в [70].

$$K_{\text{ФСУ}} = 37000 \text{ тыс.руб.}$$

Издержки на амортизацию, ремонт и эксплуатацию найдем по следующей формуле:

$$I = I_{\text{АМ}} + I_{\text{ЭР}} \quad (58)$$

где $I_{\text{АМ}}$ – амортизационные отчисления на реновацию,

$I_{\text{ЭР}}$ – издержки на ремонт и эксплуатацию.

Амортизационные отчисления на реновацию рассчитываются по формуле:

$$I_{\text{АМ}} = \frac{K_{\text{ФСУ}}}{T_{\text{сл}}} \quad (59)$$

где $T_{\text{сл}}$ – срок службы соответствующего оборудования.

$$I_{\text{АМ}} = \frac{37000}{25} = 1480 \text{ тыс.руб}$$

Издержки на ремонт и эксплуатацию рассчитываются по следующей формуле:

$$I_{\text{ЭР}} = \alpha_{\text{Экспл}} \cdot K_{\text{ФСУ}} + \alpha_{\text{Рем}} \cdot K_{\text{ФСУ}} \quad (60)$$

где $\alpha_{\text{Экспл}}$ – ежегодные издержки на обслуживание элементов электрической сети, в % от капитальных затрат. Для 220 кВ $\alpha_{\text{Экспл}} = 0,02$.

$\alpha_{\text{Рем}}$ – ежегодные издержки на ремонты элементов электрической сети, в % от капитальных затрат. Для 220 кВ $\alpha_{\text{Рем}} = 0,029$.

$$I_{\text{ЭР}} = 0,02 \cdot 37000 + 0,029 \cdot 37000 = 1813 \text{ тыс.руб}$$

Суммарные издержки:

$$I = 1480 + 1813 = 3293 \text{ тыс.руб.}$$

Приведенные затраты определяются по формуле:

$$Z = E \cdot K + I \quad (61)$$

где E – норматив дисконтирования, равный 1.

$$Z = 0,1 \cdot 37000 + 3293 = 6993 \text{ тыс.руб.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первоначально в работе был произведен структурный анализ электрической сети, который позволил выбрать участок для подробного изучения. Был выбран участок электрической сети вблизи ПС Сковородино, включающий в себя тяговые ПС, поскольку тяга переменного тока является крупным потребителем, искажающим качество электрической энергии. Также в первом разделе данной работы был произведен расчет нормального и послеаварийного режима, который позволил оценить такой показатель качества электрической энергии, как установившееся отклонение напряжения.

Проанализированы основные особенности электроснабжения железнодорожного транспорта, а также выявлены причины негативного влияния тяги переменного тока на качество электрической энергии.

Расчет ПКЭ на ПС Сковородино указал на необходимость проведения мероприятий по улучшения ПКЭ. Произведен анализ возможных способов повышения качества электроэнергии. Выбран наиболее оптимальный вариант – фильтросимметрирующее устройство, поскольку данное устройство способно одновременно симметрировать напряжения и осуществлять фильтрацию токов высших гармоник.

Произведена оценка экономической эффективности от установки фильтросимметрирующего устройства на ПС Сковородино.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Ананичева, С.С. Справочные материалы для курсового и дипломно-го проектирования : Методическое пособие / А.Л. Мызин, С.Н. Шелюг. - Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 2005. - 52 с.
- 2 Аррилага Д., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
- 3 Бей, Ю.М. Тяговые подстанции / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. – М. : Транспорт, 1986.
- 4 Бородулин, Б.М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М. : Транспорт, 1983. – 183 с.
- 5 Бородулин, Б.М. Система тягового электроснабжения 2х25 кВ. – М. : Транспорт, 1985. – 46 с.
- 6 Бородулин, Б.М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока // Вестник / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т. ж-д. тр-ра. – 2003. – №2. – 17-24 с.
- 7 Бутаенко А.В. Располагаемая реактивная мощность синхронных двигателей при несимметрии и несинусоидальности питающего напряжения. Промышленная энергетика, 1983, № 5, с.25-27.
- 8 Вагин Г.Я., Иванов В.Б., Смигиринов С.А. Влияние высших гармоник тока и напряжения на погрешность электросчетчиков. Промышленная энергетика, 1976, 4, с. 29-32.
- 9 Висящев А.Н. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах. – Иркутск, 1997. – 279 с.
- 10 Гаврилов, Ф.А. Качество электрической энергии. – Мариуполь: Приазовский ГТУ, 2007. – 96 с.
- 11 Григорьев, А.С. Частичная компенсация токов обратной последовательности в трехфазных цепях с несимметричными нагрузками: Автореф. дис. . канд. техн. наук. Киев, 1982. - 22 с.

12 ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

13 Дубровский, З.М. Грузовые электровозы переменного тока / З.М. Дубровский, В.И. Попов, Б.А. Тушканов. – Справочник. М. : Транспорт, 1998.

14 Ершов, А.М. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий / А.М. Ершов, О.А. Петров. – Челябинск: ЧПИ, 1989. - Ч.2. – 49 с.

15 Иванов, В.С., Режимы потребления и качество энергетических систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И. Соколов- М.: Энергоатомиздат, 1987.

16 Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

17 Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко. – К. : Техника, 1981. – 160 с.

18 Жежеленко, И.В. Повышение эффективности и качества электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко, Н.В. Савина, Ю.Л. Саенко – К. : РДЭНТП. – 24 с.

19 Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

20 Железко Ю.С. Качество электроэнергии в сетях и электромагнитная совместимость электрооборудования // Электротехника. - 1989. - №7. – 77 с.

21 Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 224 с.

22 Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М. : ЭНАС, 2009. — 456 с. : ил.

23 Железко Ю.С. Расчет и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко и др. – М. ЭНАС, 2008. – 280 с.

24 Железнодорожный транспорт [Электронный ресурс] URL: <http://railway-transport.ru/news/> (Дата обращения: 02.04.2018)

25 Журнал «ЭЛЕКТРО» 3/2007 [Электронный ресурс] URL: <http://www.elektro-journal.ru>

26 Качество электроэнергии в электрических сетях и способы его обеспечения / под ред. В.Г. Федченко. – М.: Изд-во МЭИ, 1992. – 102 с.

27 Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 120 с.

28 Карякин, Р.П. Тяговые сети переменного тока. – М.: Транспорт, 1983. – 279 с.

29 Копытин, И.И. Методика расчета показателей качества электрической энергии : Методические указания к выполнению практических занятий и контрольных работ для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140211 / И.И. Копытин. – Курган: Курганский государственный университет, 2009. – 34 с.

30 Кочкин, В.И. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / В.И.Кочкин, О.П. Нечаев. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000

31 Кудрин, Б.И. Основы электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 2003.

32 Кузнецов, В.Г. Метод определения областей применения схем симметрирующих устройств. Электричество, 1983, № 6, 189 с.

33 Кузнецов, В.Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками. Электричество, 1983, № 2, 135 с.

34 Кузнецов, В.Г. Оценка экономического ущерба от несимметрии и несинусоидальности напряжений в промышленных системах электроснабжения / В.Г. Кузнецов, В.Г. Николаенко. – М. : Техн. электродинамика, 1980. – 89 с.

- 35 Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электрических сетях. – Братск: БрГТУ, 1999. – 220 с.
- 36 Макашева, С.И. Мониторинг качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока / С.И. Макашева. монограф. – Хабаровск. – Издательство ДВГУПС, 2008. – 104 с.
- 37 Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – Учебник для высших учебных заведений ж.д. транспорта – М.: Транспорт, 1982. – 524 с.
- 38 Марквардт К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. – Том 1, М.: Транспорт, 1980. — 256 с.
- 39 Марквардт К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. – Том 2, М.: Транспорт, 1981. — 392 с.
- 40 Мамошин Р.Р. Повышение качества электроэнергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
- 41 Матянин, А.М. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях современными компенсирующими устройствами: дис. канд.тех.наук : А.М. Матянин, НТЦ ФСК ЕЭС. – М. : – 2016. – 134 с.
- 42 Мамошин, Р.Р. Трансформаторы тяговых подстанций с новым симметрирующим эффектом // Вестник / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т. ж.-д. тр-ра. – 2003. – №2. – 22-24 с.
- 43 Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии: РД 153-34.0-15.501-00. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 34 с.
- 44 Милях, А.Н. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А.Н. Милях, А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев: Наукова Думка, 1973. - 219 с.
- 45 Мустафа, Г.М. Модульные многоуровневые преобразователи для симметрирования и фильтрации сетевого напряжения в окрестности тяговой подстанции переменного тока / Г.М. Мустафа, С.И. Гусев, А.А. Ершов, И.Б. Луганская. – Вестник НТУ, 2015. – 6 с.

46 Мустафа, Г.М. Расчет мощности активного филтросимметрирующего устройства для нормализации напряжения на шинах ПС 220 кВ Сково-родино / Г.М. Мустафа, С.И. Гусев, А.М. Ершов, И.Б. Луганская – Электрические станции. – 2005. - №3. - С. 46-53.

47 Нерюнгринская ГРЭС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rosteplo.ru/> (дата обращения: 20.05.2018).

48 Новости Электротехники [Электронный ресурс]. URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2005/31/05.php> (дата обращения: 20.04.2018).

49 Овчаренко А.С. Повышение эффективности электроснабжения промышленных предприятий / А.С. Овчаренко, Д.И. Розинский. - Киев: Техника, 1989. - 287 с.

50 Официальный сайт RastrWin [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rastrwin.ru>. (дата обращения: 5.03.2018).

51 Официальный сайт РусГидро [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rushydro.ru/> (дата обращения: 15.03.2018).

52 Официальный сайт АО «НТЦ ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ntc-power.ru/> (дата обращения: 18.04.2018).

53 Официальный сайт АО «Нидек АСИ ВЭИ» [Электронный ресурс]. URL: <http://nidec-asi-vei.ru> (дата обращения: 18.04.2018).

54 Официальный сайт АВВ [Электронный ресурс]. URL: <https://new.abb.com/> (дата обращения: 19.04.2018).

55 Приказ от 23 июня 2015 г. № 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии»

56 Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. – М. : Транспорт, 1983. – 496 с.

57 Ратнер М.П., Могилевский Е.Л. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.

58 Рогозина Д. А., Хворова Т. С. Специальные фильтрокомпенсирующие устройства как метод борьбы с несинусоидальностью напряжения // Молодой ученый. – 2016. – №24. – С. 108-111.

59 Руди, Д.Ю. Исследование снижения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности с помощью симметрирующего устройства трансформаторного типа / Д.Ю. Руди, А.И. Антонов, А.А. Руппель, Е.Ю. Руппель. Омск : – Омский научный вестник №5, 2017. – 4 с.

60 Руди, Д.Ю. Негативное влияние несимметрии и методы их устранения в системе электроснабжения / Д.Ю. Руди, Н.А. Ткачук. – М. : Теория и практика современной науки: сб. науч. практ. конф., 2017. – 91 с.

61 Савина Н.В. Качество электроэнергии: учебное пособие / Н.В. Савина. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. –182 с.

62 Сидоров, П.И. Как устроен и работает электровоз. – М. : Транс-порт, 1988. – 223 с.

63 Сидоров, С.А. Регулируемое симметрирующее устройство с индуктивным накопительным элементом: дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2015. – 143 с.

64 Суднова В.В. Качество электрической энергии [Текст] / В.В. Суднова – М.: Энергосервис, 2000. – 86 с.

65 Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 237 с.

66 Тер-Оганов, Э.В. Электроснабжение железных дорог: учебник для студентов университета / Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. – Екатеринбург : Издательство УрГУПС , 2014. – 432 с.

67 Трофимов Г.Г. Качество электроэнергии и его влияние на работу промышленных предприятий. – Алма-Ата: Каз НИИНТИ, 1986. – 75 с.

68 Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий // Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 352 с.

69 Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова. – М.: Изд-во МЭИ, 2006.– 320 с.

70 Файбисович, Д. Л. Справочник по проектированию электрических сетей / Д. Л. Файбисович. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.

71 Шванева, Е.А. Характеристика современных технических устройств для повышения качества электрической энергии в сетях с тяговой нагрузкой / Е.А. Шванева // Российская национальная научная конференция «Современные проблемы науки». – 2017. – 146-148 с.

72 Шведов Г.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение / под ред. Железко Ю.С. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. -424 с.

73 Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях : моногр. / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 268 с.

74 Шидловский, А.К. Оптимизация несимметричных режимов систем электроснабжения / А.К Шидловский, В.Г. Кузнецов, В.Т. Николаенко – Киев: Наукова Думка, 1987. – 174 с.

75 Шидловский, А.К. Филтросимметрирующее устройство, А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов, И.В. Мостовяк. – Киев : Наукова Думка, 1980. – 78с.

76 Управление качеством электрической энергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с. : ил.

77 Яшков, В.А., Экономическая оценка последствий снижения качества электроэнергии / В.А.Яшков, А.А. Конарбаев, Г.К. Кабдешова // Пром энергетика. – 2005. – № 2. – с.115.

78 Rolf Grunbaum, Tomas Johansson. SVC Light – a powerful new tool for power quality improvement. ABB Review 6/98.

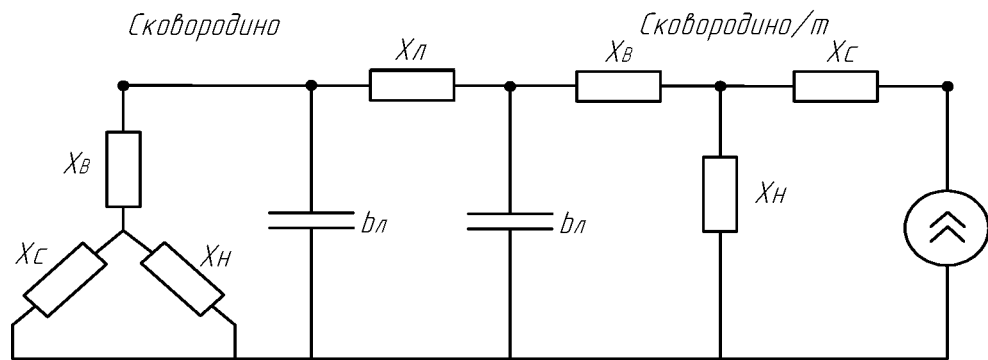
79 С.Р. Steinmetz. Theory and calculation of electric circuits. – New York, 1917. – 361 с.

80 Hirofumi Akagi. Активные фильтры гармоник. Proc.of the IEEE, 2005, 93, No 12, 2128-2141

ПРИЛОЖЕНИЕ А

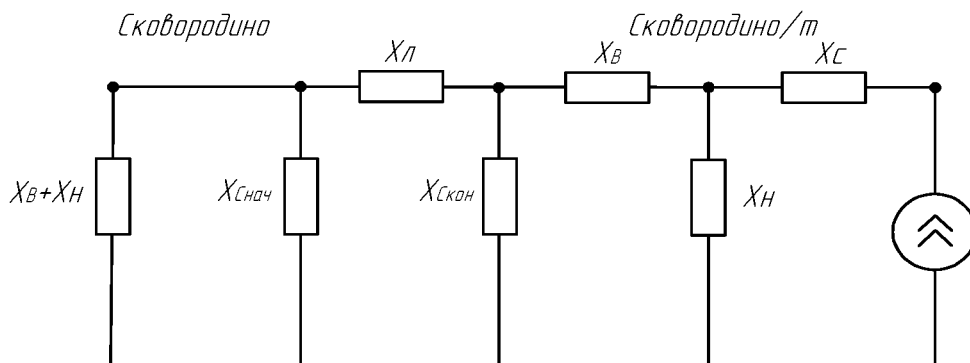
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$n := 3$$

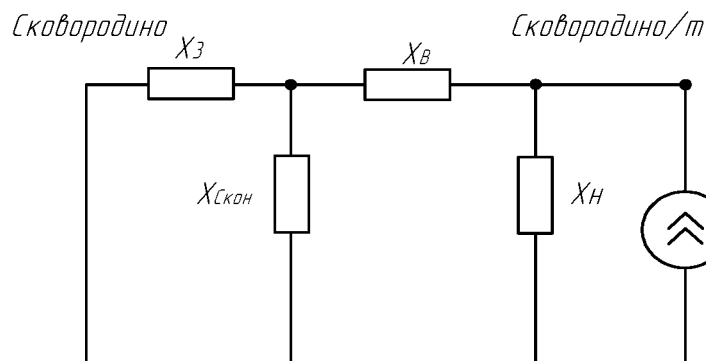


Сопротивления элементов схемы замещения, Ом:

$$\begin{aligned}
 X_{В\text{Сковород}} &:= \frac{104 \cdot n}{2} & X_{Л\text{СковородСковородТ}} &:= 1.137 \cdot n & X_{В\text{СковородТ}} &:= \frac{165 \cdot n}{2} \\
 X_{С\text{Сковород}} &:= 0 & b_{Л\text{СковородСковородТ}} &:= 28.05 & X_{С\text{СковородТ}} &:= 0 \\
 X_{Н\text{Сковород}} &:= \frac{195.6 \cdot n}{2} = 293.4 & & & X_{Н\text{СковородТ}} &:= \frac{125 \cdot n}{2} = 187.5
 \end{aligned}$$

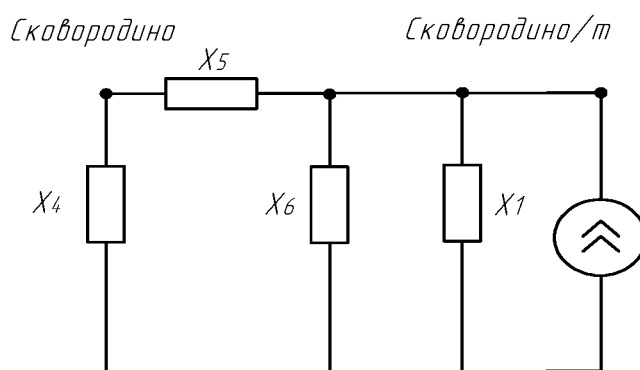


$$X_{С\text{СковородСковородТ}} := -\left(\frac{\frac{5.3}{2.645}}{4}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.167$$



$$X_3 := \frac{(X_{В\text{Сковород}} + X_{Н\text{Сковород}}) \cdot X_{С\text{СковородСковородТ}}}{(X_{В\text{Сковород}} + X_{Н\text{Сковород}}) + X_{С\text{СковородСковородТ}}} + X_{Л\text{СковородСковородТ}} = 3.244$$

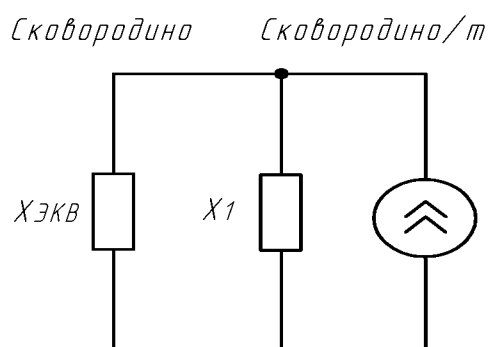
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X_4 := X_3 + x_{СССковородСковородГ} + \frac{(X_3 \cdot x_{СССковородСковородГ})}{x_{ВСковородГ}} = 3.075$$

$$X_5 := X_3 + x_{ВСковородГ} + \frac{(X_3 \cdot x_{ВСковородГ})}{x_{СССковородСковородГ}} = -4.557 \times 10^3$$

$$X_6 := x_{СССковородСковородГ} + x_{ВСковородГ} + \frac{(x_{СССковородСковородГ} \cdot x_{ВСковородГ})}{X_3} = 234.59$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 247.333$$

$$X_1 := x_{НСковородГ} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Сковородино/т $S_{СковородиноГ} := \sqrt{11^2 + 11.9^2} = 16.205 \text{ МВА}$

$$U_{НОМ} := 220 \text{ кВ}$$

$$I := \frac{S_{СковородиноГ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta} = 0.014 \text{ кА}$$

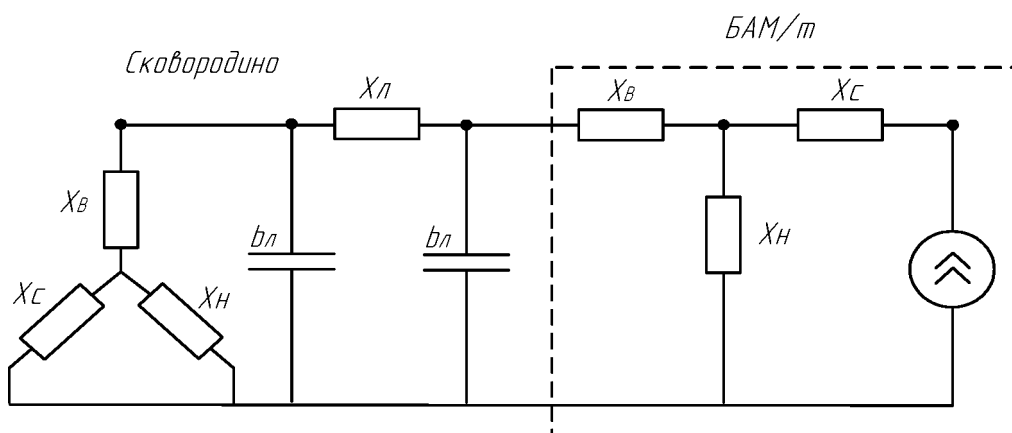
$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X_1} = 0.569$$

$$I_{1СковородиноГ} := K_1 \cdot I = 8.063 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1СковородиноГ} := I_{1СковородиноГ} \cdot X_1 = 1.512 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



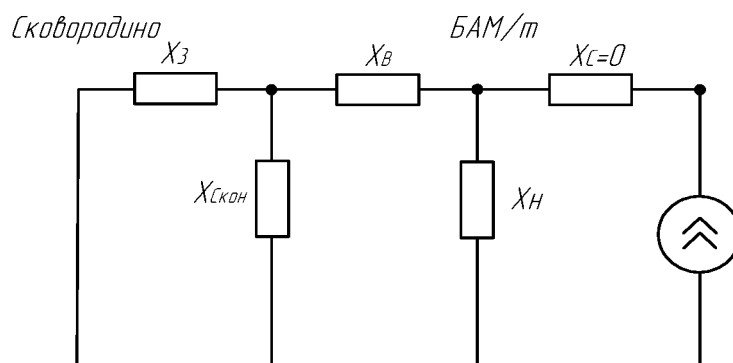
$$X_{ЛСковородБАМТ} := 11.094 \cdot n$$

$$X_{ВБамТ} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{ССковородБАМТ} := -\left(\frac{25.86}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.629$$

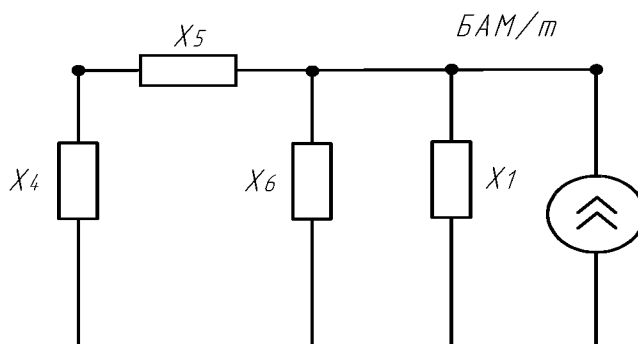
$$X_{СБамТ} := 0$$

$$X_{НБамТ} := \frac{125 \cdot n}{2} = 187.5$$



$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородБАМТ}} = -1.635$$

$$X_{3'} := X_2 + X_{ЛСковородБАМТ} = 31.647$$



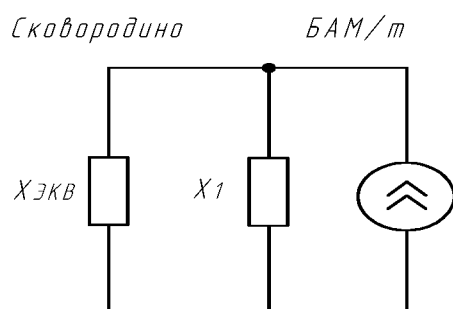
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{4'} := X_{3'} + x_{CC\text{сковородБАМТ}} + \frac{(X_{3'} \cdot x_{CC\text{сковородБАМТ}})}{x_{ВБамТ}} = 29.809$$

$$X_{5'} := X_{3'} + x_{ВC\text{сковородТ}} + \frac{(X_{3'} \cdot x_{ВБамТ})}{x_{CC\text{сковородБАМТ}}} = -4.528 \times 10^3$$

$$X_{6'} := x_{CC\text{сковородБАМТ}} + x_{ВC\text{сковородТ}} + \frac{(x_{CC\text{сковородБАМТ}} \cdot x_{ВБамТ})}{X_{3'}} = 233.127$$



$$X_{\text{ЭКВ}'} := \frac{(X_{4'} + X_{5'}) \cdot X_{6'}}{(X_{4'} + X_{5'}) + X_{6'}} = 245.871$$

$$X_{1'} := x_{НБамТ} = 187.5$$

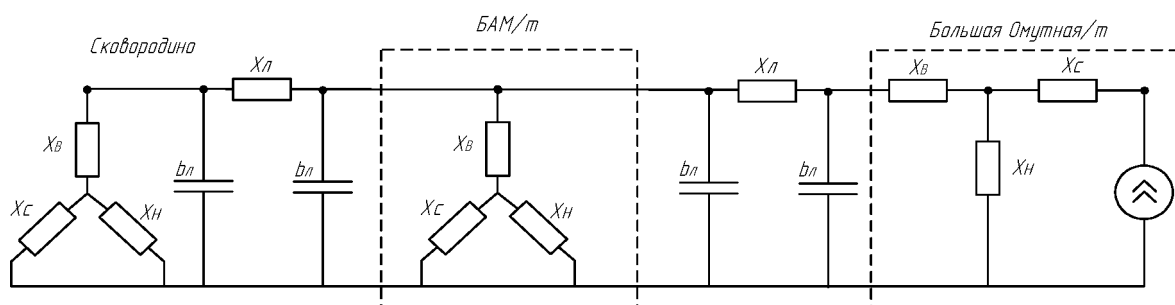
Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМТ}} := \sqrt{(16.6)^2 + 24^2} = 29.182 \text{ МВА}$

$$I' := \frac{S_{\text{БАМТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.026 \text{ кА}$$

$$K_{1'} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'}}{X_{\text{ЭКВ}'} + X_1} = 0.569$$

$$I_{1\text{БАМ}} := K_1 \cdot I = 8.063 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{БАМ}} := I_{1\text{БАМ}} \cdot X_1 = 1.512 \text{ кВ}$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

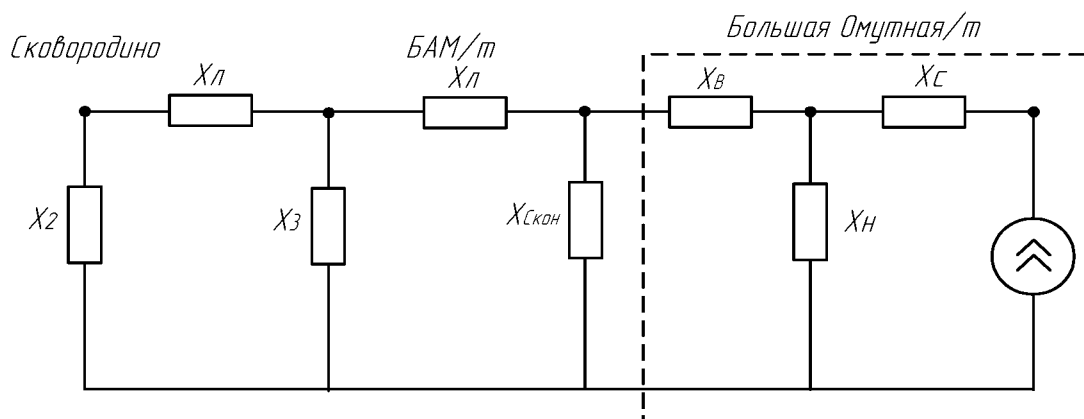
$$X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} := n \cdot 45.861$$

$$X_{ВБольшаяОмутнаяТ} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{СБольшаяОмутнаяТ} := 0$$

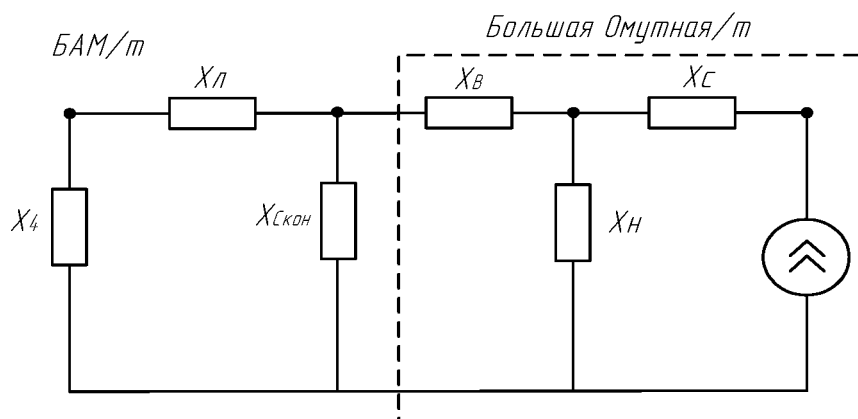
$$X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} := -\left(\frac{106.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -6.736$$

$$X_{БольшаяОмутнаяТ} := \frac{125 \cdot n}{2} = 187.5$$



$$X_{2''} := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородБАМТ}} = -1.635$$

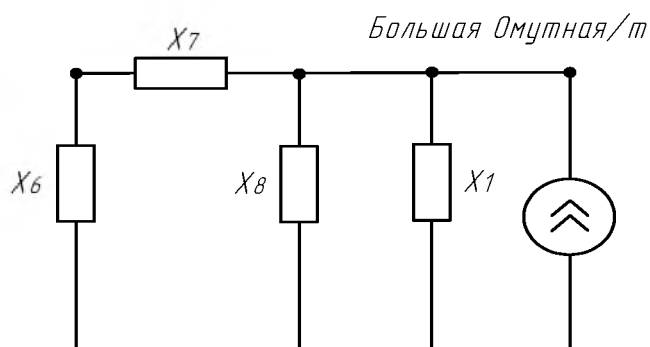
$$X_{3''} := \frac{\frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковородТ}) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{(X_{ВСковородТ} + X_{НСковородТ}) + X_{ССковородБАМТ}} \cdot X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}{\frac{(X_{ВСковородТ} + X_{НСковородТ}) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковородТ}) + X_{ССковородБАМТ}} + X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} = -1.5$$



$$X_{4''} := \frac{(X_{2''} + X_{ЛСковородБАМТ}) \cdot X_{3''}}{(X_{2''} + X_{ЛСковородБАМТ}) + X_{3''}} = -1.669$$

$$X_{5''} := X_{4''} + X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} = 135.914$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

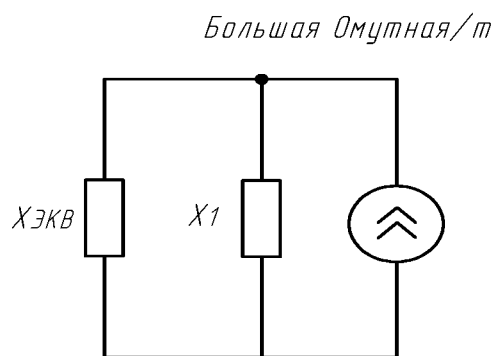


$$X_{6''} := X_{5''} + X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} + \frac{(X_{5''} \cdot X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ})}{X_{ВСковородТ}} = 125.479$$

$$X_{7''} := X_{5''} + X_{ВСковородТ} + \frac{(X_{5''} \cdot X_{ВСковородТ})}{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} = -4.61 \times 10^3$$

$$X_{8''} := X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} + X_{ВСковородТ} \dots = 228.498$$

$$+ \frac{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} \cdot X_{ВСковородТ}}{X_{5''}}$$



$$X_{ЭКВ''} := \frac{(X_{6''} + X_{7''}) \cdot X_{8''}}{(X_{6''} + X_{7''}) + X_{8''}} = 240.764$$

$$X_{1''} := X_{НСковородТ} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{БОмутнаяТ} := \sqrt{11.8^2 + (14.4)^2} = 18.617 \text{ МВА}$

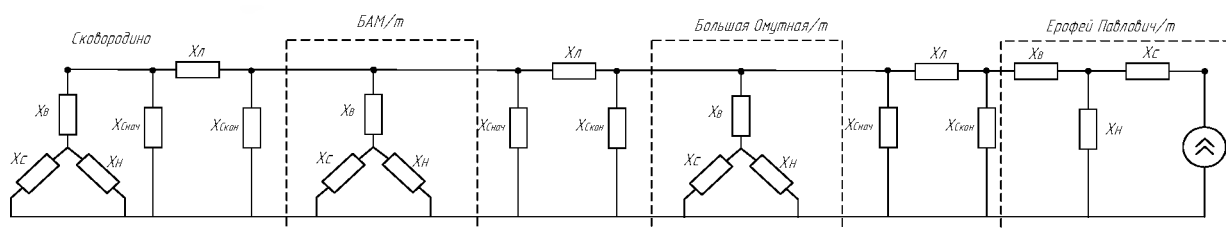
$$I := \frac{S_{БОмутнаяТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 0.01 \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_{1\omega} := \frac{X_{\text{ЭКВ}''}}{X_{\text{ЭКВ}''} + X_1''} = 0.562$$

$$I_{1\text{БольшаяОмутная}} := K_1 \cdot I = 9.156 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{БольшаяОмутная}} := I_{1\text{БольшаяОмутная}} \cdot X_1'' = 1.717 \text{ кВ}$$



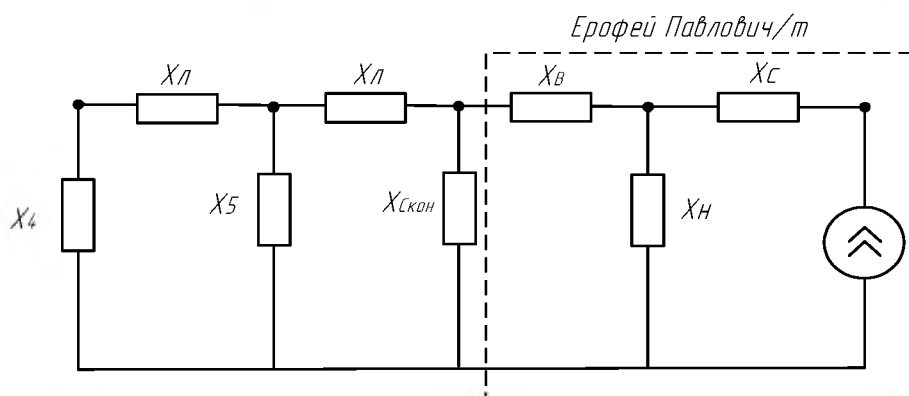
$$X_{\text{ВЕПавловичТ}} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} := 10.25 \cdot n$$

$$X_{\text{СЕПавловичТ}} := 0$$

$$X_{\text{НПавловичТ}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 187.5$$

$$X_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} := -\left(\frac{23.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.506$$

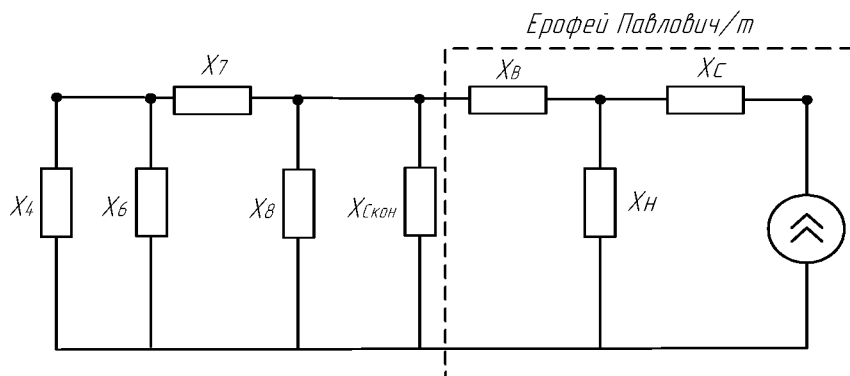


$$X_4 := X_4'' = -1.669$$

$$X_5 := \frac{\frac{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}}{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}} \cdot X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}}{\frac{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}}{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}} + X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = -3.414$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

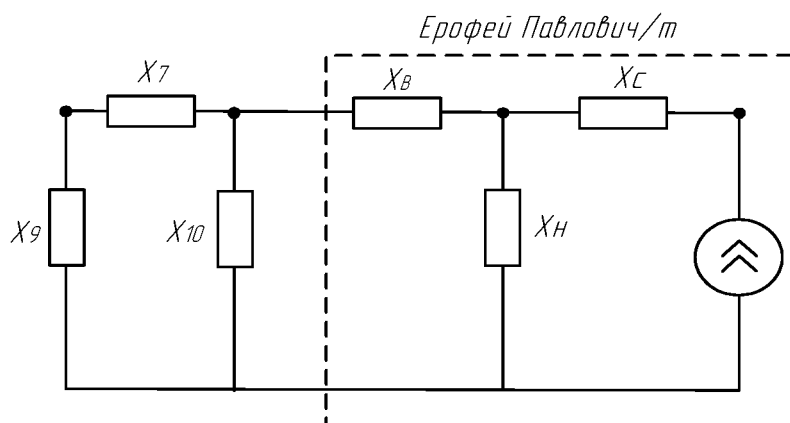


$$X6 := x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X5 + \frac{(x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X5)}{x_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = 118.891$$

$$X7 := x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + x_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} \dots = -1.071 \times 10^3$$

$$+ \frac{x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot x_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X5}$$

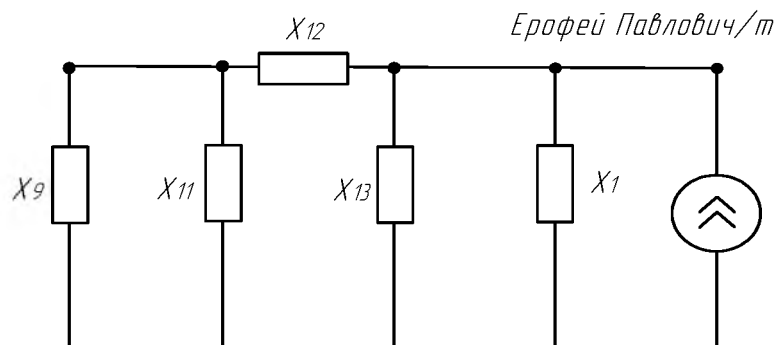
$$X8 := x_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} + X5 + \frac{(x_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} \cdot X5)}{x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = 26.572$$



$$X9 := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -1.693$$

$$X10 := \frac{X8 \cdot x_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X8 + x_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = -1.596$$

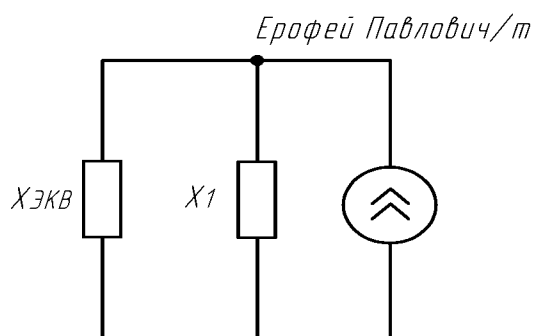
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X_{11} := X_7 + X_{10} + \frac{(X_7 + X_{10})}{X_8} = -1.113 \times 10^3$$

$$X_{12} := X_7 + X_8 + \frac{(X_7 + X_8)}{X_{10}} = -390.109$$

$$X_{13} := X_{10} + X_8 + \frac{(X_{10} + X_8)}{X_7} = 24.953$$



$$X_{14} := \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} = -1.69$$

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_{14} + X_{12}) \cdot X_{13}}{(X_{14} + X_{12}) + X_{13}} = 26.65$$

$$X_1 := X_{\text{НПавловичТ}} = 187.5$$

$$I_{\text{м}} := \frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.45 \text{ кА}^{-3} \quad S_{\text{ЕрофейПавловичТ}} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

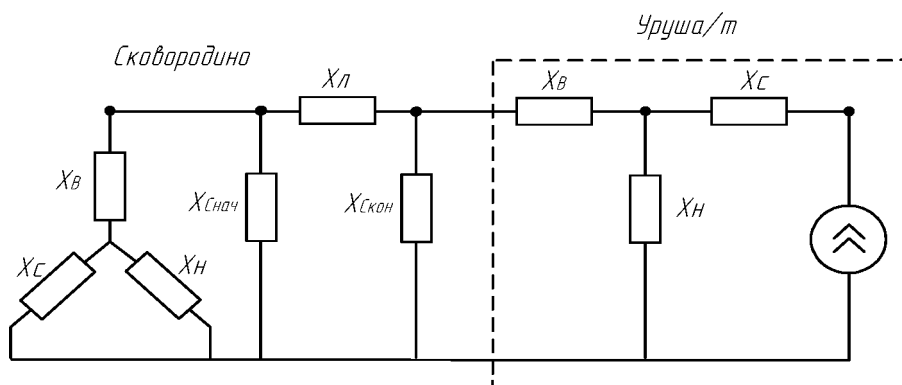
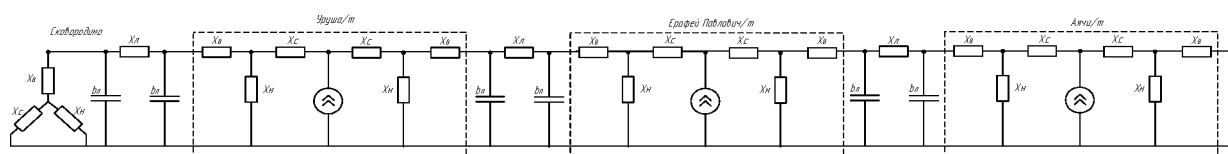
$$K_{\text{Л}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.124$$

$$I_{\text{ЕрофейПавлович}} := K_1 \cdot I = 4.293 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{ЕрофейПавлович}} := I_{\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_1 = 0.08 \text{ кВ}$$

Участок сети Сковородино - Уруша/т - Ерофей Павлович/т - Аячи/т

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



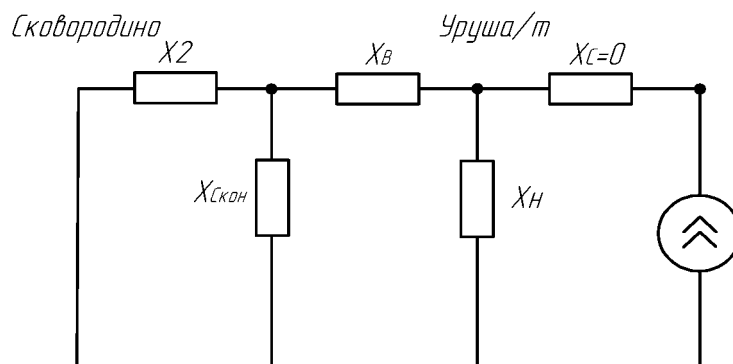
$$X_{ВУрушаТ} := \frac{165 \cdot \mathbf{n}}{2}$$

$$X_{ЛСковородУрушаТ} := \mathbf{n} \cdot 32.4$$

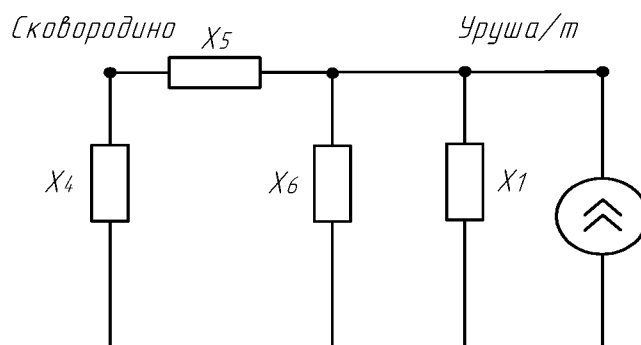
$$X_{СУрушаТ} := 0$$

$$X_{НУрушаТ} := \frac{125 \cdot \mathbf{n}}{2} = 187.5$$

$$X_{ССковородУрушаТ} := -\left(\frac{75.54}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{\mathbf{n}} = -4.76$$



$$X2' := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородУрушаТ}} + X_{ЛСковородУрушаТ} = 92.389$$



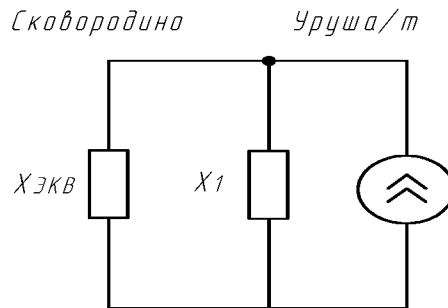
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X4' := X2' + X_{ССковородУрушаГ} + \frac{(X2' \cdot X_{ССковородУрушаГ})}{X_{ВУрушаГ}} = 85.852$$

$$X5' := X2' + X_{ВУрушаГ} + \frac{(X2' \cdot X_{ВУрушаГ})}{X_{ССковородУрушаГ}} = -4.464 \times 10^3$$

$$X6' := X_{ССковородУрушаГ} + X_{ВУрушаГ} + \frac{(X_{ССковородУрушаГ} \cdot X_{ВУрушаГ})}{X2'} = 229.989$$



$$X_{ЭКВ}' := \frac{(X4' + X5') \cdot X6'}{(X4' + X5') + X6'} = 242.74$$

$$X1' := X_{НУрушаГ} = 187.5$$

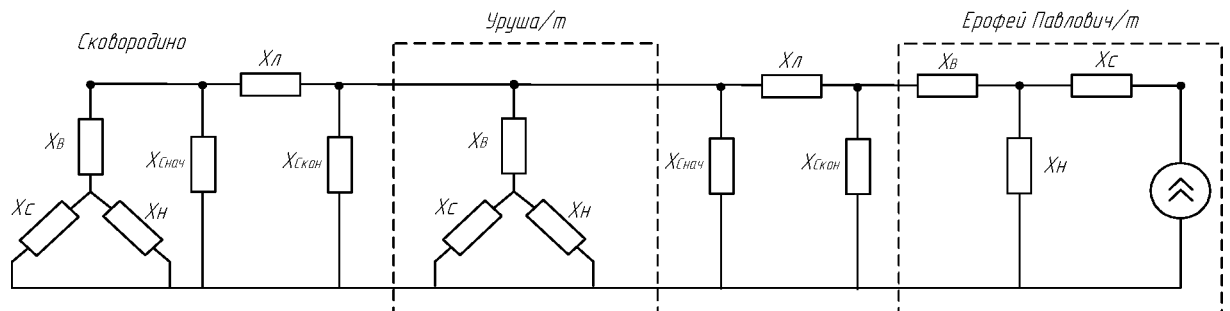
Нагрузка на ПС Уруша/т $S_{УрушаГ} := \sqrt{(22.5)^2 + (24.6)^2} = 33.338 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{УрушаГ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 0.01 \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ}'}{X_{ЭКВ}' + X1'} = 0.564$$

$$I_{1УрушаГ} := K_1 \cdot I = 8.227 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_1 := I_{1УрушаГ} \cdot X1' = 1.543 \text{ кВ}$$

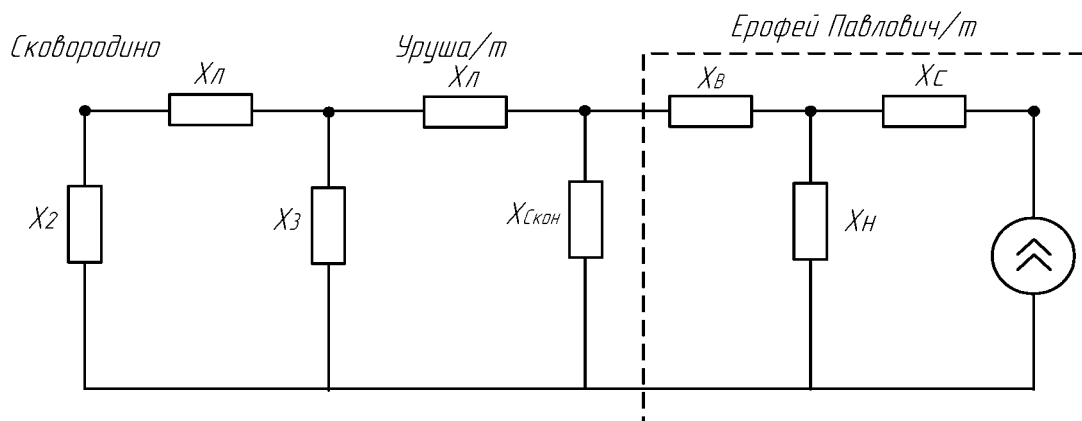


$$X_{ЛУрушаГЕПавловичГ} := n \cdot 28.7$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

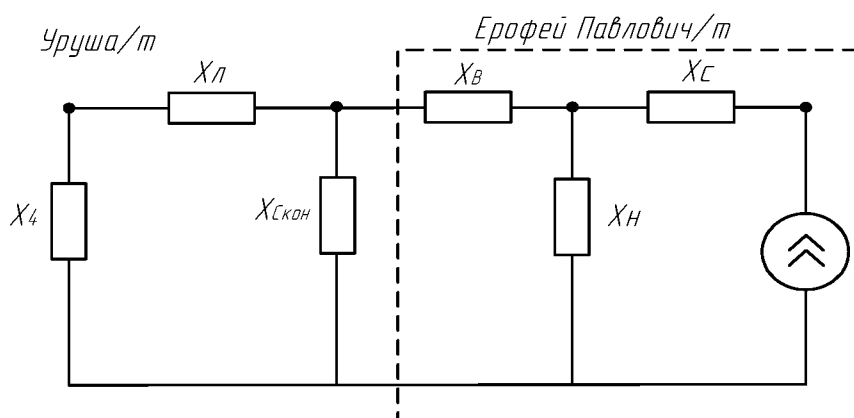
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{СУрушаТЕПавловичТ} := -\left(\frac{66.9}{\frac{2.645}{2}}\right) \cdot \frac{1}{n} = -4.216$$



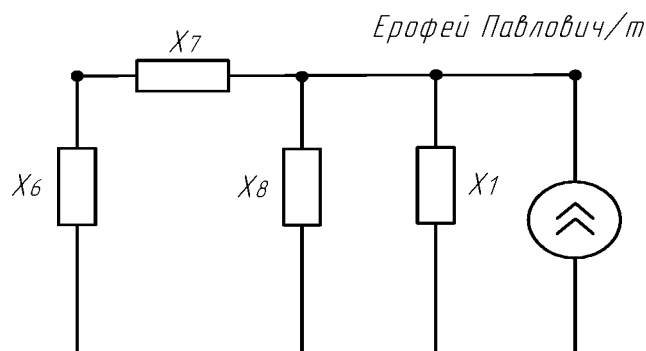
$$X2'' := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородУрушаТ}} = -4.811$$

$$X3''' := \frac{\frac{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) + X_{ССковородУрушаТ}} \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{\frac{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) + X_{ССковородУрушаТ}} + X_{СУрушаТЕПавловичТ}} = -2.247$$



$$X4''' := \frac{(X2'' + X_{ЛСковородУрушаТ}) \cdot X3'''}{(X2'' + X_{ЛСковородУрушаТ}) + X3'''} = -2.303$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



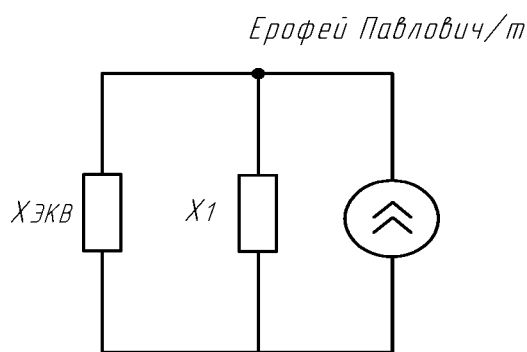
$$X5''' := X4''' + x_{\text{ЛУДВШАТЕПАВЛОВИЧТ}} = 83.797$$

$$X6''' := X5''' + x_{\text{СУРУШАТЕПАВЛОВИЧТ}} + \frac{(X5''' \cdot x_{\text{СУРУШАТЕПАВЛОВИЧТ}})}{x_{\text{ВЕПАВЛОВИЧТ}}} = 78.154$$

$$X7''' := X5''' + x_{\text{ВЕПАВЛОВИЧТ}} + \frac{(X5''' \cdot x_{\text{ВЕПАВЛОВИЧТ}})}{x_{\text{СУРУШАТЕПАВЛОВИЧТ}}} = -4.589 \times 10^3$$

$$X8''' := x_{\text{СУРУШАТЕПАВЛОВИЧТ}} + x_{\text{ВЕПАВЛОВИЧТ}} \dots = 230.834$$

$$+ \frac{x_{\text{СУРУШАТЕПАВЛОВИЧТ}} \cdot x_{\text{ВЕПАВЛОВИЧТ}}}{X5'''}$$



$$X_{\text{ЭКВ}}''' := \frac{(X6''' + X7''') \cdot X8'''}{(X6''' + X7''') + X8'''} = 243.284$$

$$X1''' := x_{\text{НПАВЛОВИЧТ}} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{\text{ЕрофейПавловичТ}} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$

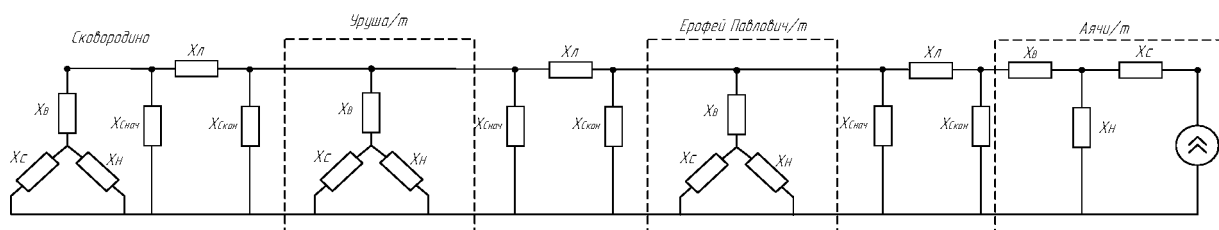
$$I := \frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.45 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_{LW} := \frac{X_{Экв}'''}{X_{Экв}''' + X1'''} = 0.565$$

$$I_{1ЕрофейПавлович2} := K_1 \cdot I = 1.948 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{1ЕрофейПавлович2} := I_{1ЕрофейПавлович2} \cdot X1''' = 0.365 \quad \text{кВ}$$



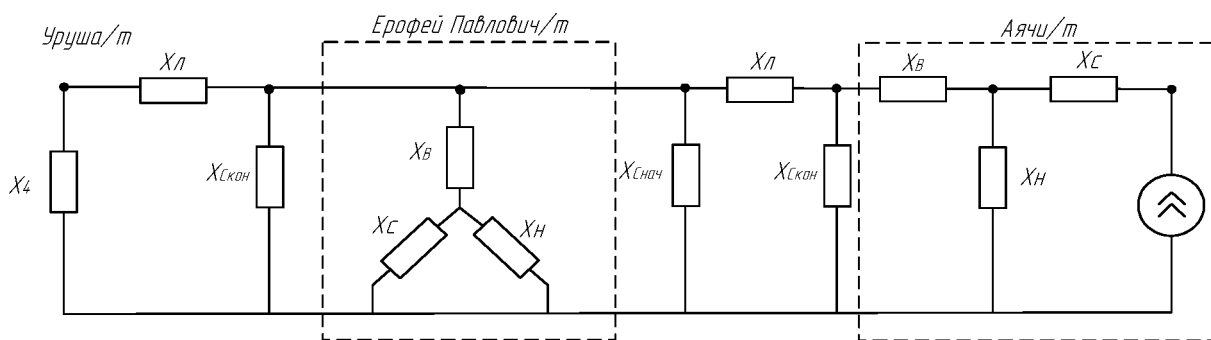
$$X_{ВАячиТ} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

$$X_{ЛЕПавловичТАячиТ} := n \cdot 28.7$$

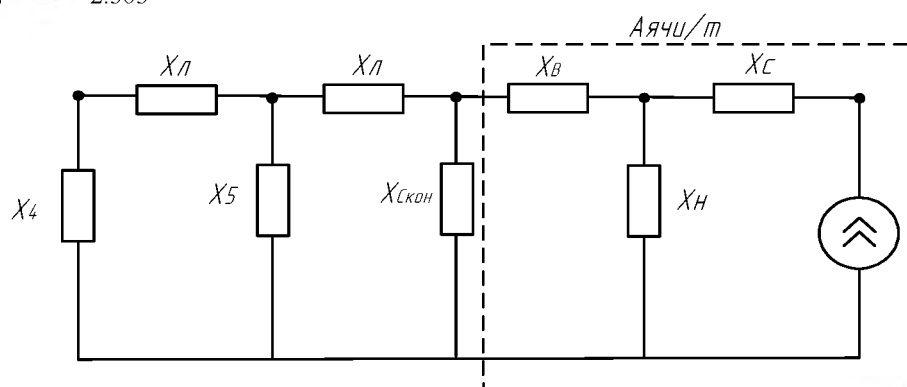
$$X_{С\Delta стияТ} := 0$$

$$X_{НАячиТ} := \frac{n \cdot 125}{2} = 187.5$$

$$X_{СЕПавловичТАячиТ} := -\left(\frac{66.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -4.216$$



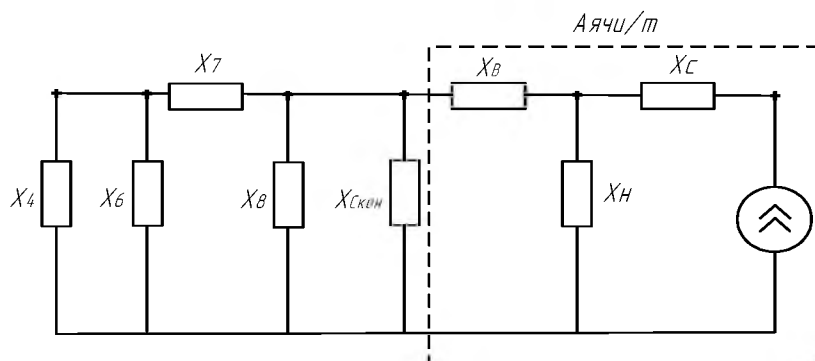
$$X4 := X4''' = -2.303$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X5 := \frac{\left[\frac{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}} \right] \cdot X_{СЕПавловичТАячиТ}}{\frac{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}} + X_{СЕПавловичТАячиТ}} = 1.31$$

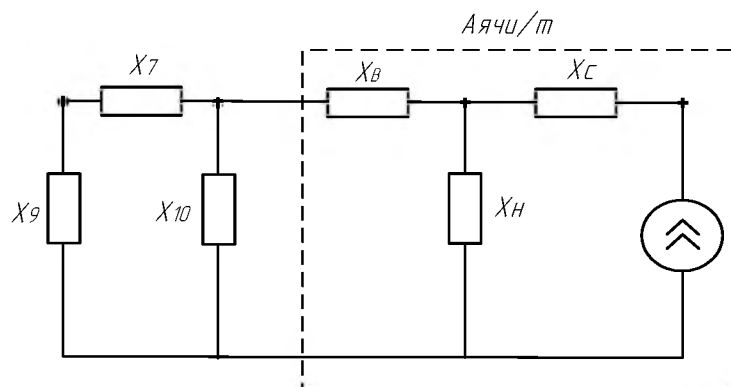


$$X6 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X5 + \frac{(X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X5)}{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}} = 88.722$$

$$X7 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X_{ЛЕПавловичТАячиТ} \dots = 5.827 \times 10^3$$

$$+ \frac{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_{ЛЕПавловичТАячиТ}}{X5}$$

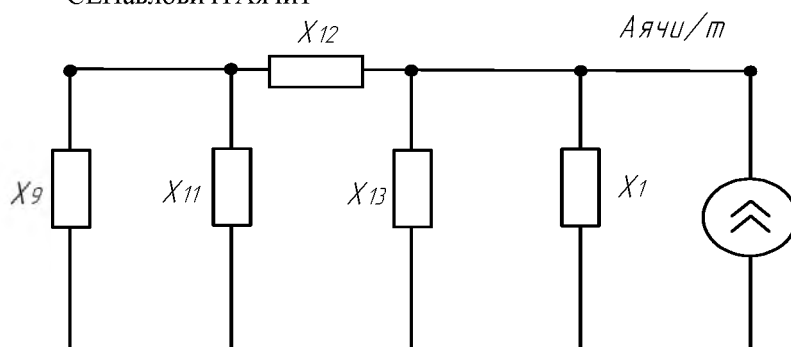
$$X8 := X5 + X_{ЛЕПавловичТАячиТ} + \frac{(X5 \cdot X_{ЛЕПавловичТАячиТ})}{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ}} = 88.722$$



$$X9 := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -2.365$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

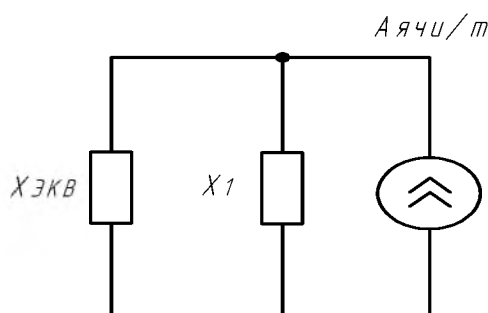
$$\underline{X_{10}} := \frac{X_8 \cdot X_{\text{СЕПавловичТАячиТ}}}{X_8 + X_{\text{СЕПавловичТАячиТ}}} = -4.426$$



$$\underline{X_{11}} := X_7 + X_{10} + \frac{(X_7 \cdot X_{10})}{X_8} = 5.532 \times 10^3$$

$$\underline{X_{12}} := X_7 + X_8 + \frac{(X_7 \cdot X_8)}{X_{10}} = -1.109 \times 10^5$$

$$\underline{X_{13}} := X_8 + X_{10} + \frac{(X_8 \cdot X_{10})}{X_7} = 84.229$$



$$\underline{X_{\text{ЭКВ}}''} := \frac{\left(X_{12} + \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} \right) \cdot X_{13}}{\left(X_{12} + \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} \right) + X_{13}} = 84.293$$

$$\underline{X_1} := X_{\text{НАячиТ}}$$

Нагрузка на ПС Аячи/т $S_{\text{АячиТ}} := \sqrt{(9.9)^2 + (12)^2} = 15.557 \text{ МВА}$

$$\underline{I} := \frac{S_{\text{АячиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.014 \text{ кА}$$

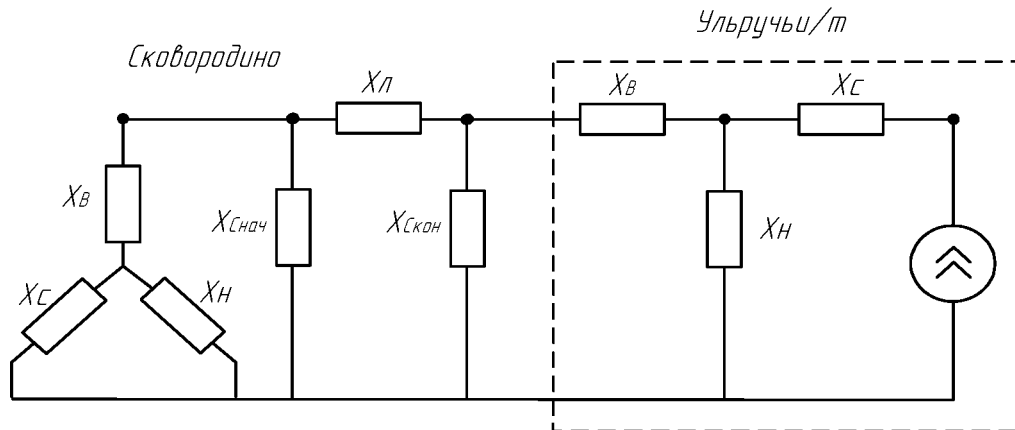
$$\underline{K_{1v}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}''}{X_{\text{ЭКВ}}'' + X_1} = 0.31$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I_{1АячиТ} := K_1 \cdot I = 4.221 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1Аячи} := I_{1АячиТ} \cdot X1 = 0.791 \text{ кВ}$$

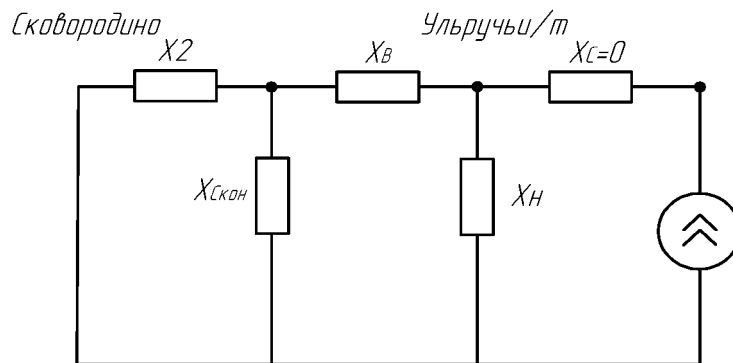


$$X_{ВульручыТ} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

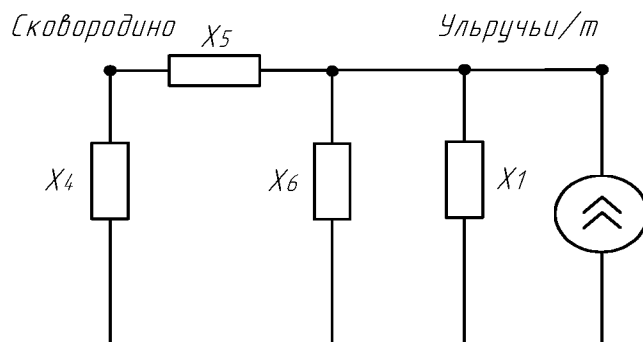
$$X_{ЛСковородиноУльручыТ} := n \cdot 10.67$$

$$X_{СУльручыТ} := 0$$

$$X_{НУльручыТ} := \frac{n \cdot 125}{2} = 187.5 \quad X_{ССковородиноУльручыТ} := -\left(\frac{25.83}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.628$$



$$X2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноУльручыТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноУльручыТ} + X_{ЛСковородиноУльручыТ}} \dots = 30.376$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

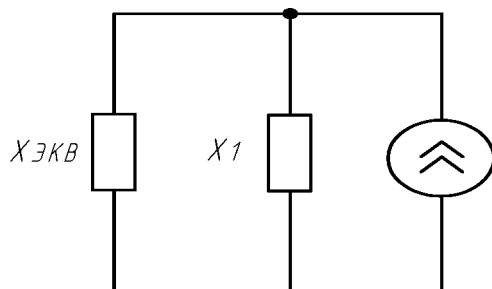
$$X4 := X2 + X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}} + \frac{(X2 \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}})}{X_{\text{ВульручьиТ}}} = 28.549$$

$$X5 := X2 + X_{\text{ВульручьиТ}} + \frac{(X2 \cdot X_{\text{ВульручьиТ}})}{X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}} = -4.341 \times 10^3$$

$$X6 := X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}} + X_{\text{ВульручьиТ}} \dots = 232.611$$

$$+ \frac{X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}} \cdot X_{\text{ВульручьиТ}}}{X2}$$

Сковородино *Ульручьи/т*



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 245.872$$

$$X1 := X_{\text{НУльручьиТ}} = 187.5$$

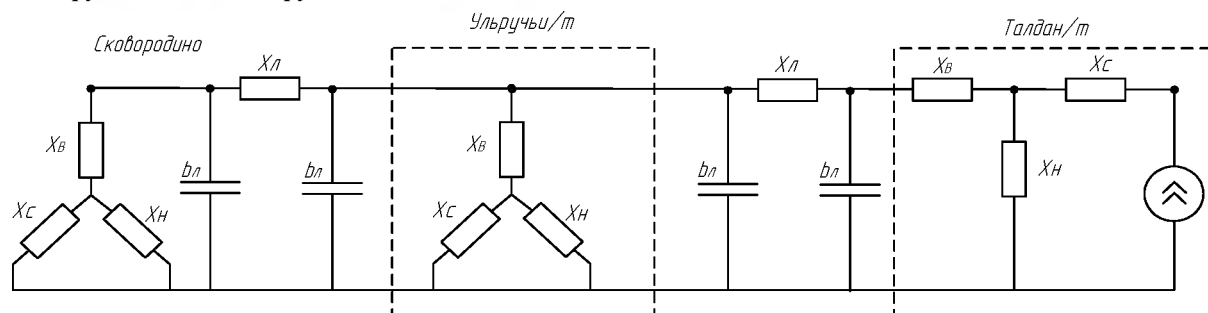
Нагрузка на ПС Ульручьи/т $S_{\text{УльручьиТ}} := \sqrt{(11.1)^2 + (8.6)^2} = 14.042 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{\text{УльручьиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = \text{кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X1} = 0.567$$

$$I_{\text{УльручьиТ}} := K_1 \cdot I = 6.969 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{УльручьиТ}} := I_{\text{УльручьиТ}} \cdot X1 = 1.307 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ВТалданТ}} := n \cdot 165$$

$$X_{\text{ЛУльручьиТТалданТ}} := n \cdot 19.36$$

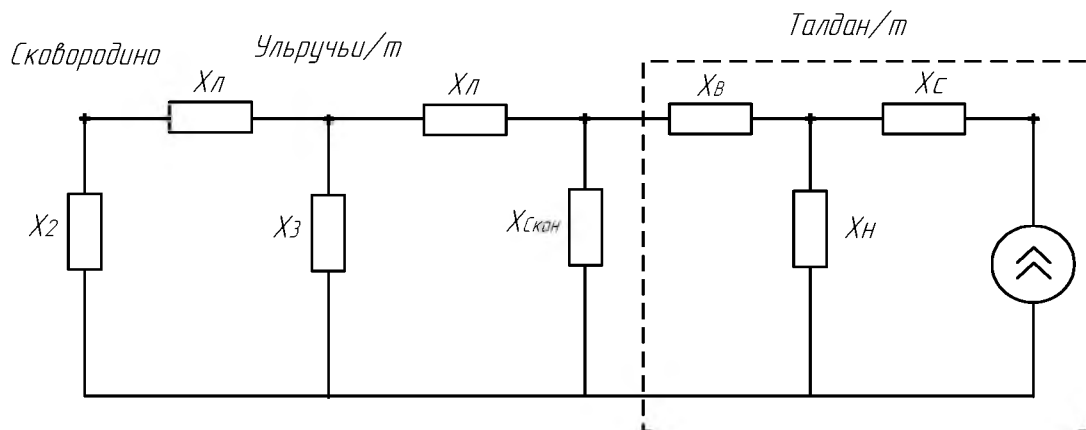
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{СталданГ}} := 0$$

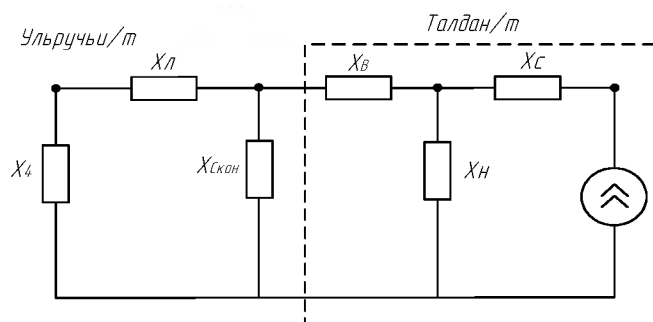
$$X_{\text{НТалданГ}} := n \cdot 125 = 375$$

$$X_{\text{СультручьитТаладанГ}} := -\left(\frac{48.04}{2}\right) \cdot \frac{1}{n} = -3.027$$

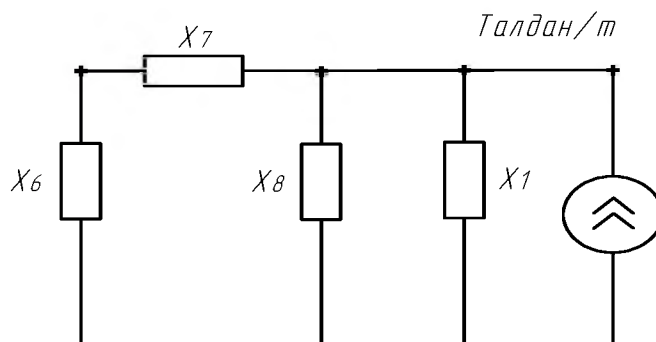


$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльтручьитГ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноУльтручьитГ}}} = -1.634$$

$$X_3 := \frac{\frac{(X_{\text{ВТалданГ}} + X_{\text{НТалданГ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльтручьитГ}}}{(X_{\text{ВТалданГ}} + X_{\text{НТалданГ}}) + X_{\text{ССковородиноУльтручьитГ}}} \cdot X_{\text{СультручьитТаладанГ}}}{\frac{(X_{\text{ВТалданГ}} + X_{\text{НТалданГ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльтручьитГ}}}{(X_{\text{ВТалданГ}} + X_{\text{НТалданГ}}) + X_{\text{ССковородиноУльтручьитГ}}} + X_{\text{СультручьитТаладанГ}}} = -1.06$$



$$X_4 := \frac{(X_{\text{ЛСковородиноУльтручьитГ}} + X_2) \cdot X_3}{(X_{\text{ЛСковородиноУльтручьитГ}} + X_2) + X_3} = -1.098$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\underline{X6} := \left(X4 + x_{ЛУльручьГТалданГ} \right) + x_{ССковородиноУльручьГ} \dots = 55.167$$

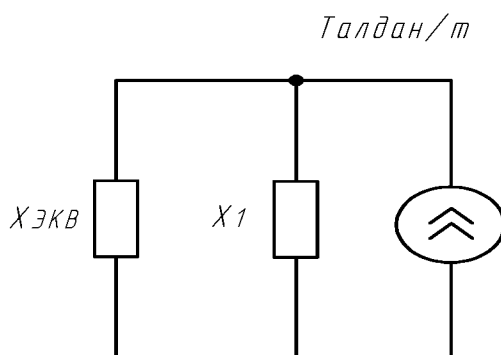
$$+ \frac{\left(X4 + x_{ЛУльручьГТалданГ} \right) \cdot x_{ССковородиноУльручьГ}}{x_{ВТалданГ}}$$

$$\underline{X7} := \left(X4 + x_{ЛУльручьГТалданГ} \right) + x_{ВТалданГ} \dots = -1.678 \times 10^4$$

$$+ \frac{\left(X4 + x_{ЛУльручьГТалданГ} \right) \cdot x_{ВТалданГ}}{x_{ССковородиноУльручьГ}}$$

$$\underline{X8} := \left(x_{ССковородиноУльручьГ} \right) + x_{ВТалданГ} \dots = 479.234$$

$$+ \frac{x_{ССковородиноУльручьГ} \cdot x_{ВТалданГ}}{X4 + x_{ЛУльручьГТалданГ}}$$



$$\underline{X_{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 493.372$$

$$\underline{X1} := x_{ВТалданГ} = 495$$

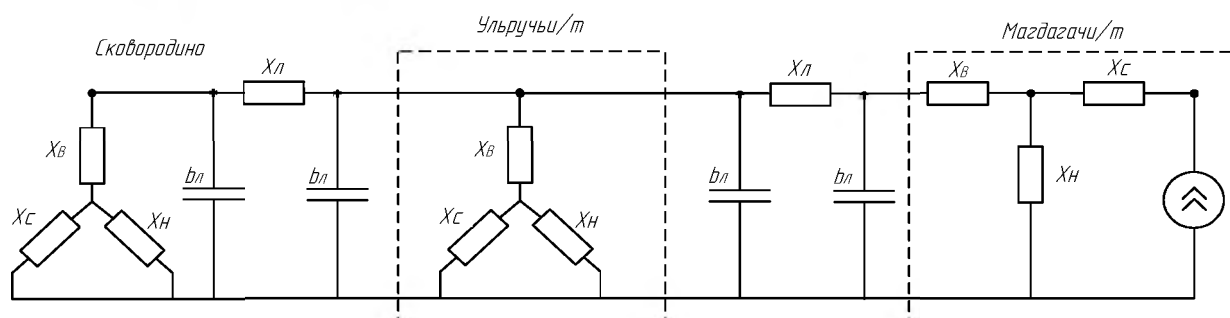
Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{ТалданГ} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

$$\underline{I} := \frac{S_{ТалданГ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta} = 4.156 \times 10^{-3}$$

$$\underline{K1} := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X1} = 0.499$$

$$I_{1Талдан} := K1 \cdot I = 2.075 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1Талдан} := I_{1Талдан} \cdot X1 = 1.027 \text{ кВ}$$



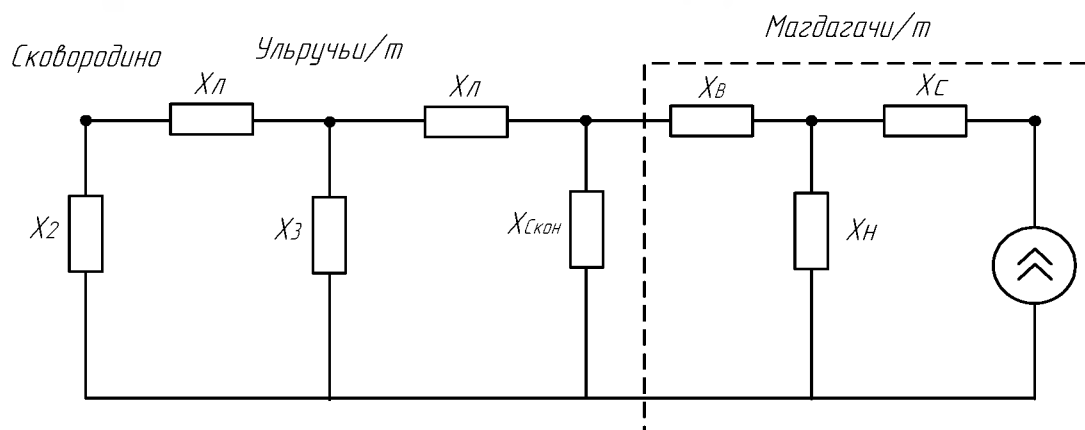
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{ВМагдагачиТ} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

$$X_{ЛУльручьиТМагдагачи} := n \cdot 54.14$$

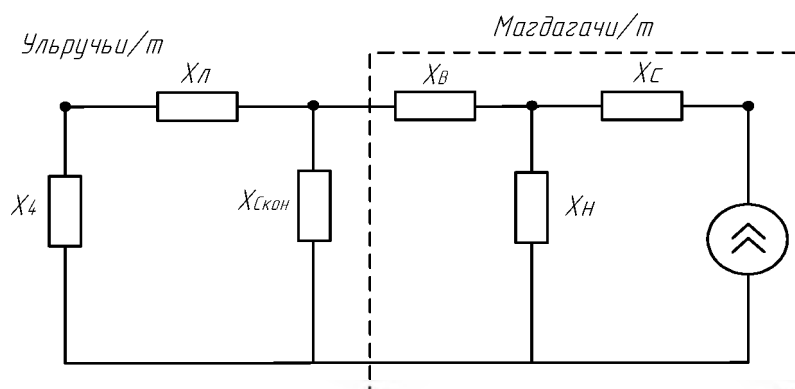
$$X_{СМагдагачиТ} := 0$$

$$X_{НМагдагачиТ} := \frac{n \cdot 125}{2} = 187.5 \quad X_{СУльручьиТМагдагачи} := -\left(\frac{125.7}{2}\right) \cdot \frac{1}{n} = -7.921$$



$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноУльручьиТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноУльручьиТ}} = -1.634$$

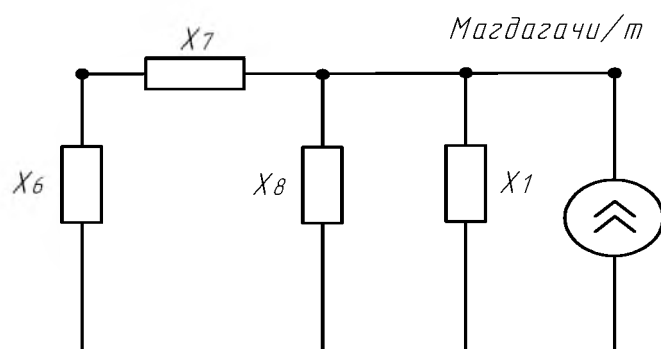
$$X_3 := \frac{\left(\begin{matrix} X_{ВульручьиТ} \dots \\ + X_{НУльручьиТ} \end{matrix} \right) \cdot X_{ССковородиноУльручьиТ}}{\left(X_{ВульручьиТ} + X_{НУльручьиТ} \right) \dots + X_{ССковородиноУльручьиТ}} \cdot X_{СУльручьиТМагдагачи} = -1.354$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

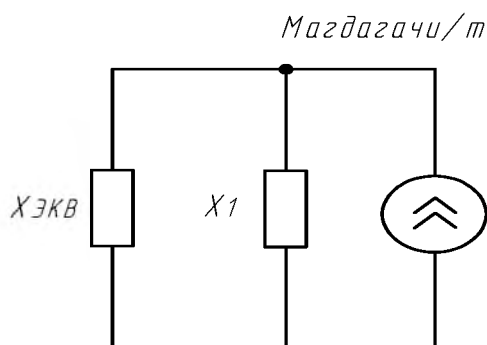
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьГТ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьГТ}} + X2) + X3} = -1.418$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТМагдагачи}}) + X_{\text{СУльручьГТМагдагачи}} \cdot X_{\text{ВМагдагачиГ}}}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{ВМагдагачиГ}} + X_{\text{СУльручьГТМагдагачи}}} = 147.929$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиГ}} \cdot X_{\text{СУльручьГТМагдагачи}}}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{ВМагдагачиГ}} + X_{\text{СУльручьГТМагдагачи}}} = -4.622 \times 10^3$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{СУльручьГТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиГ}} \cdot X_{\text{СУльручьГТМагдагачи}}}{X4 + X_{\text{ЛУльручьГТМагдагачи}}} = 227.403$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 239.579$$

$$X1 := X_{\text{НМагдагачиГ}} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{\text{МагдагачиГ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

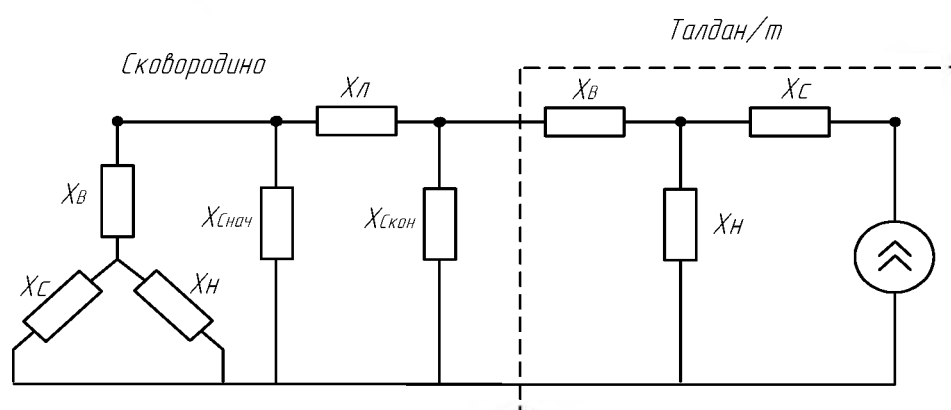
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 5.723 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.561$$

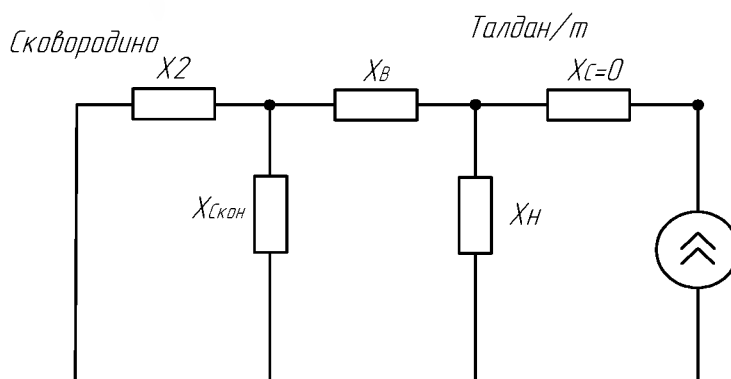
$$I_{1\text{Магдагачи}} := K_1 \cdot I = 3.211 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи}} := I_{1\text{Магдагачи}} \cdot X_1 = 0.602 \text{ кВ}$$



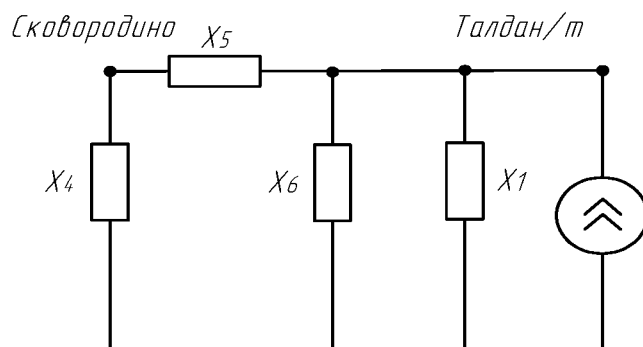
$$X_{\text{ЛсковородиноТалданТ}} := n \cdot 27.96$$

$$X_{\text{ССсковородиноТалданТ}} := -\left(\frac{69.6}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -4.386$$



$$X_2 := \frac{(X_{\text{Всковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССсковородиноТалданТ}}}{(X_{\text{Всковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССсковородиноТалданТ}}} = -4.429$$

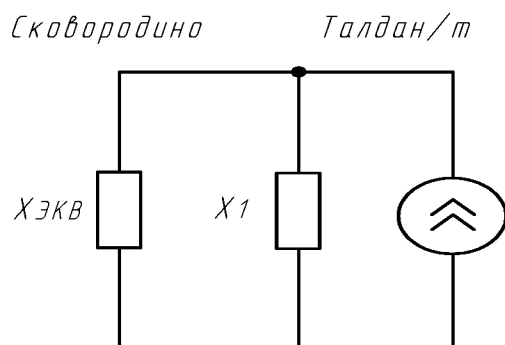
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X4 := X2 + x_{СССковородиноТалданТ} + \frac{(X2 \cdot x_{СССковородиноТалданТ})}{x_{ВТалданТ}} = -8.775$$

$$X5 := X2 + x_{ВТалданТ} + \frac{(X2 \cdot x_{ВТалданТ})}{x_{СССковородиноТалданТ}} = 990.449$$

$$X6 := x_{ВТалданТ} + x_{СССковородиноТалданТ} + \frac{(x_{ВТалданТ} \cdot x_{СССковородиноТалданТ})}{X2} = 980.784$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 490.614$$

$$X1 := x_{НТалданТ} = 375$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{ТалданТ} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

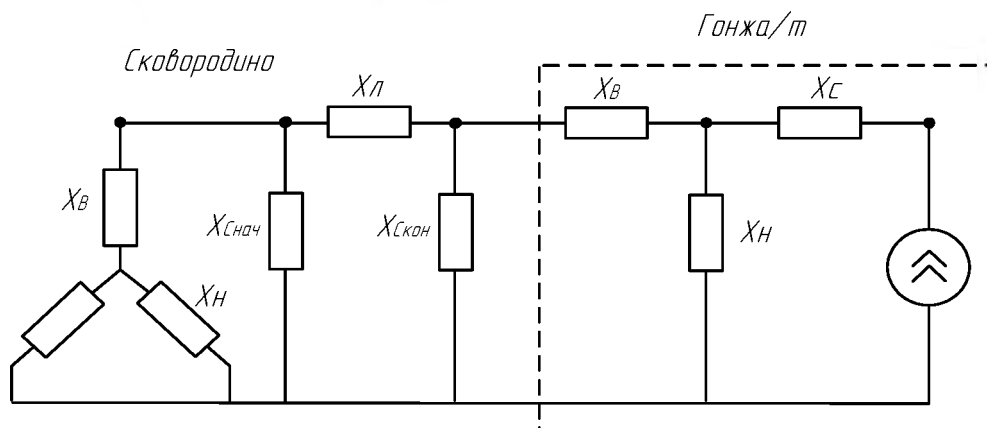
$$I := \frac{S_{ТалданТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 4.156 \times 10^{-3}$$

$$K_{1v} := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X1} = 0.567$$

$$I_{1Талдан2} := K_1 \cdot I = 2.355 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

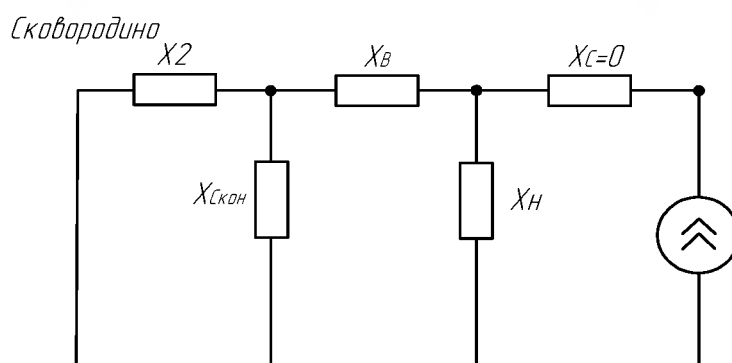
$$U_{1\text{Галдан}2} := I_{1\text{Галдан}2} \cdot X_1 = 0.883 \text{ кВ}$$



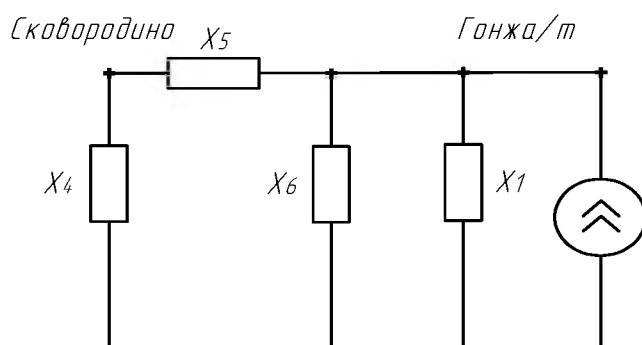
$$X_{В\text{Гонжа}T} := \frac{165 \cdot n}{2} = 247.5 \quad X_{Л\text{СковородиноГонжа}T} := n \cdot 46.08$$

$$X_{С\text{Гонжа}T} := 0$$

$$X_{Н\text{Гонжа}T} := \frac{125 \cdot n}{2} = 187.5 \quad X_{С\text{СковородиноГонжа}T} := -\left(\frac{115.2}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -7.259$$



$$X_2 := \frac{(X_{В\text{Сковород}} + X_{Н\text{Сковород}}) \cdot X_{С\text{СковородиноГонжа}T}}{(X_{В\text{Сковород}} + X_{Н\text{Сковород}}) + X_{С\text{СковородиноГонжа}T}} = -7.378$$



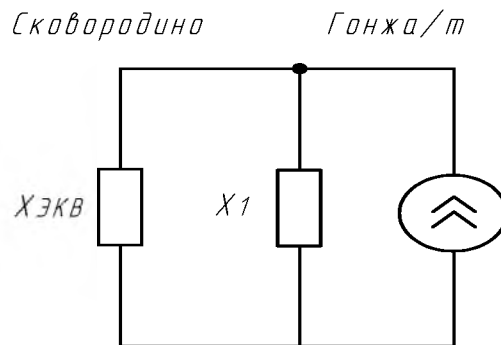
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X4 := X2 + X_{\text{ССковородиноГонжаТ}} + \frac{(X2 \cdot X_{\text{ССковородиноГонжаТ}})}{X_{\text{ВГонжаТ}}} = -14.421$$

$$X5 := X2 + X_{\text{ВГонжаТ}} + \frac{(X2 \cdot X_{\text{ВГонжаТ}})}{X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}} = 491.685$$

$$X6 := X_{\text{ВГонжаТ}} + X_{\text{ССковородиноГонжаТ}} + \frac{(X_{\text{ВГонжаТ}} \cdot X_{\text{ССковородиноГонжаТ}})}{X2} = 483.743$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 240.241$$

$$X1 := X_{\text{НГонжаТ}} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{\text{ГонжаТ}} := \sqrt{(4.9)^2 + (8.2)^2} = 9.552 \text{ МВА}$

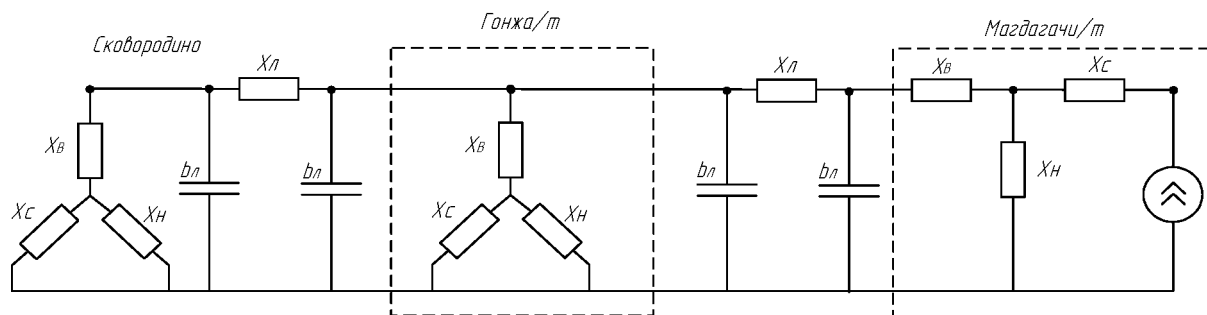
$$I := \frac{S_{\text{ГонжаТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 4.178 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X1} = 0.562 \text{ кВ}$$

$$I_{\text{Гонжа}} := K1 \cdot I = 2.347 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

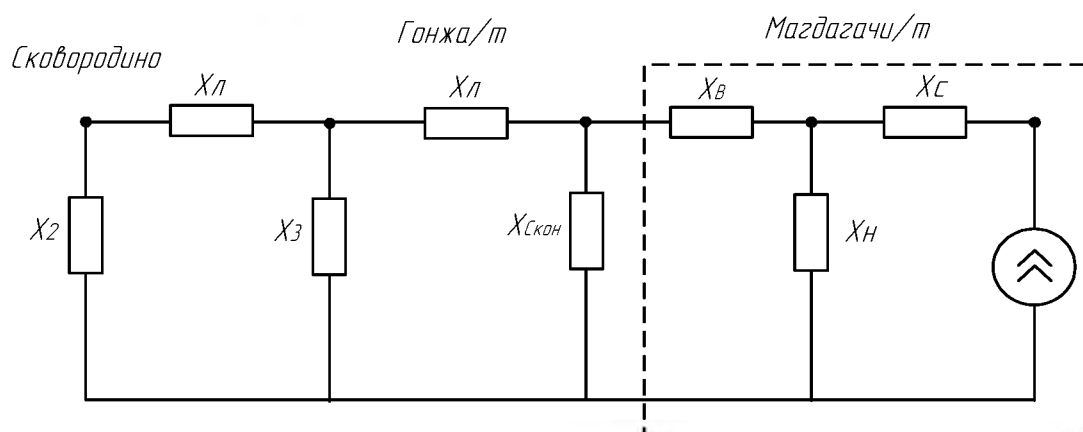
$$U_{\text{Гонжа}} := I_{\text{Гонжа}} \cdot X1 = 0.44 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



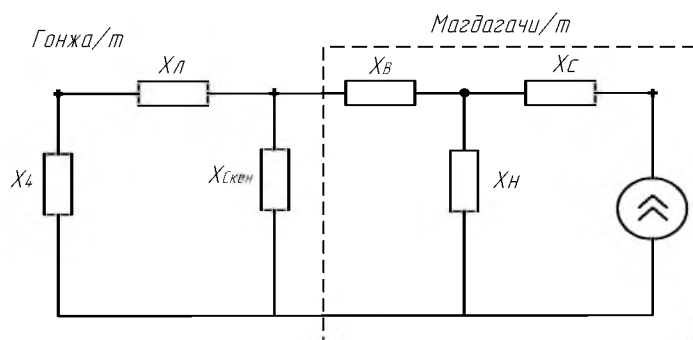
$$X_{ЛГонжаТМагдагачи} := n \cdot 14.38$$

$$X_{СГонжаТМагдагачи} := -\left(\frac{35.95}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.265$$



$$X_2 := \frac{(X_{вСковород} + X_{нСковород}) \cdot X_{сСковородиноГонжаТ}}{(X_{вСковород} + X_{нСковород}) + X_{сСковородиноГонжаТ}} = -7.378$$

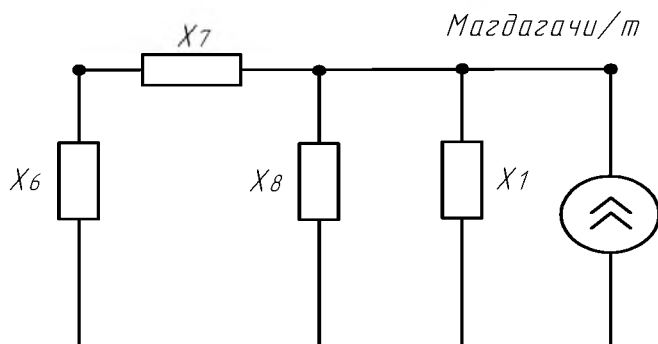
$$X_3 := \frac{\frac{(X_{вГонжаТ} + X_{нГонжаТ}) \cdot X_{сСковородиноГонжаТ}}{(X_{вГонжаТ} + X_{нГонжаТ}) + X_{сСковородиноГонжаТ}} \cdot X_{СГонжаТМагдагачи}}{\frac{(X_{вГонжаТ} + X_{нГонжаТ}) \cdot X_{сСковородиноГонжаТ}}{(X_{вГонжаТ} + X_{нГонжаТ}) + X_{сСковородиноГонжаТ}} + X_{СГонжаТМагдагачи}} = -1.733$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

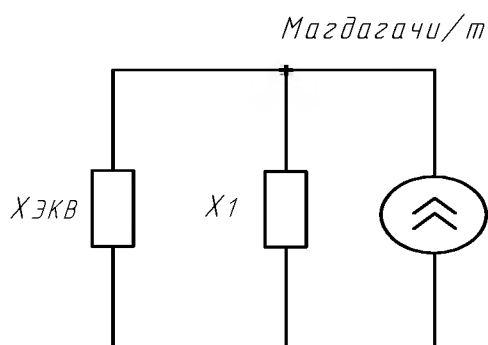
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛсковородиноГонжаТ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛсковородиноГонжаТ}} + X2) + X3} = -1.757$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \dots = 38.739}{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} + X_{\text{ВМагдагачиТ}}}$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots = -4.233 \times 10^3}{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}} + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}}$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots = 231.687}{X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}} + X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 245.235$$

$$X1 := X_{\text{НМагдагачиТ}} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 5.723 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.567$$

$$I_{1\text{Магдагачи}2} := K_1 \cdot I = 3.244 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи}2} := I_{1\text{Магдагачи}2} \cdot X_1 = 0.608 \text{ кВ}$$

Суммарный ток третьей гармоники на ПС Сковородино, кА:

$$I_{3\Sigma} := \sqrt{I_{1\text{СковородиноТ}}^2 + (I_{1\text{БАМ}})^2 + (I_{1\text{БольшаяОмутная}})^2 + (I_{1\text{ЕрофейПавлович}})^2 \dots = 0.02$$

$$+ I_{1\text{УрушаТ}}^2 + I_{1\text{ЕрофейПавлович}2}^2 + I_{1\text{АячиТ}}^2 + I_{1\text{УльручыТ}}^2 \dots$$

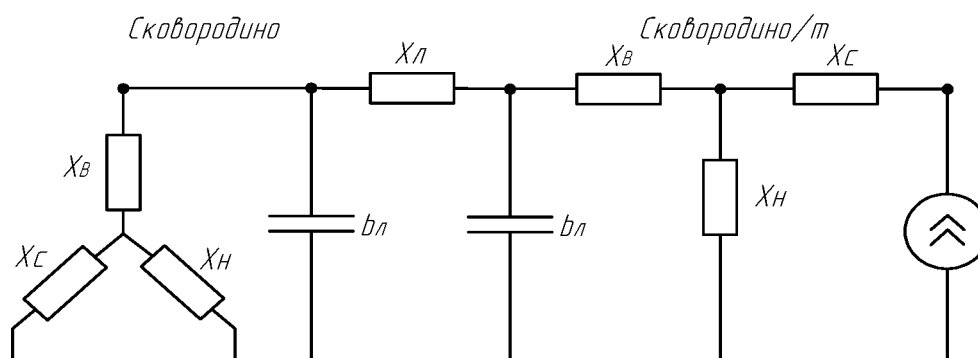
$$+ I_{1\text{Талдан}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}}^2 + I_{1\text{Талдан}2}^2 + I_{1\text{Гонжа}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}2}^2$$

Напряжение третьей гармоники на ПС Сковородино, кВ:

$$U_{3\Sigma} := I_{3\Sigma} \cdot (X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) = 8.853$$

5 гармоника

$$n := 5$$



Сопротивления элементов схемы замещения, Ом:

$$X_{\text{ВСковород}} := \frac{104 \cdot n}{2} \quad X_{\text{ЛСковородСковородТ}} := 1.137 \cdot n$$

$$X_{\text{ВСковородТ}} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

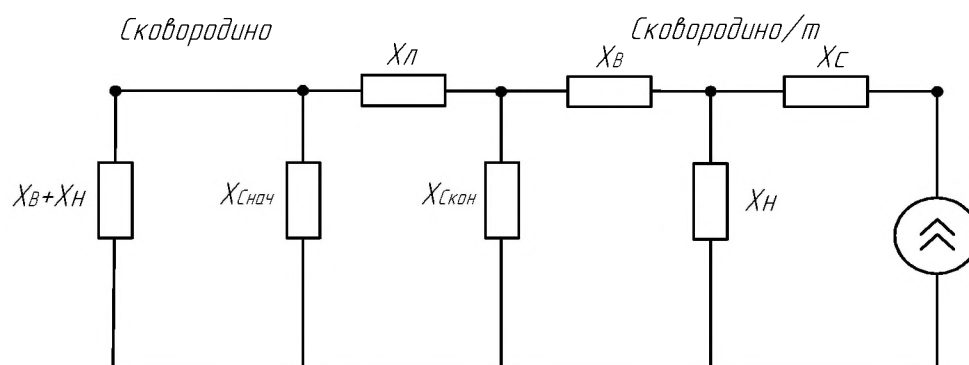
$$X_{\text{ССковород}} := 0 \quad b_{\text{ЛСковородСковородТ}} := 28.05$$

$$X_{\text{ССковородТ}} := 0$$

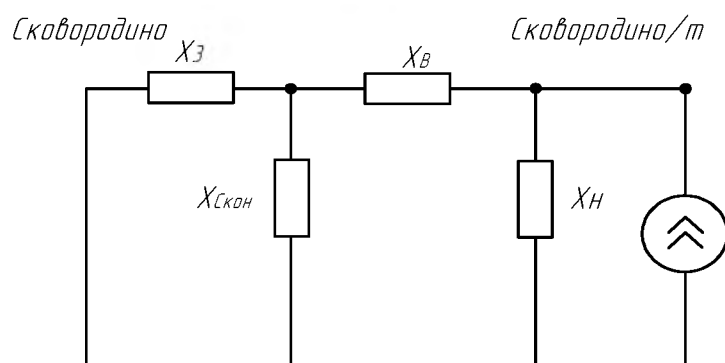
$$X_{\text{НСковород}} := \frac{195.6 \cdot n}{2} = 489$$

$$X_{\text{НСковородТ}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 312.5$$

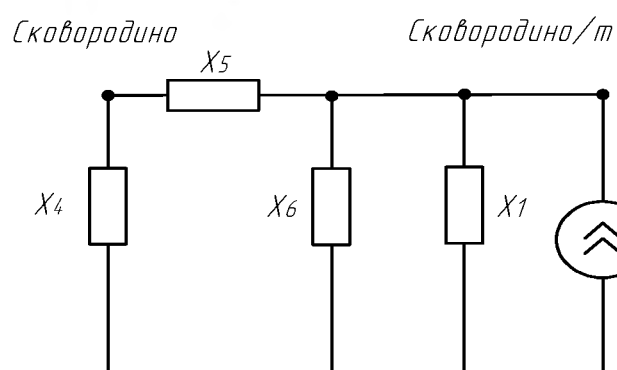
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X_{ССковородСковородТ} := -\left(\frac{5.3}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.1$$



$$X_3 := \frac{(X_{вСковород} + X_{нСковород}) \cdot X_{ССковородСковородТ}}{(X_{вСковород} + X_{нСковород}) + X_{ССковородСковородТ}} + X_{лСковородСковородТ} = 5.585$$



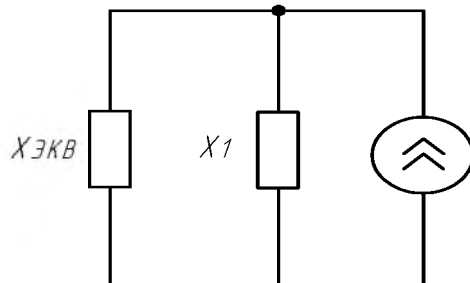
$$X_4 := X_3 + X_{ССковородСковородТ} + \frac{(X_3 \cdot X_{ССковородСковородТ})}{X_{вСковородТ}} = 5.483$$

$$X_5 := X_3 + X_{вСковородТ} + \frac{(X_3 \cdot X_{вСковородТ})}{X_{ССковородСковородТ}} = -2.258 \times 10^4$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_6 := X_{C_{\text{СковородиноСковородТ}}} + X_{B_{\text{СковородТ}}} + \frac{(X_{C_{\text{СковородСковородТ}}} \cdot X_{B_{\text{СковородТ}}})}{X_3} = 405$$

Сковородино Сковородино/т



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 412.4$$

$$X_1 := X_{H_{\text{СковородТ}}} = 312.5$$

Нагрузка на ПС Сковородино/т $S_{\text{СковородиноТ}} := \sqrt{11^2 + 11.9^2} = 16.205 \text{ МВА}$

$$U_{\text{НОМ}} := 220 \text{ кВ}$$

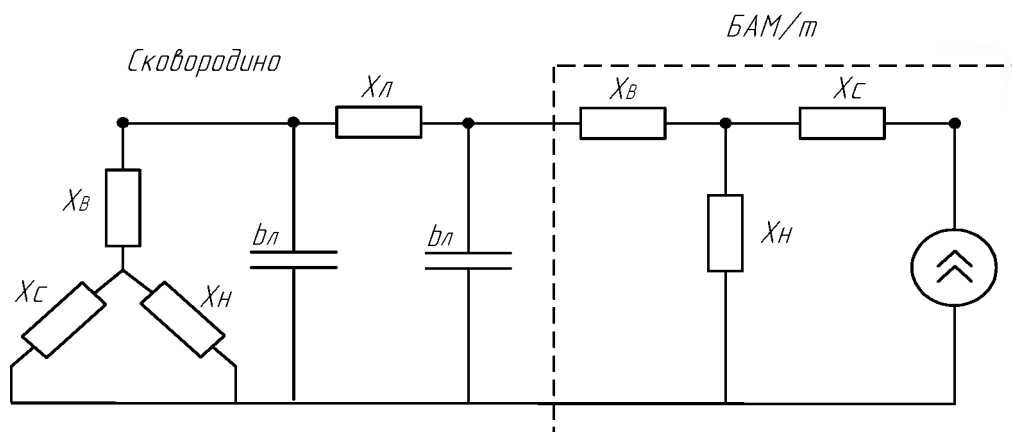
$$I := \frac{S_{\text{СковородиноТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \eta} = 8.506 \times \text{кА}^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.569$$

$$I_{\text{СковородиноТ}} := K_1 \cdot I = 4.839 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{СковородиноТ}} := I_{\text{СковородиноТ}} \cdot X_1 = 1.512 \text{ кВ}$$

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

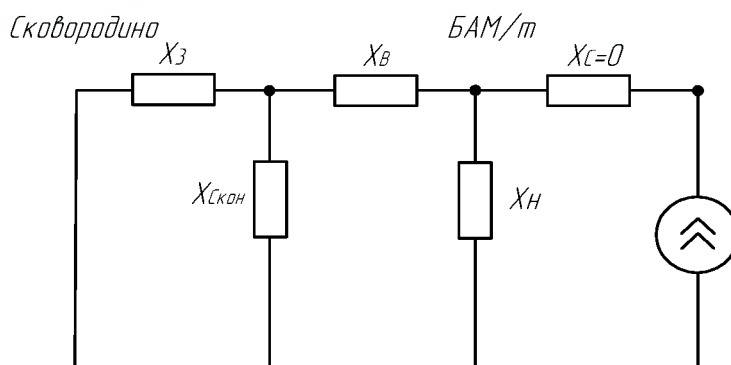
$$X_{ЛС_{\text{СковородБамТ}}} := 11.094 \cdot n$$

$$X_{В_{\text{БамТ}}} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{СС_{\text{СковородБамТ}}} := -\left(\frac{25.86}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.978$$

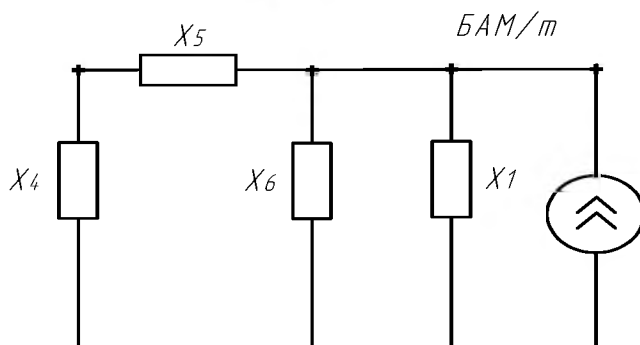
$$X_{С_{\text{БамТ}}} := 0$$

$$X_{Н_{\text{БамТ}}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 312.5$$



$$X_2 := \frac{(X_{В_{\text{Сковород}}} + X_{Н_{\text{Сковород}}}) \cdot X_{СС_{\text{СковородБамТ}}}}{(X_{В_{\text{Сковород}}} + X_{Н_{\text{Сковород}}}) + X_{СС_{\text{СковородБамТ}}}} = -0.979$$

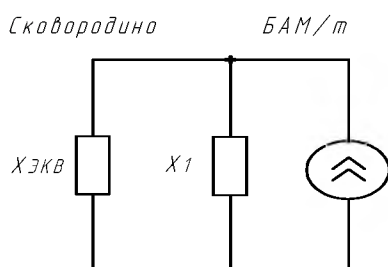
$$X_3' := X_2 + X_{ЛС_{\text{СковородБамТ}}} = 54.491$$



$$X_4' := X_3' + X_{СС_{\text{СковородБамТ}}} + \frac{(X_3' \cdot X_{СС_{\text{СковородБамТ}}})}{X_{В_{\text{БамТ}}}} = 53.384$$

$$X_5' := X_3' + X_{В_{\text{СковородТ}}} + \frac{(X_3' \cdot X_{В_{\text{БамТ}}})}{X_{СС_{\text{СковородБамТ}}}} = -2.252 \times 10^4$$

$$X_6' := X_{СС_{\text{СковородБамТ}}} + X_{В_{\text{СковородТ}}} + \frac{(X_{СС_{\text{СковородБамТ}}} \cdot X_{В_{\text{БамТ}}})}{X_3'} = 404.121$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_{4'} + X_{5'}) \cdot X_{6'}}{(X_{4'} + X_{5'}) + X_{6'}} = 411.522$$

$$X_{1'} := X_{\text{НБАМТ}} = 312.5$$

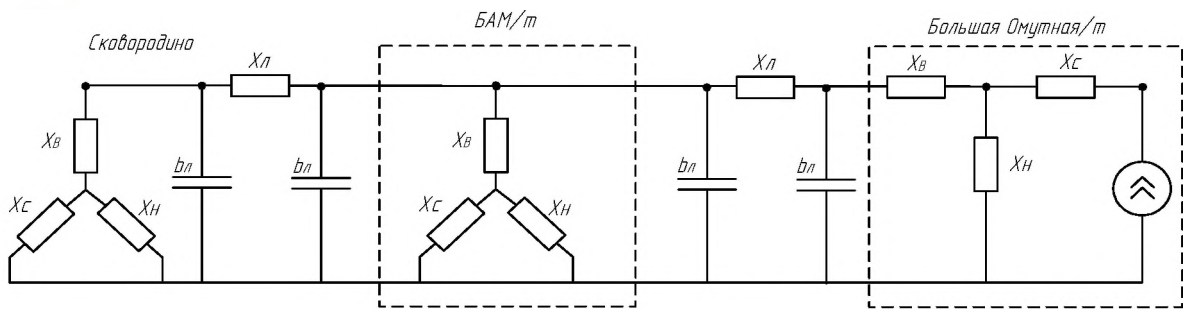
Нагрузка на ПС БАМ/Т $S_{\text{БАМТ}} := \sqrt{(16.6)^2 + 24^2} = 29.182 \text{ МВА}$

$$I' := \frac{S_{\text{БАМТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.015 \text{ кА}$$

$$K_{1'} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.569$$

$$I_{1\text{БАМ}} := K_1 \cdot I = 4.839 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{БАМ}} := I_{1\text{БАМ}} \cdot X_1 = 1.512 \text{ кВ}$$

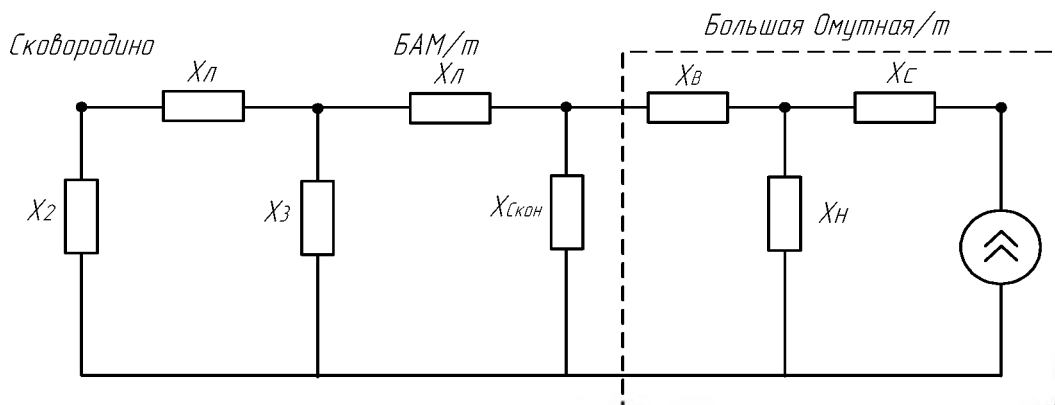


$$X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} := n \cdot 45.861$$

$$X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{\text{СБольшаяОмутнаяТ}} := 0$$

$$X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} := -\left(\frac{106.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -4.042 \quad X_{\text{НБольшаяОмутнаяТ}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 312.5$$

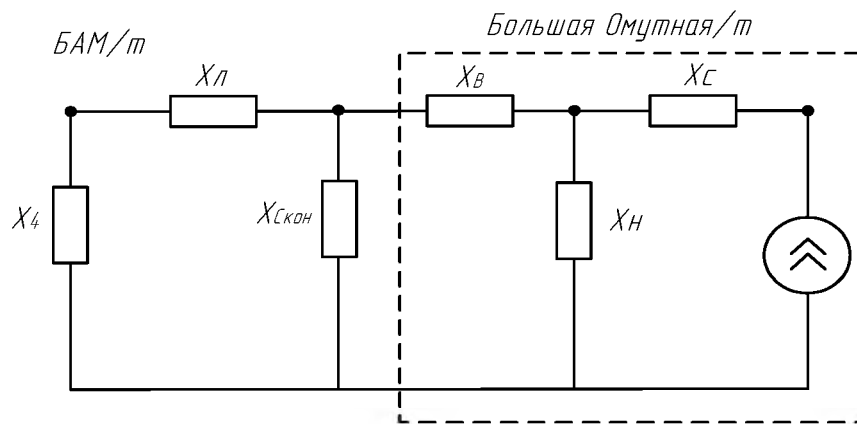


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

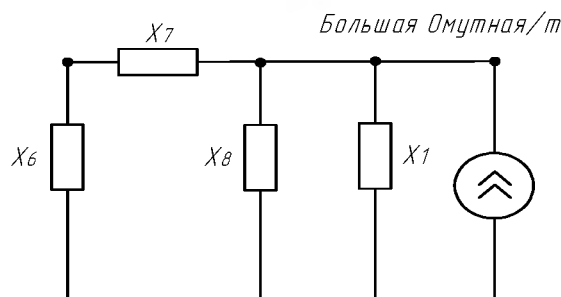
$$X_{2''} := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородБАМТ}} = -0.979$$

$$X_{2''} := \frac{\left(\begin{array}{l} X_{ВСковородТ} \dots \\ + X_{НСковородТ} \end{array} \right) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{\left(\begin{array}{l} X_{ВСковород} \dots \\ + X_{НСковородТ} \end{array} \right) + X_{ССковородБАМТ}} \cdot X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} \\ X_{2''} := \frac{\left(\begin{array}{l} X_{ВСковородТ} \dots \\ + X_{НСковородТ} \end{array} \right) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{\left(\begin{array}{l} X_{ВСковород} \dots \\ + X_{НСковородТ} \end{array} \right) + X_{ССковородБАМТ}} + X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} = -0.949$$



$$X_{4''} := \frac{(X_{2''} + X_{ЛСковородБАМТ}) \cdot X_{3''}}{(X_{2''} + X_{ЛСковородБАМТ}) + X_{3''}} = -0.966$$

$$X_{5''} := X_{4''} + X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} = 228.339$$



$$X_{6''} := X_{5''} + X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} + \frac{(X_{5''} \cdot X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ})}{X_{ВСковородТ}} = 222.06$$

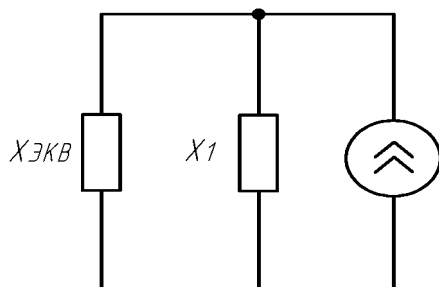
$$X_{7''} := X_{5''} + X_{ВСковородТ} + \frac{(X_{5''} \cdot X_{ВСковородТ})}{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} = -2.266 \times 10^4$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{8''} := X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} + X_{ВСковородТ} \dots = 401.157$$

$$+ \frac{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} \cdot X_{ВСковородТ}}{X_{5''}}$$

Большая Омутная/т



$$X_{ЭКВ''} := \frac{(X_{6''} + X_{7''}) \cdot X_{8''}}{(X_{6''} + X_{7''}) + X_{8''}} = 408.458$$

$$X_{1''} := X_{НСковородТ} = 312.5$$

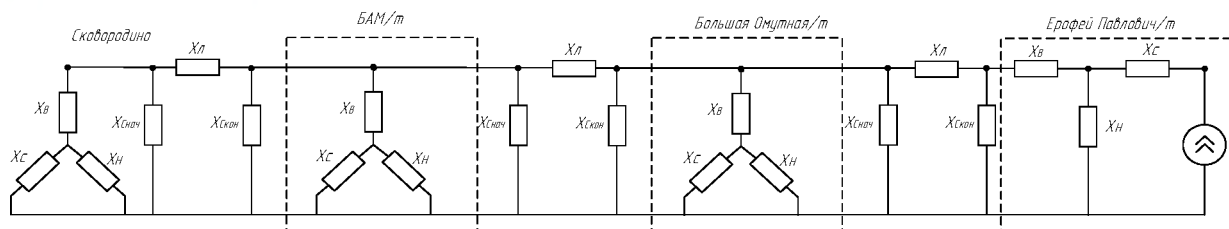
Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{БОмутнаяТ} := \sqrt{11.8^2 + (14.4)^2} = 18.617$ МВА

$$I := \frac{S_{БОмутнаяТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 9.77 \text{ кА} \cdot 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ''}}{X_{ЭКВ''} + X_{1''}} = 0.567$$

$$I_{БольшаяОмутная} := K_1 \cdot I = 5.536 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{БольшаяОмутная} := I_{БольшаяОмутная} \cdot X_{1''} = 1.73 \text{ кВ}$$



$$X_{ВЕПавловичТ} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

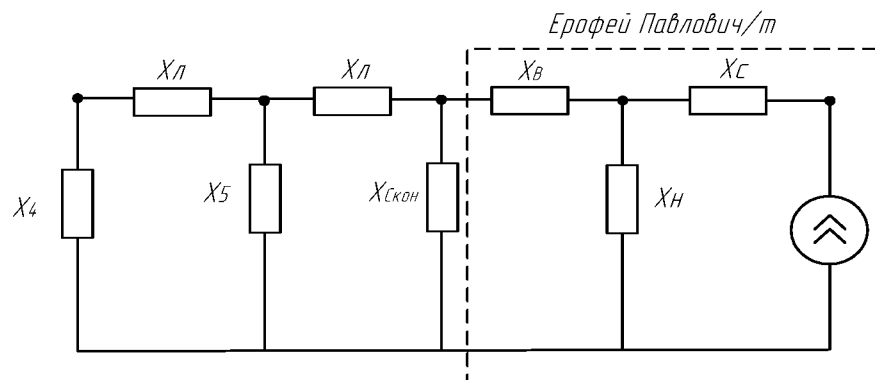
$$X_{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ} := 10.25 \cdot n$$

$$X_{СЕПавловичТ} := 0$$

$$X_{НПавловичТ} := \frac{125 \cdot n}{2} = 312.5$$

$$X_{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ} := -\left(\frac{23.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.904$$

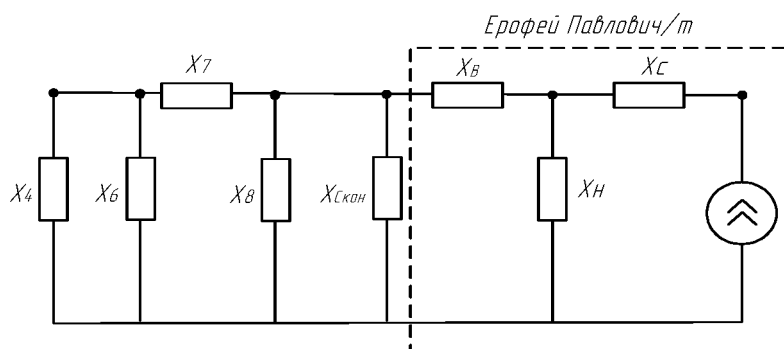
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X4 := X4'' = -0.966$$

$$X5 := \frac{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} \cdot X_{ВБольшаяОмутнаяТ}}{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} + X_{ВБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} = -2.03$$

$$X5 := \frac{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} \cdot X_{ВБольшаяОмутнаяТ}}{X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ} + X_{ВБольшаяОмутнаяТ}} + X_{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}$$

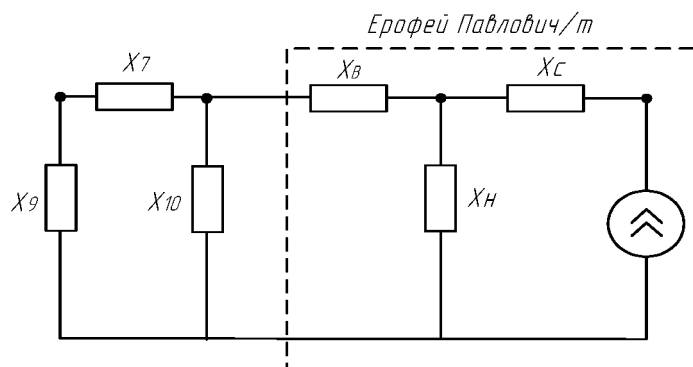


$$X6 := X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} + X5 + \frac{(X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} \cdot X5)}{X_{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} = 218.188$$

$$X7 := X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} + X_{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ} \dots = -5.506 \times 10^3$$

$$+ \frac{X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ} \cdot X_{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}{X5}$$

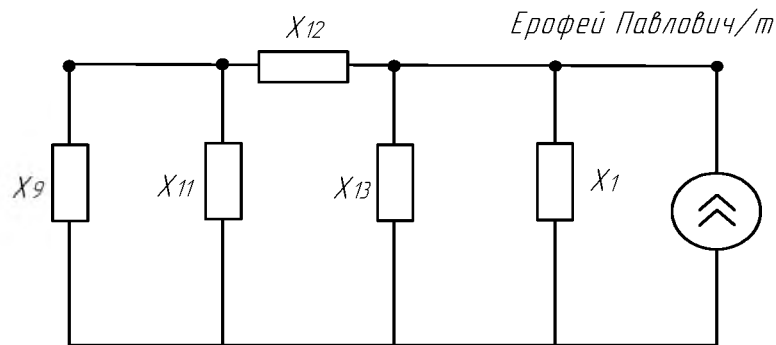
$$X8 := X_{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ} + X5 + \frac{(X_{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ} \cdot X5)}{X_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} = 48.70$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_9 := \frac{X_4 \cdot X_6}{X_4 + X_6} = -0.97$$

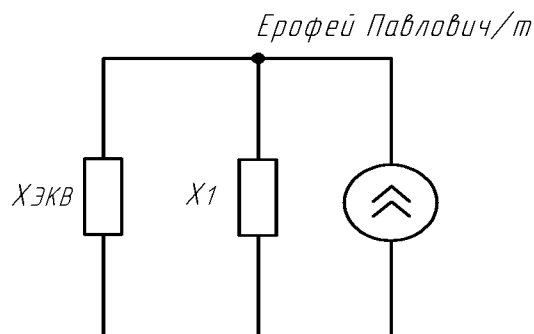
$$X_{10} := \frac{X_8 \cdot x_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X_8 + x_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = -0.921$$



$$X_{11} := X_7 + X_{10} + \frac{(X_7 + X_{10})}{X_8} = -5.62 \times 10^3$$

$$X_{12} := X_7 + X_8 + \frac{(X_7 + X_8)}{X_{10}} = 470.387$$

$$X_{13} := X_{10} + X_8 + \frac{(X_{10} + X_8)}{X_7} = 47.836$$



$$X_{14} := \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} = -0.97$$

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_{14} + X_{12}) \cdot X_{13}}{(X_{14} + X_{12}) + X_{13}} = 43.412$$

$$X_1 := x_{\text{НПавловичТ}} = 312.5$$

$$S_{\text{ЕрофейПавловичТ}} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.07 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

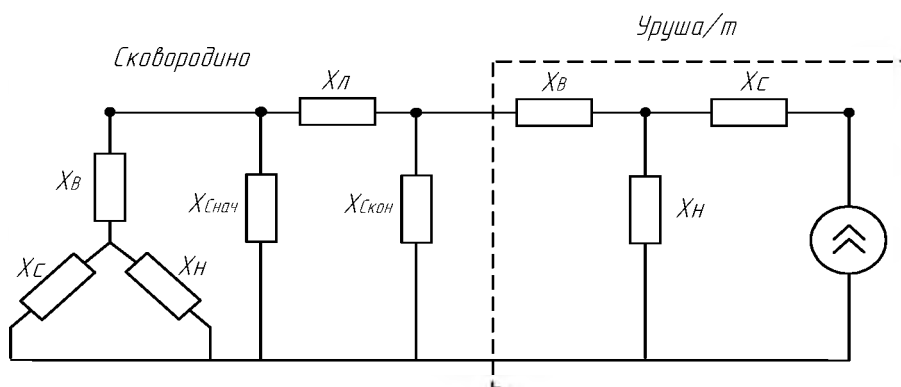
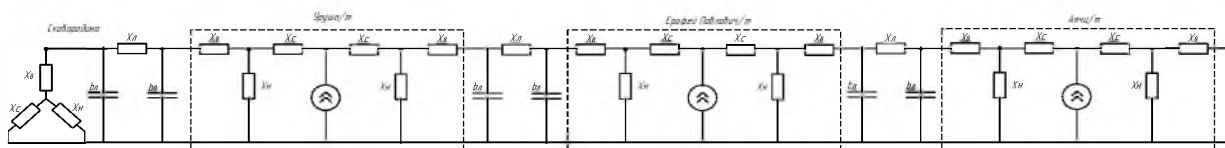
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.122$$

$$I_{1\text{ЕрофейПавлович}} := K_1 \cdot I = 2.525 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{ЕрофейПавлович}} := I_{1\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_1 = 0.079 \text{ кВ}$$

Участок сети Сквородино - Уруша/т - Ерофей Павлович/т - Аячи/т



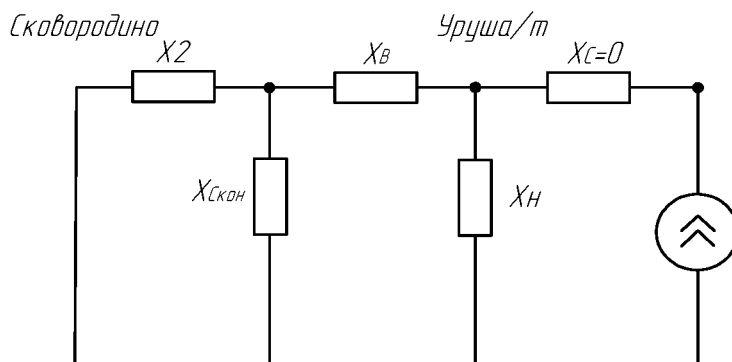
$$X_{BV\text{УрушаТ}} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{L\text{СквородУрушаТ}} := n \cdot 32.4$$

$$X_{CV\text{УрушаТ}} := 0$$

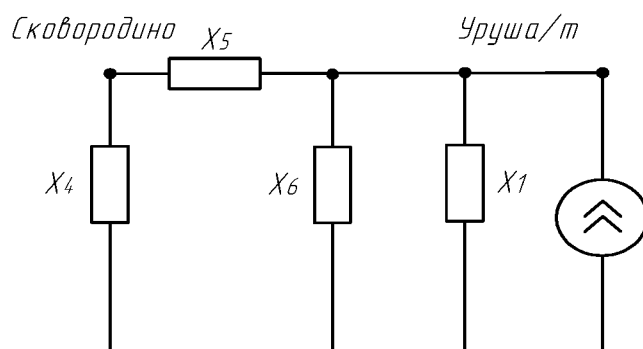
$$X_{NV\text{УрушаТ}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 312.5$$

$$X_{CS\text{СквородУрушаТ}} := -\left(\frac{75.54}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.856$$



$$X_2' := \frac{(X_{V\text{Сквород}} + X_{N\text{Сквород}}) \cdot X_{CS\text{СквородУрушаТ}}}{(X_{V\text{Сквород}} + X_{N\text{Сквород}}) + X_{CS\text{СквородУрушаТ}}} + X_{L\text{СквородУрушаТ}} = 159.133$$

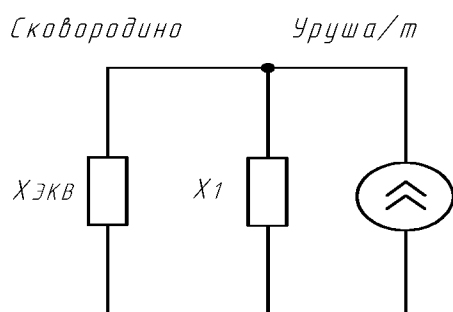
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$\underline{X4'} := X2' + X_{ССковородУрушаГ} + \frac{(X2' \cdot X_{ССковородУрушаГ})}{X_{ВУрушаГ}} = 155.175$$

$$\underline{X5'} := X2' + X_{ВУрушаГ} + \frac{(X2' \cdot X_{ВУрушаГ})}{X_{ССковородУрушаГ}} = -2.241 \times 10^4$$

$$\underline{X6'} := X_{ССковородУрушаГ} + X_{ВУрушаГ} + \frac{(X_{ССковородУрушаГ} \cdot X_{ВУрушаГ})}{X2'} = 402.241$$



$$\underline{X_{ЭКВ}'} := \frac{(X4' + X5') \cdot X6'}{(X4' + X5') + X6'} = 409.644$$

$$\underline{X1'} := X_{НУрушаГ} = 312.5$$

Нагрузка на ПС Уруша/т $\underline{S_{УрушаГ}} := \sqrt{(22.5)^2 + (24.6)^2} = 33.338 \text{ МВА}$

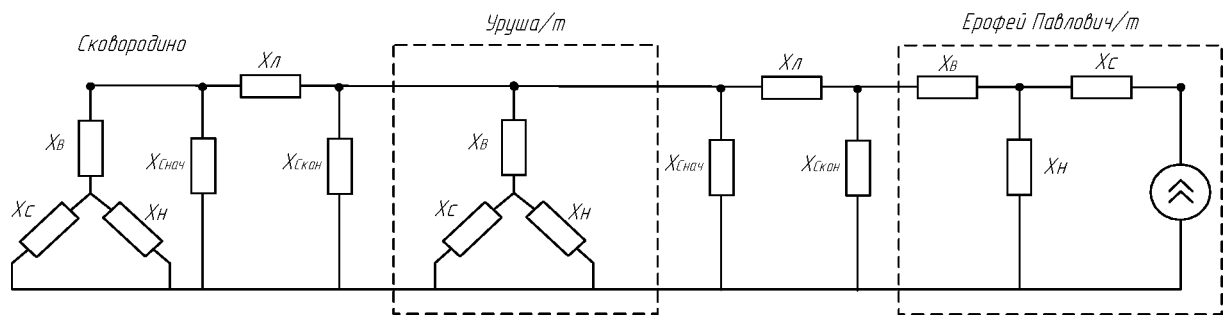
$$\underline{I} := \frac{\underline{S_{УрушаГ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta} = 8.749 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$\underline{K_1} := \frac{X_{ЭКВ}'}{X_{ЭКВ}' + X1'} = 0.567$$

$$\underline{I_{1УрушаГ}} := K_1 \cdot I = 4.963 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

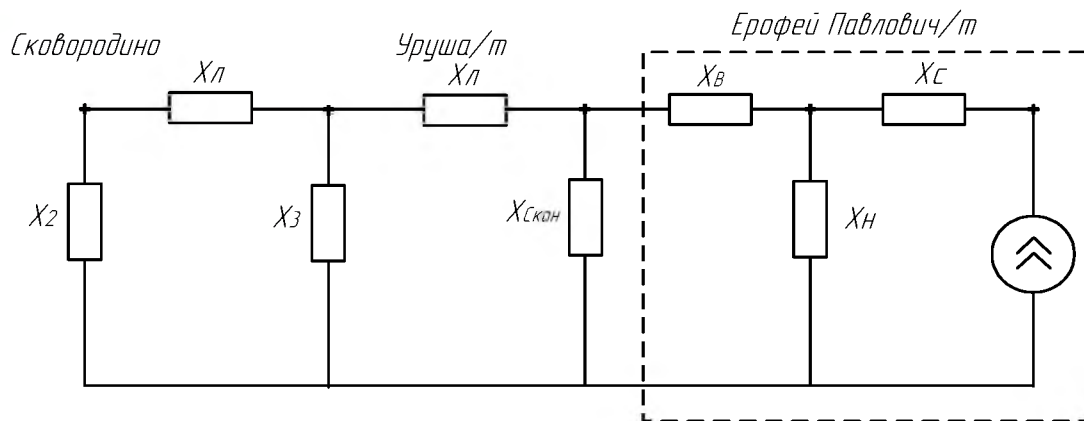
$$\underline{U_1} := I_{1УрушаГ} \cdot X1' = 1.551 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



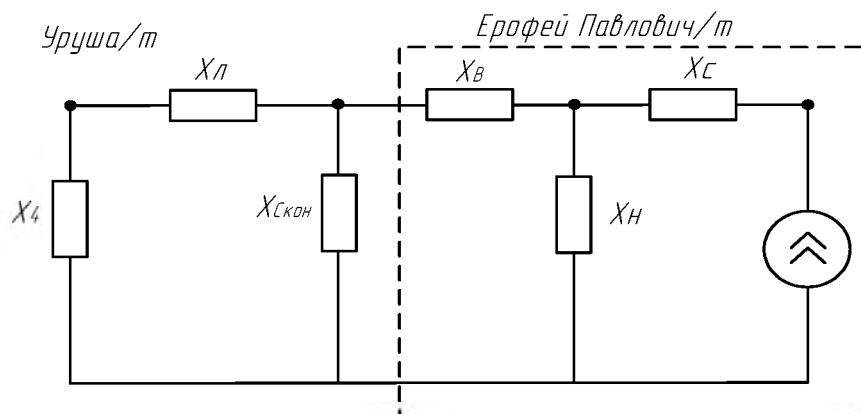
$$X_{LVУрушаТЕПавловичТ} := n \cdot 28.7$$

$$X_{CVУрушаТЕПавловичТ} := -\left(\frac{66.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.529$$



$$X_{2''} := \frac{(X_{bСковород} + X_{HСковород}) \cdot X_{cСковородУрушаТ}}{(X_{bСковород} + X_{HСковород}) + X_{cСковородУрушаТ}} = -2.867$$

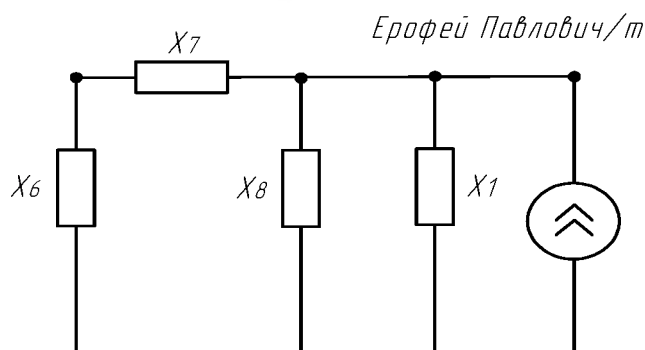
$$X_{3'''} := \frac{\frac{(X_{bУрушаТ} + X_{HУрушаТ}) \cdot X_{cСковородУрушаТ}}{(X_{bУрушаТ} + X_{HУрушаТ}) + X_{cСковородУрушаТ}} \cdot X_{cУрушаТЕПавловичТ}}{\frac{(X_{bУрушаТ} + X_{HУрушаТ}) \cdot X_{cСковородУрушаТ}}{(X_{bУрушаТ} + X_{HУрушаТ}) + X_{cСковородУрушаТ}} + X_{cУрушаТЕПавловичТ}} = -1.344$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{4''' } := \frac{(X_{2''} + X_{ЛСковородУрушаТ}) \cdot X_{3'''}}{(X_{2''} + X_{ЛСковородУрушаТ}) + X_{3'''}} = -1.355$$



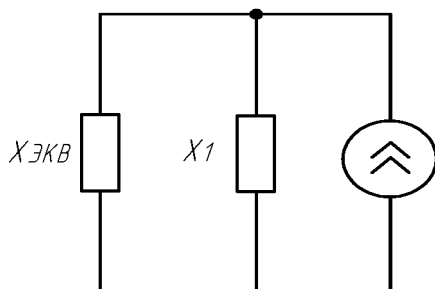
$$X_{5''' } := X_{4''' } + X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} = 142.145$$

$$X_{6''' } := X_{5''' } + X_{СУрушаТЕПавловичТ} + \frac{(X_{5''' } \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ})}{X_{ВЕПавловичТ}} = 138.744$$

$$X_{7''' } := X_{5''' } + X_{ВЕПавловичТ} + \frac{(X_{5''' } \cdot X_{ВЕПавловичТ})}{X_{СУрушаТЕПавловичТ}} = -2.263 \times 10^4$$

$$X_{8''' } := X_{СУрушаТЕПавловичТ} + X_{ВЕПавловичТ} + \frac{X_{СУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_{ВЕПавловичТ}}{X_{5'''}} = 402.631$$

Ерофей Павлович/т



$$X_{ЭКВ''' } := \frac{(X_{6''' } + X_{7'''}) \cdot X_{8'''}}{(X_{6''' } + X_{7'''}) + X_{8'''}} = 409.971$$

$$X_{1''' } := X_{НПавловичТ} = 312.5$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{ЕрофейПавловичТ} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$

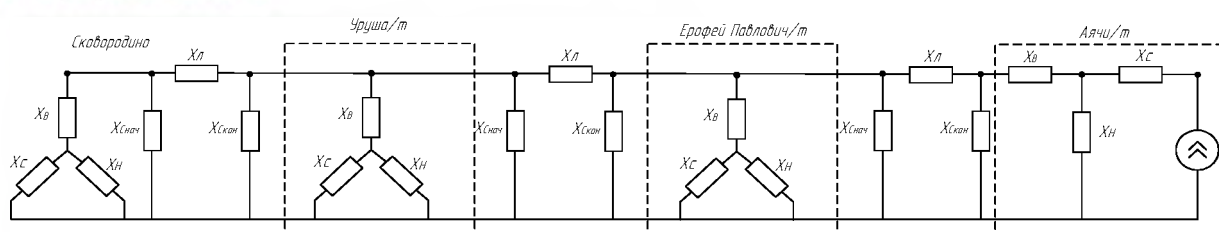
$$I := \frac{S_{ЕрофейПавловичТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 2.07 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_{1v} := \frac{X_{ЭКВ}'''}{X_{ЭКВ}''' + X1'''} = 0.567$$

$$I_{1\text{ЕрофейПавлович}2} := K_1 \cdot I = 1.175 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{1\text{ЕрофейПавлович}2} := I_{1\text{ЕрофейПавлович}2} \cdot X1''' = 0.367 \quad \text{кВ}$$



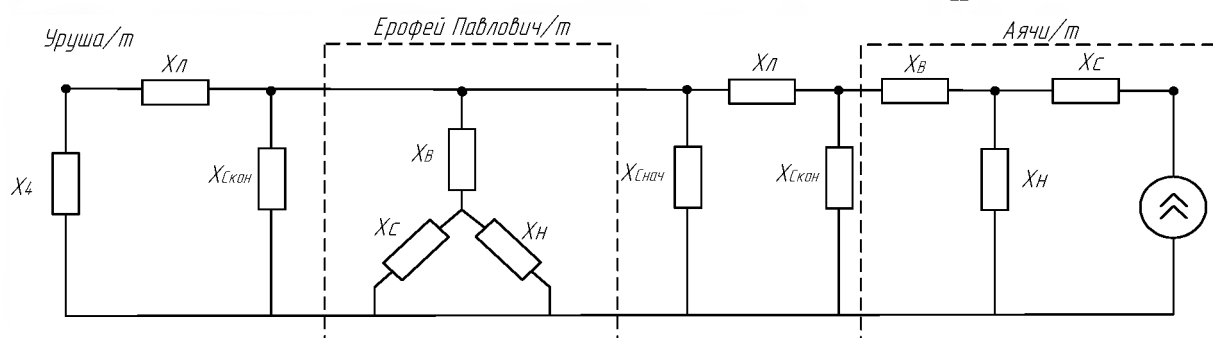
$$X_{В\text{Аячи}Т} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

$$X_{Л\text{ЕПавлович}Т\text{Аячи}Т} := n \cdot 28.7$$

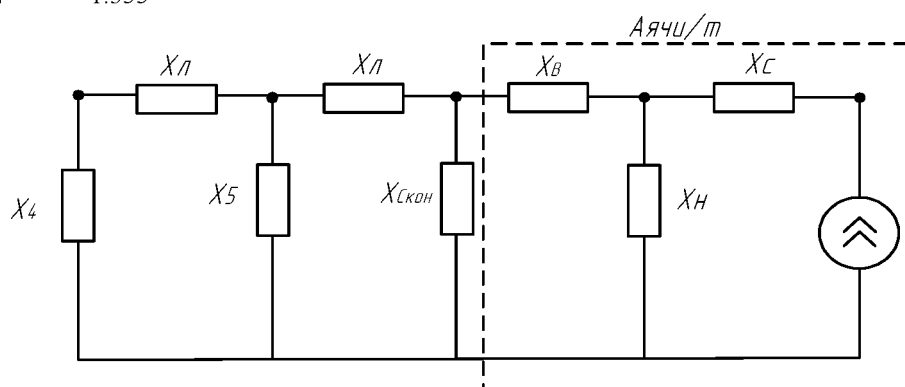
$$X_{С\Delta\text{Аячи}Т} := 0$$

$$X_{Н\Delta\text{Аячи}Т} := \frac{n \cdot 125}{2} = 312.5$$

$$X_{С\text{ЕПавлович}Т\text{Аячи}Т} := -\left(\frac{66.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.529$$

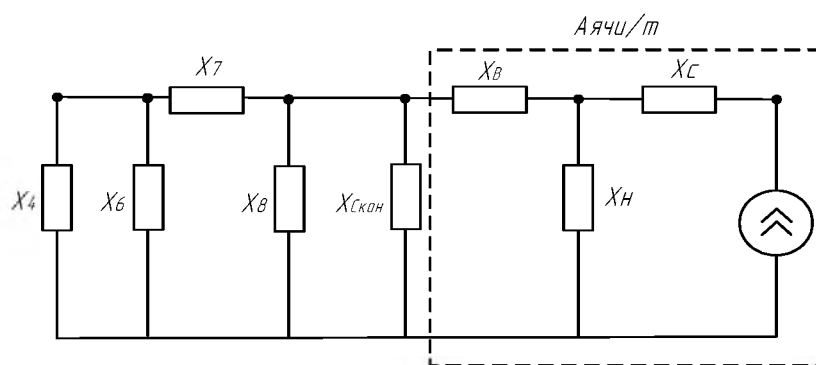


$$X_4 := X_4''' = -1.355$$



$$X_5 := \frac{\left[\frac{(X_{В\text{ЕПавлович}Т} + X_{Н\text{Павлович}Т}) \cdot X_{С\text{УрушаТЕПавлович}Т}}{(X_{В\text{ЕПавлович}Т} + X_{Н\text{Павлович}Т}) \cdot X_{С\text{УрушаТЕПавлович}Т}} \right] \cdot X_{С\text{ЕПавлович}Т\text{Аячи}Т}}{\frac{(X_{В\text{ЕПавлович}Т} + X_{Н\text{Павлович}Т}) \cdot X_{С\text{УрушаТЕПавлович}Т}}{(X_{В\text{ЕПавлович}Т} + X_{Н\text{Павлович}Т}) \cdot X_{С\text{УрушаТЕПавлович}Т}} + X_{С\text{ЕПавлович}Т\text{Аячи}Т}} = 1.6$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

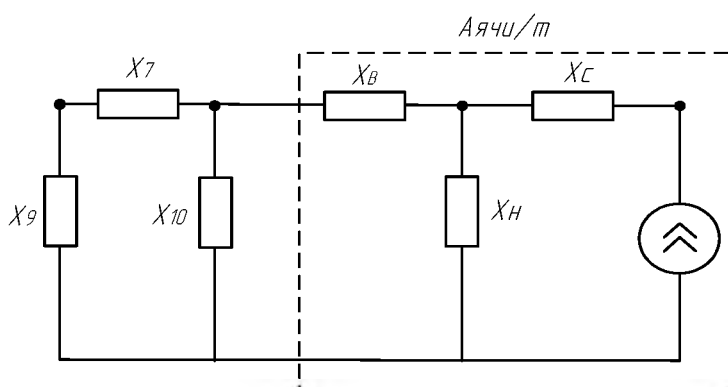


$$X6 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X5 + \frac{(X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X5)}{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}} = 146.808$$

$$X7 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X_{ЛЕПавловичТАячиТ} \dots = 1.274 \times 10^4$$

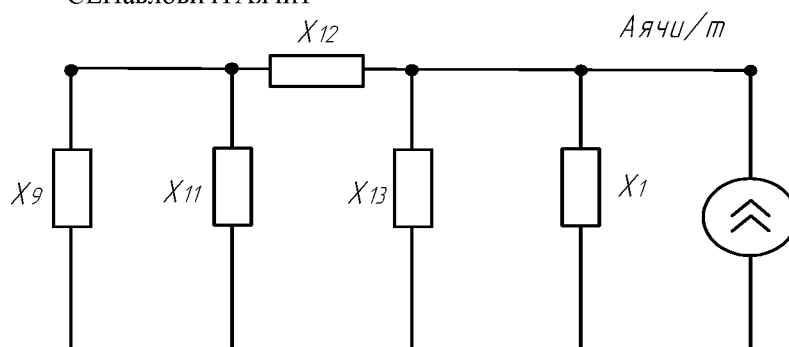
$$+ \frac{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_{ЛЕПавловичТАячиТ}}{X5}$$

$$X8 := X5 + X_{ЛЕПавловичТАячиТ} + \frac{(X5 \cdot X_{ЛЕПавловичТАячиТ})}{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ}} = 146.808$$



$$X9 := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -1.368$$

$$X10 := \frac{X8 \cdot X_{СЕПавловичТАячиТ}}{X8 + X_{СЕПавловичТАячиТ}} = -2.574$$

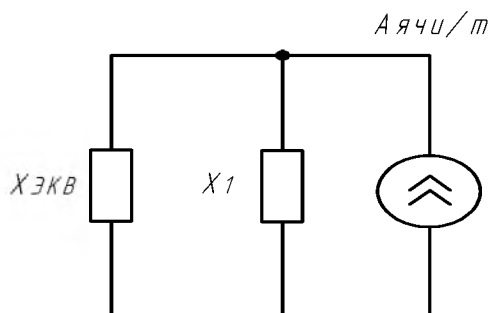


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\underline{X_{11}} := X7 + X10 + \frac{(X7 \cdot X10)}{X8} = 1.251 \times 10^4$$

$$\underline{X_{12}} := X7 + X8 + \frac{(X7 \cdot X8)}{X10} = -7.137 \times 10^5$$

$$\underline{X_{13}} := X8 + X10 + \frac{(X8 \cdot X10)}{X7} = 144.204$$



$$\underline{X_{\text{ЭКВ}}''} := \frac{\left(X_{12} + \frac{X9 \cdot X_{11}}{X9 + X_{11}} \right) \cdot X_{13}}{\left(X_{12} + \frac{X9 \cdot X_{11}}{X9 + X_{11}} \right) + X_{13}} = 144.234$$

$$\underline{X1} := X_{\text{НАЯЧИТ}}$$

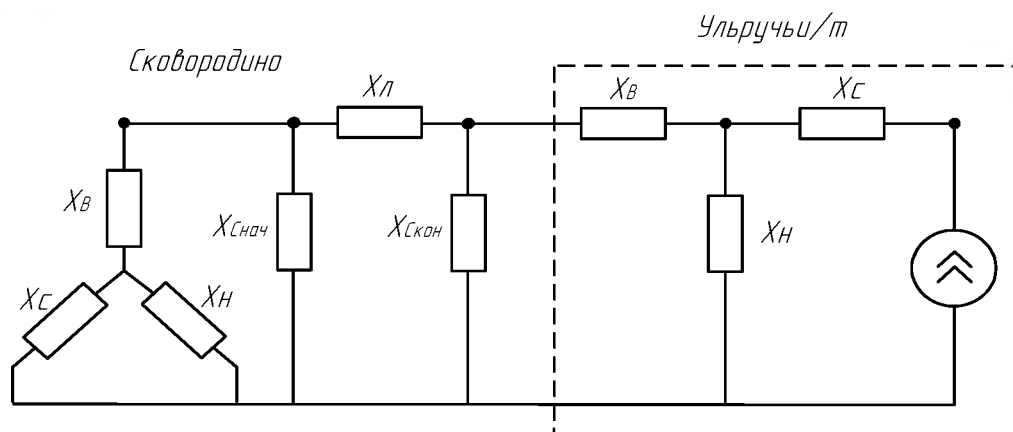
Нагрузка на ПС Аячи/т $\underline{S_{\text{АячиТ}}} := \sqrt{(9.9)^2 + (12)^2} = 15.557 \text{ МВА}$

$$\underline{I} := \frac{S_{\text{АячиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 8.165 \times \text{кА}^3$$

$$\underline{K_1} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}''}{X_{\text{ЭКВ}}'' + X1} = 0.316$$

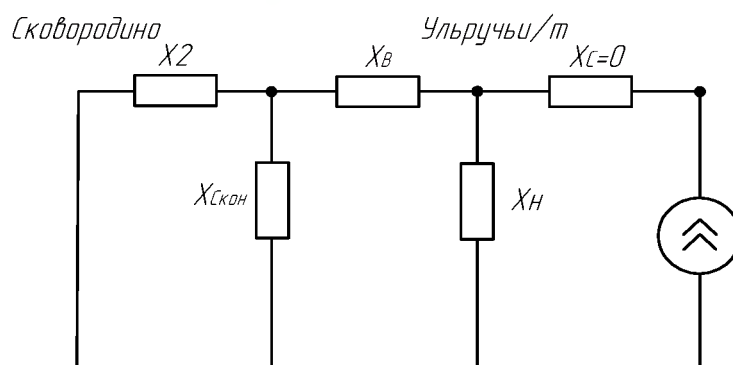
$$\underline{I_{1\text{АячиТ}}} := K_1 \cdot I = 2.578 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$\underline{U_{1\text{Аячи}} := I_{1\text{АячиТ}} \cdot X1 = 0.806 \text{ кВ}$$

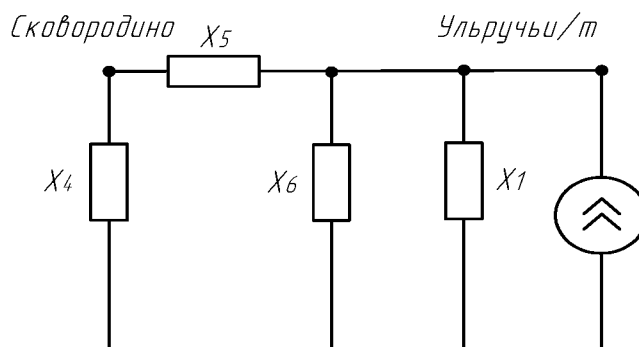


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\begin{aligned}
 X_{ВульручьГ} &:= \frac{n \cdot 165}{2} & X_{ЛСковородиноУльручьГ} &:= n \cdot 10.67 \\
 X_{СВульручьГ} &:= 0 & X_{ССковородиноУльручьГ} &:= -\left(\frac{25.83}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.977 \\
 X_{НУльручьГ} &:= \frac{n \cdot 125}{2} = 312.5 & &
 \end{aligned}$$



$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноУльручьГ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноУльручьГ} + X_{ЛСковородиноУльручьГ}} \dots = 52.372$$



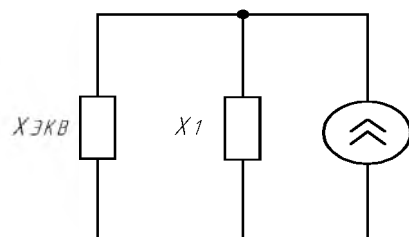
$$X_4 := X_2 + X_{ССковородиноУльручьГ} + \frac{(X_2 \cdot X_{ССковородиноУльручьГ})}{X_{ВульручьГ}} = 51.272$$

$$X_5 := X_2 + X_{ВульручьГ} + \frac{(X_2 \cdot X_{ВульручьГ})}{X_{ССковородиноУльручьГ}} = -2.166 \times 10^4$$

$$X_6 := X_{ССковородиноУльручьГ} + X_{ВульручьГ} \dots = 403.832 + \frac{X_{ССковородиноУльручьГ} \cdot X_{ВульручьГ}}{X_2}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Сковородино Ульручьи/т



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 411.523$$

$$X1 := X_{НУльручьиТ} = 312.5$$

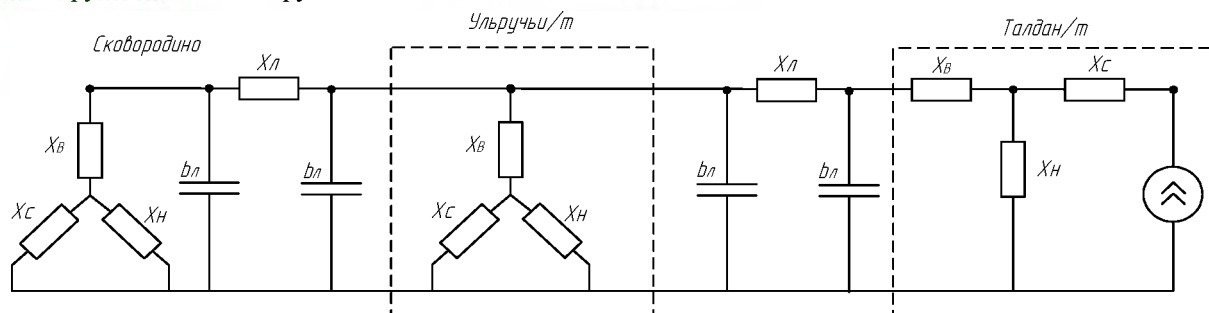
Нагрузка на ПС Ульручьи/т $S_{УльручьиТ} := \sqrt{(11.1)^2 + (8.6)^2} = 14.042 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{УльручьиТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = \text{кА} \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X1} = 0.568$$

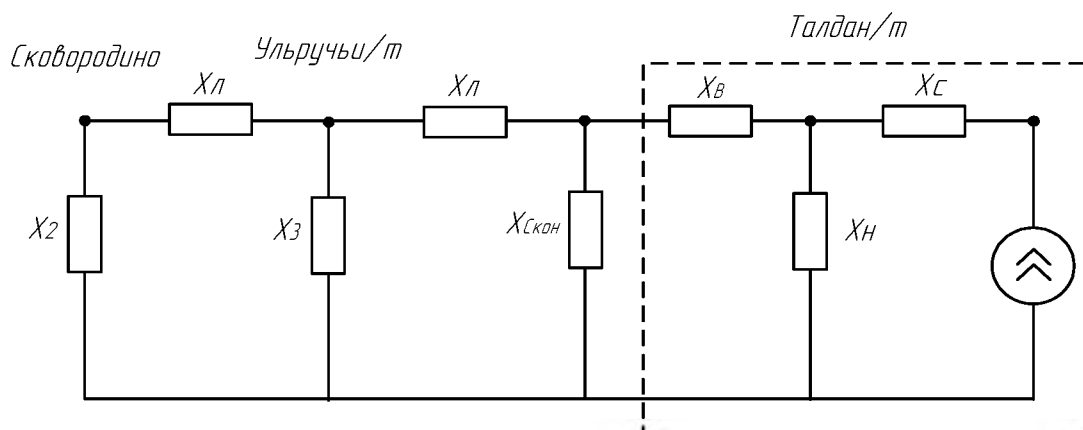
$$I_{1УльручьиТ} := K_1 \cdot I = 4.189 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1УльручьиТ} := I_{1УльручьиТ} \cdot X1 = 1.309 \text{ кВ}$$



$$X_{СВУльручьиТТалданТ} := -\left(\frac{48.04}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.816$$

$$X_{ЛУльручьиТТалданТ} := n \cdot 19.36$$

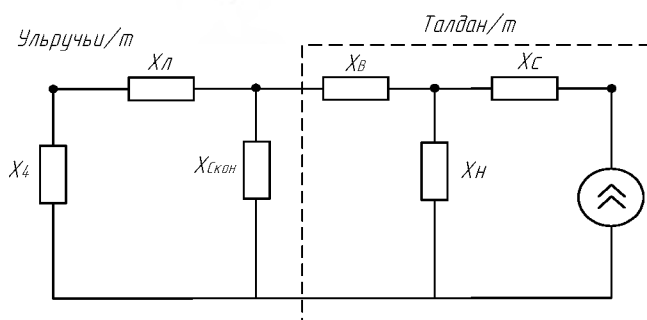


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

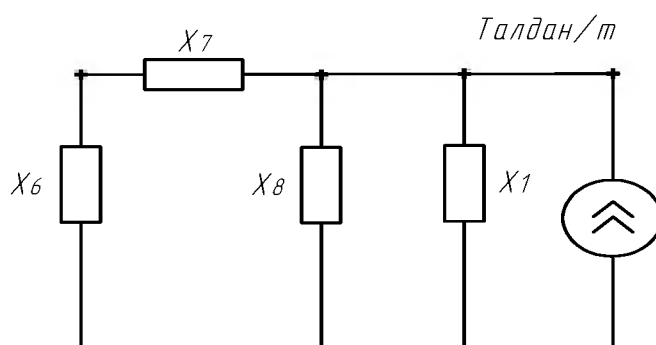
Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноУльручьГ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноУльручьГ}} = -0.978$$

$$X3 := \frac{\frac{(X_{ВТалданГ} + X_{НТалданГ}) \cdot X_{ССковородиноУльручьГ}}{(X_{ВТалданГ} + X_{НТалданГ}) + X_{ССковородиноУльручьГ}} \cdot X_{СУльручьГТалданГ}}{\frac{(X_{ВТалданГ} + X_{НТалданГ}) \cdot X_{ССковородиноУльручьГ}}{(X_{ВТалданГ} + X_{НТалданГ}) + X_{ССковородиноУльручьГ}} + X_{СУльручьГТалданГ}} = -0.63$$



$$X4 := \frac{(X_{ЛСковородиноУльручьГ} + X2) \cdot X3}{(X_{ЛСковородиноУльручьГ} + X2) + X3} = -0.643$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{ЛУльручьГТалданГ}) + X_{ССковородиноУльручьГ} \dots}{(X4 + X_{ЛУльручьГТалданГ}) \cdot X_{ССковородиноУльручьГ}} = 94.99$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{ЛУльручьГТалданГ}) + X_{ВТалданГ} \dots}{(X4 + X_{ЛУльручьГТалданГ}) \cdot X_{ВТалданГ}} = -4.815 \times 10^4$$

$$X8 := \frac{(X_{ССковородиноУльручьГ}) + X_{ВТалданГ} \dots}{X4 + X_{ЛУльручьГТалданГ}} = 488.996$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_6 + X_7) \cdot X_8}{(X_6 + X_7) + X_8} = 494.023$$

$$X_1 := X_{\text{ВТалданТ}} = 495$$

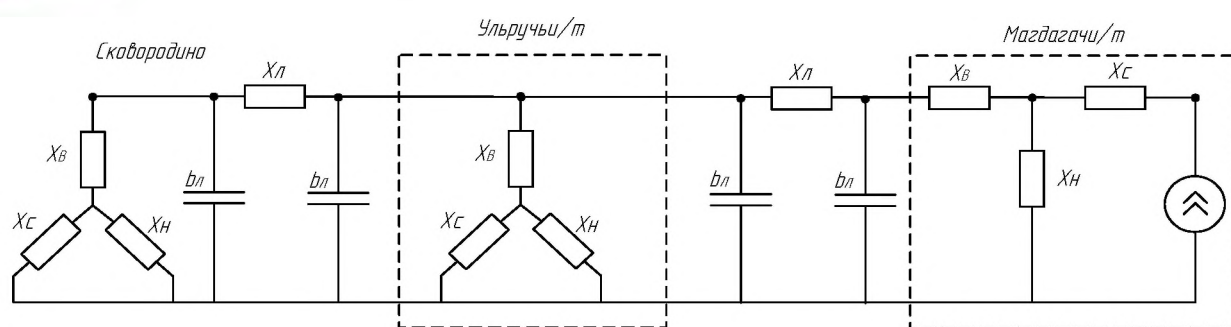
Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{ТалданТ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{ТалданТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.494 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.5$$

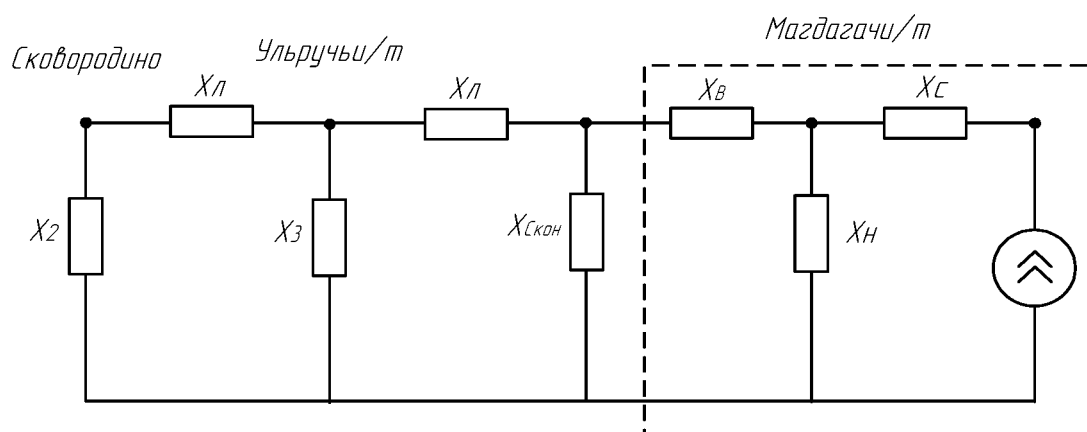
$$I_{1\text{Талдан}} := K_1 \cdot I = 1.246 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Талдан}} := I_{1\text{Талдан}} \cdot X_1 = 0.617 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}} := n \cdot 54.14$$

$$X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} := -\left(\frac{\frac{125.7}{2.645}}{2}\right) \cdot \frac{1}{n} = -4.752$$

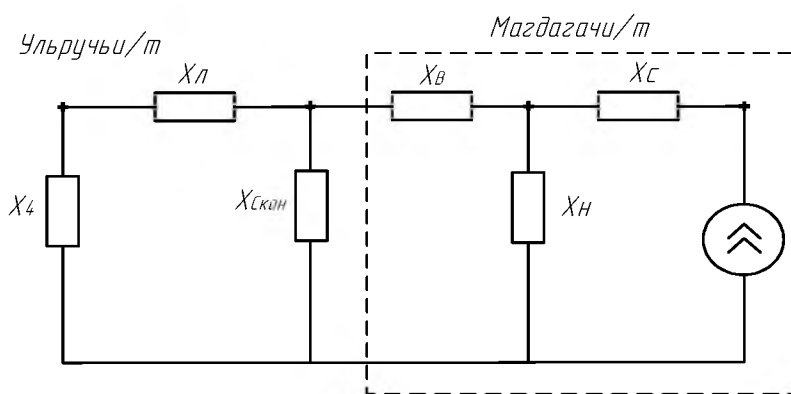


$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}} = -0.978$$

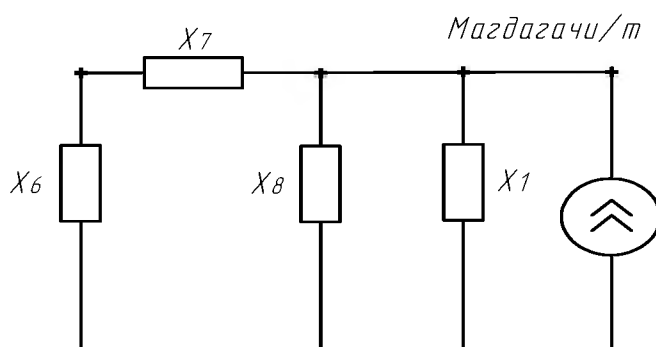
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X3 := \frac{\left(X_{\text{ВульручьТ}} \dots + X_{\text{НУльручьТ}} \right) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьТ}}}{\left(X_{\text{ВульручьТ}} + X_{\text{НУльручьТ}} \right) \dots + X_{\text{ССковородиноУльручьТ}}} \cdot X_{\text{СУльручьТМагдагачи}} = -0.811$$



$$X4 := \frac{\left(X_{\text{ЛСковородиноУльручьТ}} + X2 \right) \cdot X3}{\left(X_{\text{ЛСковородиноУльручьТ}} + X2 \right) + X3} = -0.824$$



$$X6 := \left(X4 + X_{\text{ЛУльручьТМагдагачи}} \right) + X_{\text{СУльручьТМагдагачи}} \dots = 259.942$$

$$+ \frac{\left(X4 + X_{\text{ЛУльручьТМагдагачи}} \right) \cdot X_{\text{СУльручьТМагдагачи}}}{X_{\text{ВМагдагачиТ}}}$$

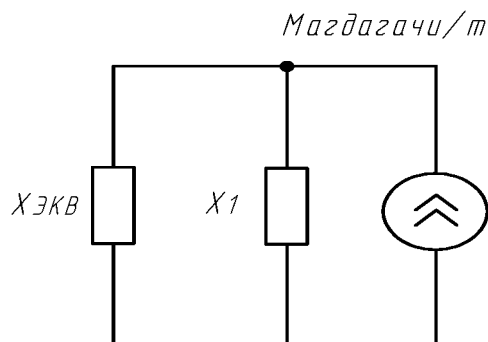
$$X7 := \left(X4 + X_{\text{ЛУльручьТМагдагачи}} \right) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots = -1.354 \times 10^4$$

$$+ \frac{\left(X4 + X_{\text{ЛУльручьТМагдагачи}} \right) \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}}}{X_{\text{СУльручьТМагдагачи}}}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X8 := \left(X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} \right) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots = 238.389$$

$$+ \frac{X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}}}{X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}}}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 242.748$$

$$X1 := X_{\text{НМагдагачиТ}} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

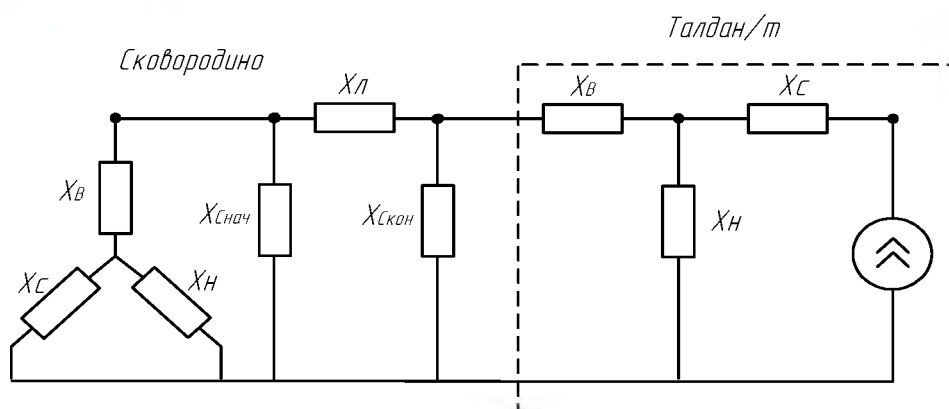
$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.434 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X1} = 0.564$$

$$I_{\text{Магдагачи}} := K1 \cdot I = 1.938 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

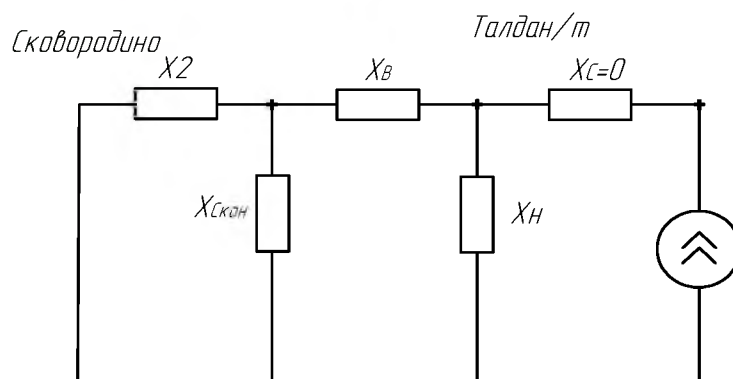
$$U_{\text{Магдагачи}} := I_{\text{Магдагачи}} \cdot X1 = 0.363 \text{ кВ}$$



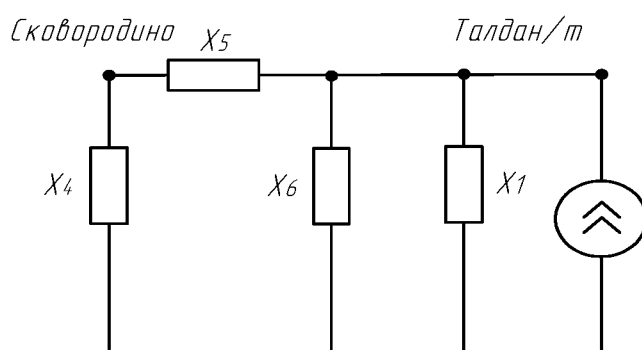
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{L\text{СковородиноТалданТ}} := n \cdot 27.96$$

$$X_{C\text{СковородиноТалданТ}} := -\left(\frac{69.6}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.631$$



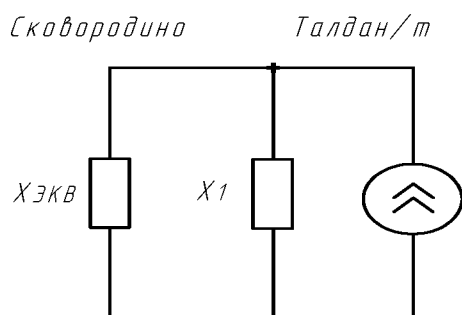
$$X_2 := \frac{(X_{B\text{Сковород}} + X_{H\text{Сковород}}) \cdot X_{C\text{СковородиноТалданТ}}}{(X_{B\text{Сковород}} + X_{H\text{Сковород}}) + X_{C\text{СковородиноТалданТ}}} = -2.641$$



$$X_4 := X_2 + X_{C\text{СковородиноТалданТ}} + \frac{(X_2 \cdot X_{C\text{СковородиноТалданТ}})}{X_{B\text{ТалданТ}}} = -5.258$$

$$X_5 := X_2 + X_{B\text{ТалданТ}} + \frac{(X_2 \cdot X_{B\text{ТалданТ}})}{X_{C\text{СковородиноТалданТ}}} = 989.105$$

$$X_6 := X_{B\text{ТалданТ}} + X_{C\text{СковородиноТалданТ}} + \frac{(X_{B\text{ТалданТ}} \cdot X_{C\text{СковородиноТалданТ}})}{X_2} = 985.63$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 492.369$$

$$X_1 := X_{\text{НТГалданТ}} = 375$$

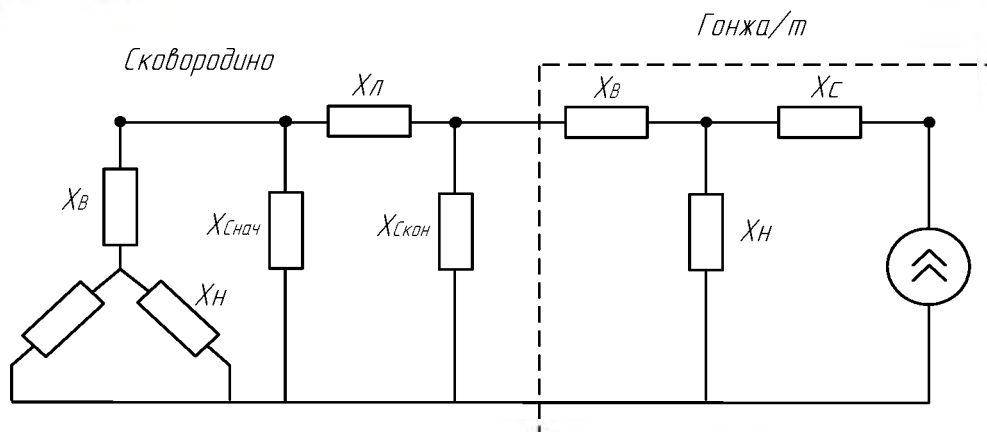
Нагрузка на ПС Талдан/Т $S_{\text{ТалданТ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{ТалданТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.494 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.568$$

$$I_{\text{Талдан2}} := K_1 \cdot I = 1.415 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

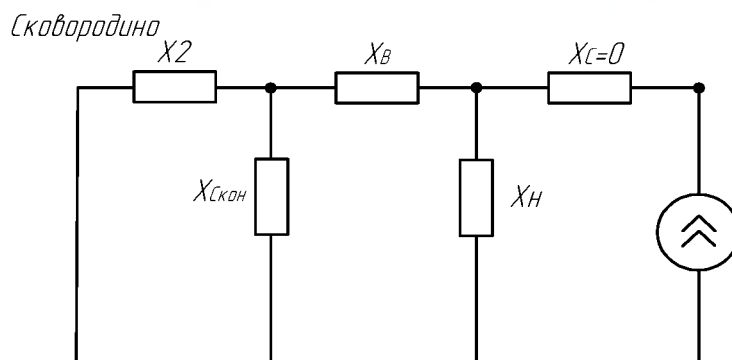
$$U_{\text{Талдан2}} := I_{\text{Талдан2}} \cdot X_1 = 0.531 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{вГонжаТ}} := \frac{165 \cdot n}{2} = 412.5 \quad X_{\text{лСковородиноГонжаТ}} := n \cdot 46.08$$

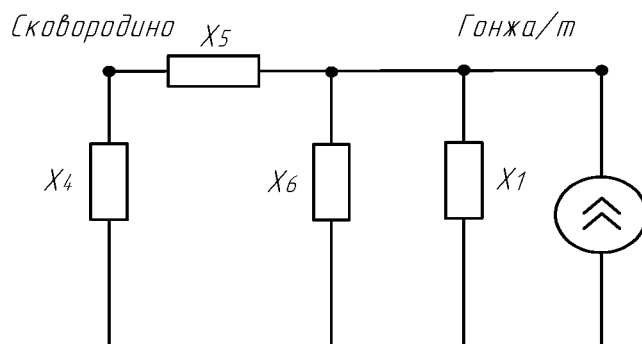
$$X_{\text{сГонжаТ}} := 0$$

$$X_{\text{нГонжаТ}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 312.5 \quad X_{\text{сСковородиноГонжаТ}} := -\left(\frac{115.2}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -4.355$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

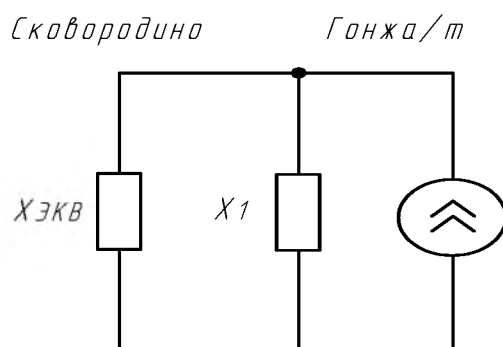
$$X2 := \frac{(X_{ВСквород} + X_{НСквород}) \cdot X_{ССквородиноГонжаТ}}{(X_{ВСквород} + X_{НСквород}) + X_{ССквородиноГонжаТ}} = -4.381$$



$$X4 := X2 + X_{ССквородиноГонжаТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ССквородиноГонжаТ})}{X_{ВГонжаТ}} = -8.69$$

$$X5 := X2 + X_{ВГонжаТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ВГонжаТ})}{X_{ССквородиноГонжаТ}} = 823.032$$

$$X6 := X_{ВГонжаТ} + X_{ССквородиноГонжаТ} + \frac{(X_{ВГонжаТ} \cdot X_{ССквородиноГонжаТ})}{X2} = 818.246$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 408.145$$

$$X1 := X_{НГонжаТ} = 312.5$$

Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{ГонжаТ} := \sqrt{(4.9)^2 + (8.2)^2} = 9.552 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{ГонжаТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 2.507 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

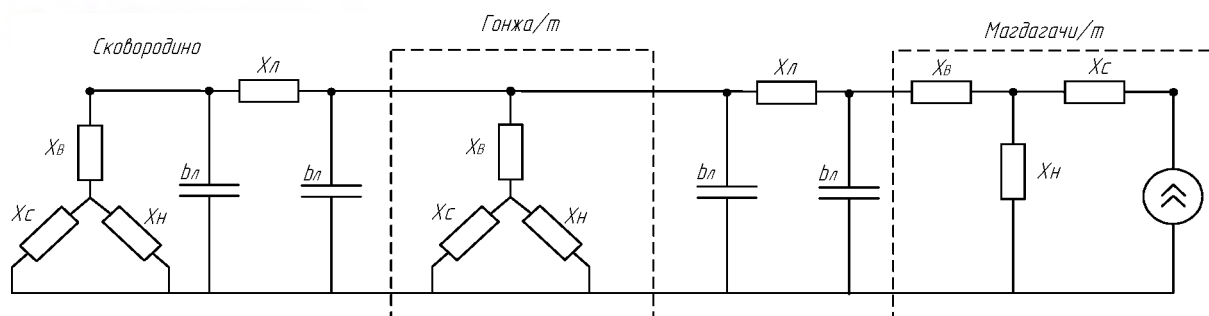
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.566 \quad \text{кВ}$$

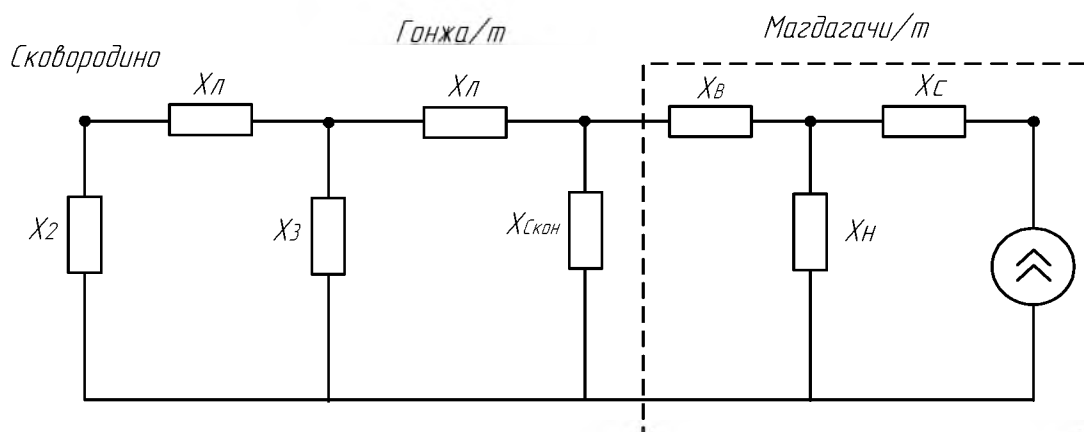
$$I_{\text{Гонжа}} := K_1 \cdot I = 1.42 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{\text{Гонжа}} := I_{\text{Гонжа}} \cdot X_1 = 0.444 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}} := n \cdot 14.38$$

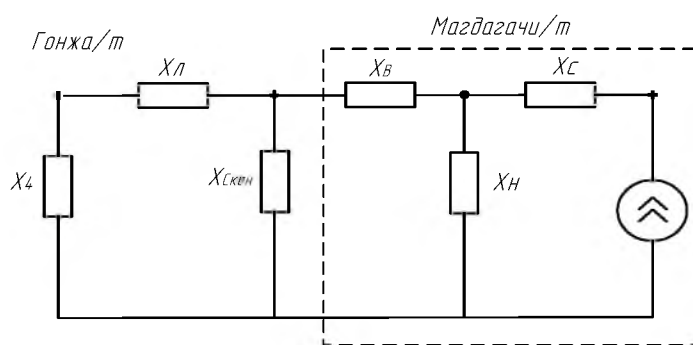
$$X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} := -\left(\frac{\frac{35.95}{2.645}}{2}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.359$$



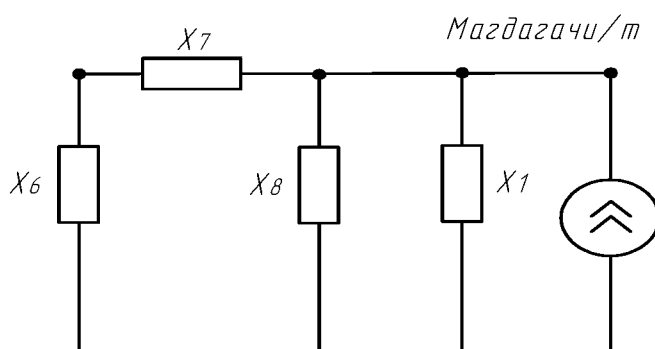
$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}} = -4.381$$

$$X_3 := \frac{\frac{(X_{\text{ВГонжаТ}} + X_{\text{НГонжаТ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}}{(X_{\text{ВГонжаТ}} + X_{\text{НГонжаТ}}) + X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}} \cdot X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}}{\frac{(X_{\text{ВГонжаТ}} + X_{\text{НГонжаТ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}}{(X_{\text{ВГонжаТ}} + X_{\text{НГонжаТ}}) + X_{\text{ССковородиноГонжаТ}}} + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}} = -1.037$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



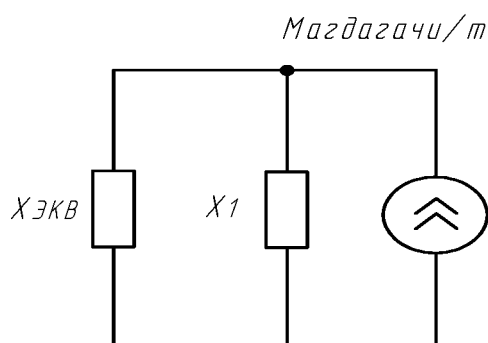
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛсквородиноГонжаТ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛсквородиноГонжаТ}} + X2) + X3} = -1.042$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \dots = 69.11}{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} + X_{\text{ВМагдагачиТ}}}$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots = -1.258 \times 10^4}{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}} + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}}$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots = 241.393}{X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}} + X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}}$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 246.141$$

$$X1 := X_{\text{НМагдагачиГ}} = 187.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{\text{МагдагачиГ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиГ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.434 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X1} = 0.568$$

$$I_{1\text{Магдагачи2}} := K_1 \cdot I = 1.949 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи2}} := I_{1\text{Магдагачи2}} \cdot X1 = 0.365 \text{ кВ}$$

Суммарный ток пятой гармоники на ПС Сковородино, кА:

$$I_{5\Sigma} := \sqrt{I_{1\text{СковородиноГ}}^2 + (I_{1\text{БАМ}}^2) + (I_{1\text{БольшаяОмутная}}^2) \dots = 0.012$$

$$+ I_{1\text{ЕрофейПавлович}}^2 \dots$$

$$+ I_{1\text{УрушаГ}}^2 + I_{1\text{ЕрофейПавлович2}}^2 + I_{1\text{АячиГ}}^2 + I_{1\text{УльручьиГ}}^2 \dots$$

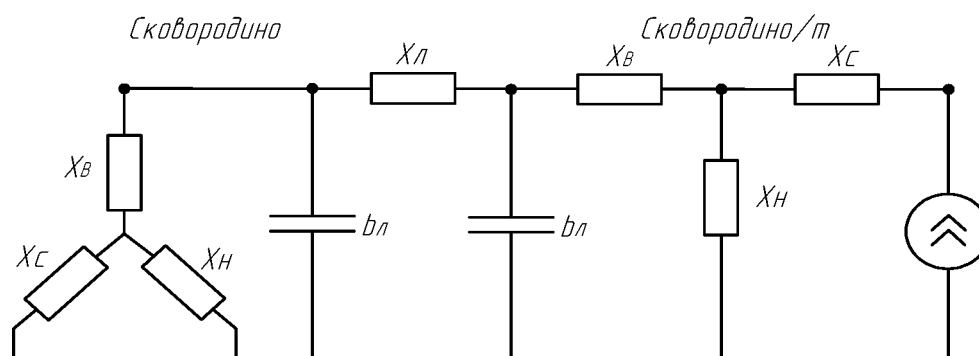
$$+ I_{1\text{Талдан}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}}^2 + I_{1\text{Талдан2}}^2 + I_{1\text{Гонжа}}^2 + I_{1\text{Магдагачи2}}^2$$

Напряжение пятой гармоники на ПС Сковородино, кВ:

$$U_{5\Sigma} := I_{5\Sigma} \cdot (X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) = 8.89$$

7 Гармоника

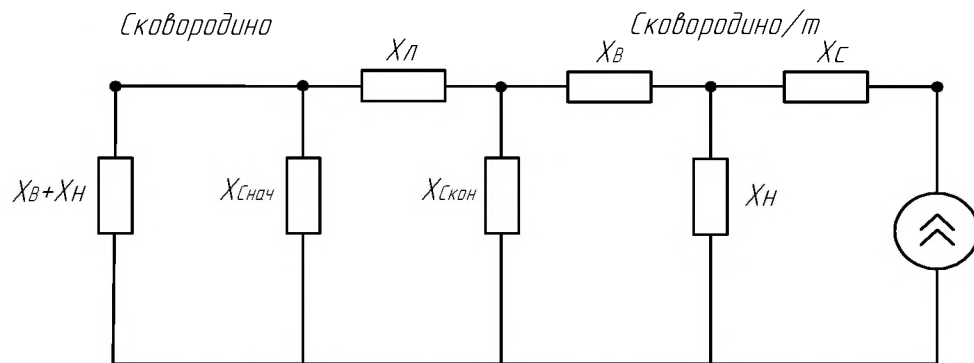
$$n := 7$$



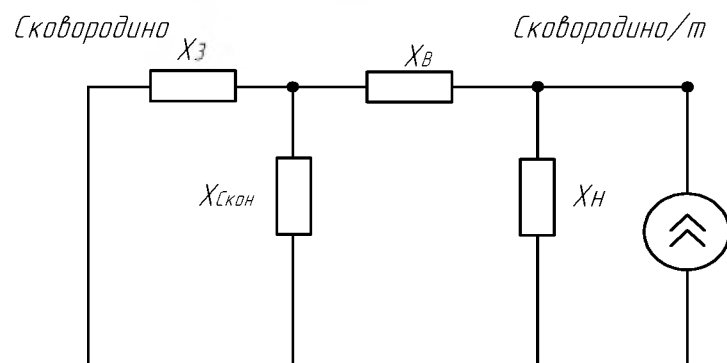
Сопротивления элементов схемы замещения, Ом:

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

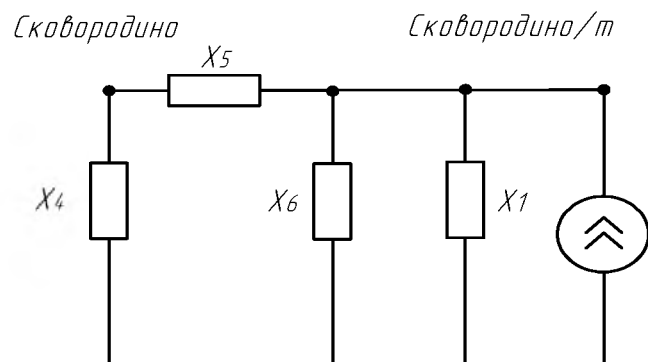
$$\begin{aligned}
 X_{ВС\text{Сковород}} &:= \frac{104 \cdot n}{2} & X_{ЛС\text{СковородСковородТ}} &:= 1.137 \cdot n & X_{ВС\text{СковородТ}} &:= \frac{165 \cdot n}{2} \\
 X_{СС\text{Сковород}} &:= 0 & b_{ЛС\text{СковородСковородТ}} &:= 28.05 & X_{СС\text{СковородТ}} &:= 0 \\
 X_{НС\text{Сковород}} &:= \frac{195.6 \cdot n}{2} = 684.6 & & & X_{НС\text{СковородТ}} &:= \frac{125 \cdot n}{2} = 437.5
 \end{aligned}$$



$$X_{СС\text{СковородСковородТ}} := -\left(\frac{\frac{5.3}{2.645}}{4}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.072$$



$$X_2 := \frac{(X_{ВС\text{Сковород}} + X_{НС\text{Сковород}}) \cdot X_{СС\text{СковородСковородТ}}}{(X_{ВС\text{Сковород}} + X_{НС\text{Сковород}}) + X_{СС\text{СковородСковородТ}}} + X_{ЛС\text{СковородСковородТ}} = 7.887$$



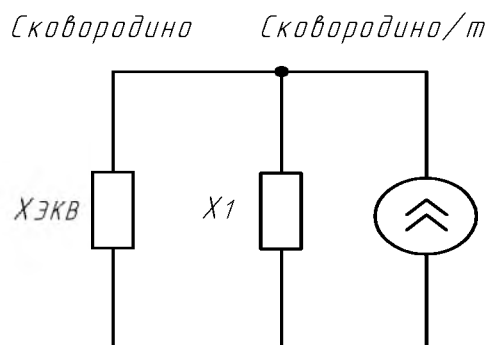
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_4 := X_3 + X_{\text{ССковородСковородГ}} + \frac{(X_3 \cdot X_{\text{ССковородСковородГ}})}{X_{\text{ВСковородГ}}} = 7.815$$

$$X_5 := X_3 + X_{\text{ВСковородГ}} + \frac{(X_3 \cdot X_{\text{ВСковородГ}})}{X_{\text{ССковородСковородГ}}} = -6.306 \times 10^4$$

$$X_6 := X_{\text{ССковородСковородГ}} + X_{\text{ВСковородГ}} + \frac{(X_{\text{ССковородСковородГ}} \cdot X_{\text{ВСковородГ}})}{X_3} = 572.1$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 577.428$$

$$X_1 := X_{\text{НСковородГ}} = 437.5$$

Нагрузка на ПС Сковородино/т $S_{\text{СковородиноГ}} := \sqrt{11^2 + 11.9^2} = 16.205 \text{ МВА}$

$$U_{\text{НОМ}} := 220 \text{ кВ}$$

$$I := \frac{S_{\text{СковородиноГ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot \eta} = 6.075 \times \text{кА}^{-3}$$

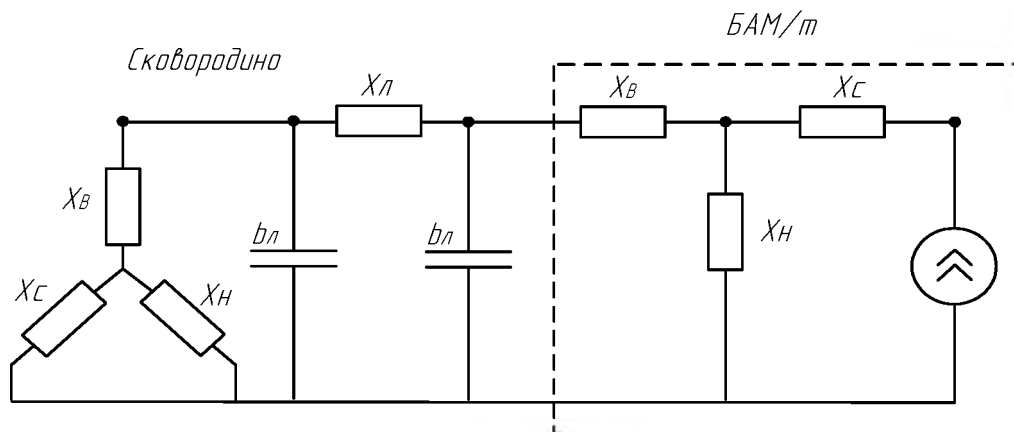
$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.569$$

$$I_{\text{СковородиноГ}} := K_1 \cdot I = 3.457 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{СковородиноГ}} := I_{\text{СковородиноГ}} \cdot X_1 = 1.512 \text{ кВ}$$

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



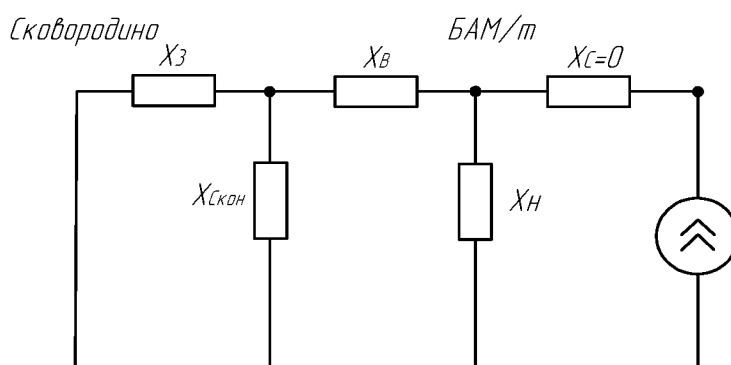
$$X_{ЛСковородБАМТ} := 11.094 \cdot n$$

$$X_{ВБАМТ} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{ССковородБАМТ} := -\left(\frac{25.86}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.698$$

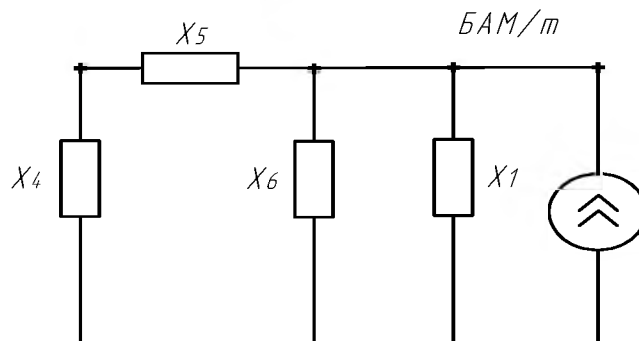
$$X_{СБАМТ} := 0$$

$$X_{НБАМТ} := \frac{125 \cdot n}{2} = 437.5$$



$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородБАМТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородБАМТ}} = -0.699$$

$$X_3' := X_2 + X_{ЛСковородБАМТ} = 76.959$$



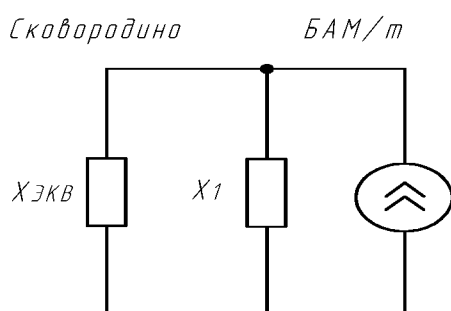
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{4'} := X_{3'} + X_{СС\text{сковородБАМТ}} + \frac{(X_{3'} \cdot X_{СС\text{сковородБАМТ}})}{X_{ВБамТ}} = 76.168$$

$$X_{5'} := X_{3'} + X_{ВС\text{сковородТ}} + \frac{(X_{3'} \cdot X_{ВБамТ})}{X_{СС\text{сковородБАМТ}}} = -6.299 \times 10^4$$

$$X_{6'} := X_{СС\text{сковородБАМТ}} + X_{ВС\text{сковородТ}} + \frac{(X_{СС\text{сковородБАМТ}} \cdot X_{ВБамТ})}{X_{3'}} = 571.561$$



$$X_{\text{ЭКВ}'} := \frac{(X_{4'} + X_{5'}) \cdot X_{6'}}{(X_{4'} + X_{5'}) + X_{6'}} = 576.802$$

$$X_{1'} := X_{НБамТ} = 437.5$$

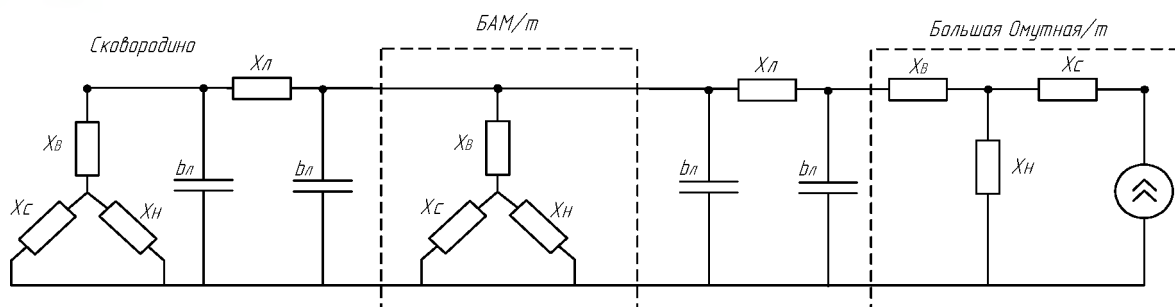
Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМТ}'} := \sqrt{(16.6)^2 + 24^2} = 29.182 \text{ МВА}$

$$I' := \frac{S_{\text{БАМТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.011 \text{ кА}$$

$$K_{1'} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.569$$

$$I_{1\text{БАМТ}'} := K_1 \cdot I = 3.457 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

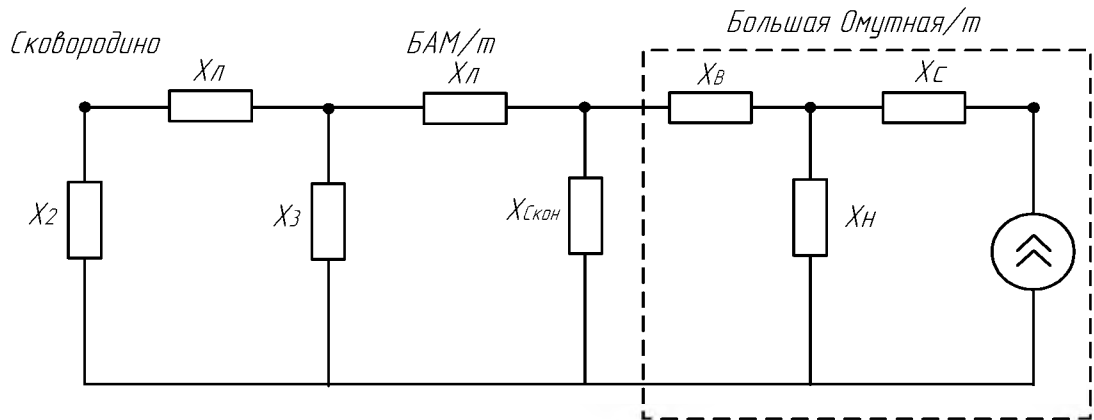
$$U_{1\text{БАМТ}'} := I_{1\text{БАМТ}} \cdot X_1 = 1.512 \text{ кВ}$$



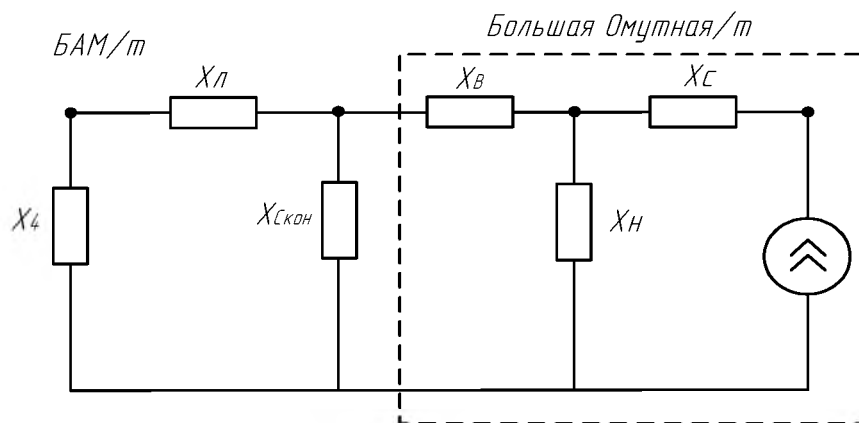
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\begin{aligned}
 X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяГ}} &:= n \cdot 45.861 & X_{\text{ВБольшаяОмутнаяГ}} &:= \frac{165 \cdot n}{2} \\
 X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяГ}} &:= -\left(\frac{106.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.887 & X_{\text{СБольшаяОмутнаяГ}} &:= 0 \\
 X_{\text{БольшаяОмутнаяГ}} &:= \frac{125 \cdot n}{2} = 437.5
 \end{aligned}$$



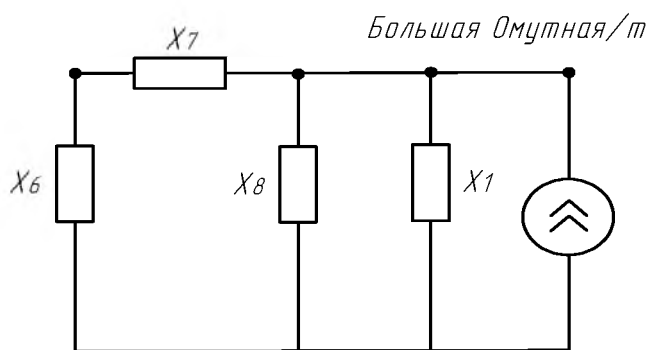
$$\begin{aligned}
 X_{2''} &:= \frac{(X_{\text{ВСквород}} + X_{\text{НСквород}}) \cdot X_{\text{ССквородБАМТ}}}{(X_{\text{ВСквород}} + X_{\text{НСквород}}) + X_{\text{ССквородБАМТ}}} = -0.699 \\
 X_{3''} &:= \frac{(X_{\text{ВСквород}} + X_{\text{НСквородГ}}) \cdot X_{\text{ССквородБАМТ}} \cdot X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяГ}}}{(X_{\text{ВСквородГ}} + X_{\text{НСквородГ}}) \cdot X_{\text{ССквородБАМТ}} + X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяГ}}} = -0.
 \end{aligned}$$



$$X_{4''} := \frac{(X_{2''} + X_{\text{ЛСквородБАМТ}}) \cdot X_{3''}}{(X_{2''} + X_{\text{ЛСквородБАМТ}}) + X_{3''}} = -0.683$$

$$X_{5''} := X_{4''} + X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяГ}} = 320.344$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

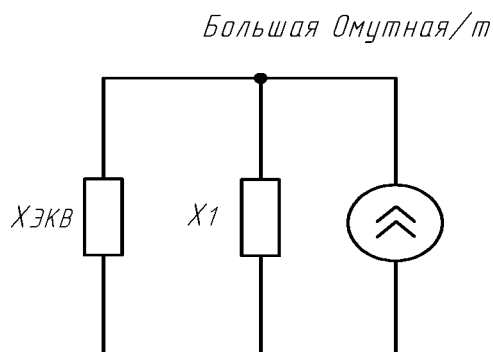


$$X_{6''} := X_5'' + X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + \frac{(X_5'' \cdot X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}})}{X_{\text{ВСковородТ}}} = 315.855$$

$$X_{7''} := X_5'' + X_{\text{ВСковородТ}} + \frac{(X_5'' \cdot X_{\text{ВСковородТ}})}{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = -6.319 \times 10^4$$

$$X_{8''} := X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X_{\text{ВСковородТ}} \dots = 569.409$$

$$+ \frac{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{\text{ВСковородТ}}}{X_5''}$$



$$X_{\text{ЭКВ}''} := \frac{(X_{6''} + X_{7''}) \cdot X_{8''}}{(X_{6''} + X_{7''}) + X_{8''}} = 574.613$$

$$X_{1''} := X_{\text{НСковородТ}} = 437.5$$

Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{\text{БОмутнаяТ}} := \sqrt{11.8^2 + (14.4)^2} = 18.617 \text{ МВА}$

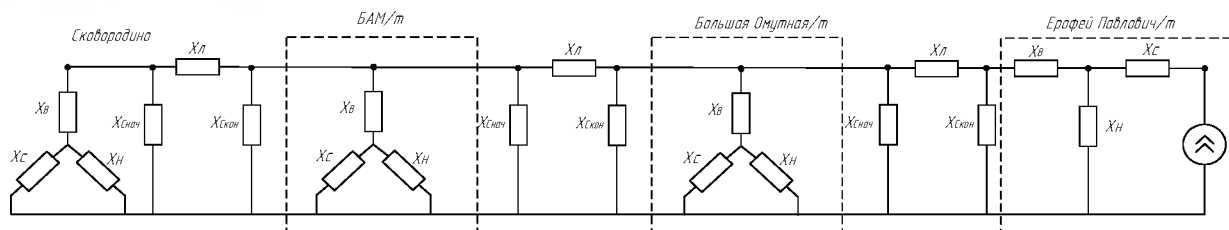
$$I := \frac{S_{\text{БОмутнаяТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 6.98 \text{ кА} \cdot 10^{-3}$$

$$K_{L1} := \frac{X_{\text{ЭКВ}''}}{X_{\text{ЭКВ}''} + X_{1''}} = 0.568$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I_{\text{Большая Омутная}} := K_1 \cdot I = 3.963 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{Большая Омутная}} := I_{\text{Большая Омутная}} \cdot X_{1''} = 1.734 \text{ кВ}$$



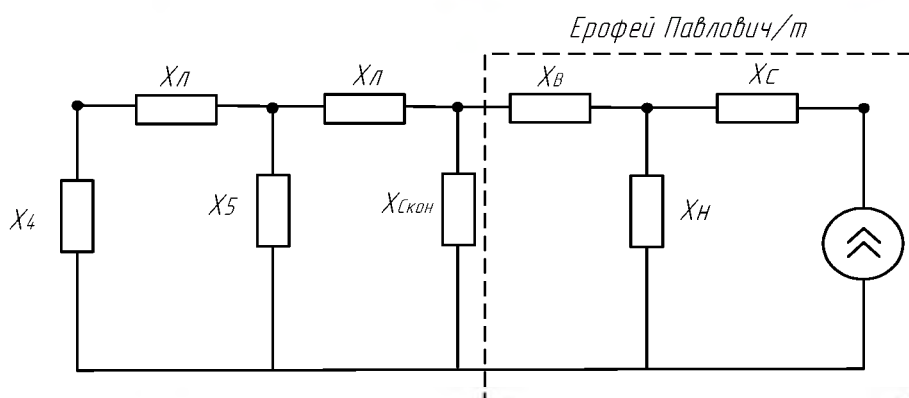
$$X_{\text{ВПавлович.т}} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{\text{ЛБольшая Омутная.тПавлович.т}} := 10.25 \cdot n$$

$$X_{\text{СПавлович.т}} := 0$$

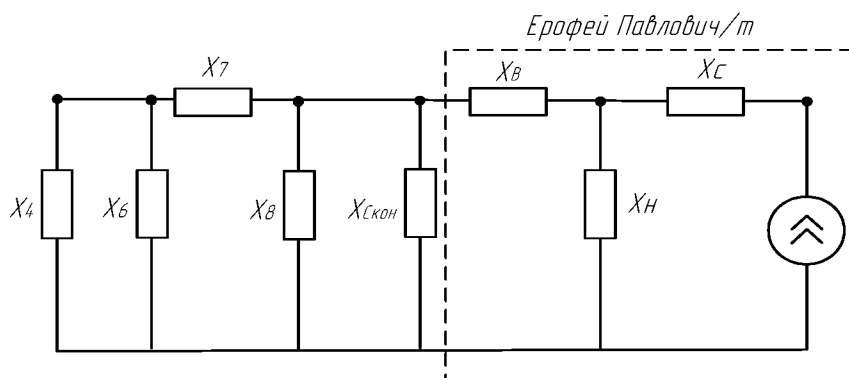
$$X_{\text{НПавлович.т}} := \frac{125 \cdot n}{2} = 437.5$$

$$X_{\text{СБольшая Омутная.тПавлович.т}} := -\left(\frac{23.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.645$$



$$X_4 := X_{4''} = -0.683$$

$$X_5 := \frac{\frac{X_{\text{СБАМТБольшая Омутная.т}} \cdot X_{\text{ВБольшая Омутная.т}}}{X_{\text{СБАМТБольшая Омутная.т}} + X_{\text{ВБольшая Омутная.т}}} \cdot X_{\text{СБАМТБольшая Омутная.т}}}{\frac{X_{\text{СБАМТБольшая Омутная.т}} \cdot X_{\text{ВБольшая Омутная.т}}}{X_{\text{СБАМТБольшая Омутная.т}} + X_{\text{ВБольшая Омутная.т}}} + X_{\text{СБАМТБольшая Омутная.т}}} = -1.44'$$



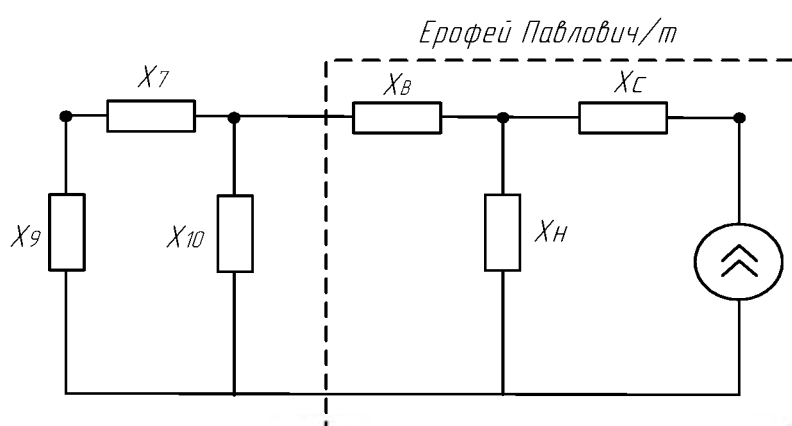
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X6 := x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X5 + \frac{(x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X5)}{x_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = 313.106$$

$$X7 := x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + x_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} \dots = -1.553 \times 10^4$$

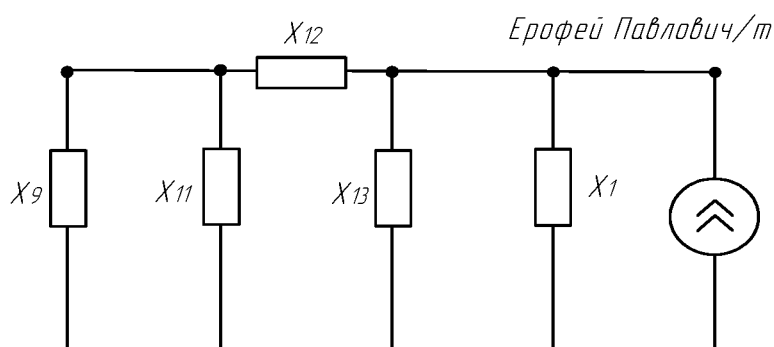
$$+ \frac{x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot x_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X5}$$

$$X8 := x_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} + X5 + \frac{(x_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} \cdot X5)}{x_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = 69.98$$



$$X9 := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -0.685$$

$$X10 := \frac{X8 \cdot x_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X8 + x_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = -0.651$$

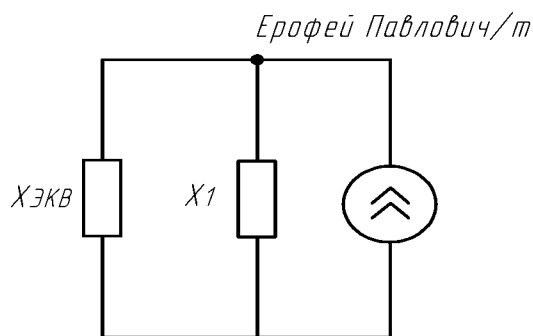


$$X11 := X7 + X10 + \frac{(X7 + X10)}{X8} = -1.575 \times 10^4$$

$$X12 := X7 + X8 + \frac{(X7 + X8)}{X10} = 8.27 \times 10^3$$

$$X13 := X10 + X8 + \frac{(X10 + X8)}{X7} = 69.324$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X_{14} := \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} = -0.685$$

$$X_{ЭКВ} := \frac{(X_{14} + X_{12}) \cdot X_{13}}{(X_{14} + X_{12}) + X_{13}} = 68.747$$

$$X_1 := X_{НПавловичТ} = 437.5$$

$$I := \frac{\frac{S_{ЕрофейПавловичТ}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 1.478 \text{ кА} \cdot 10^{-3}$$

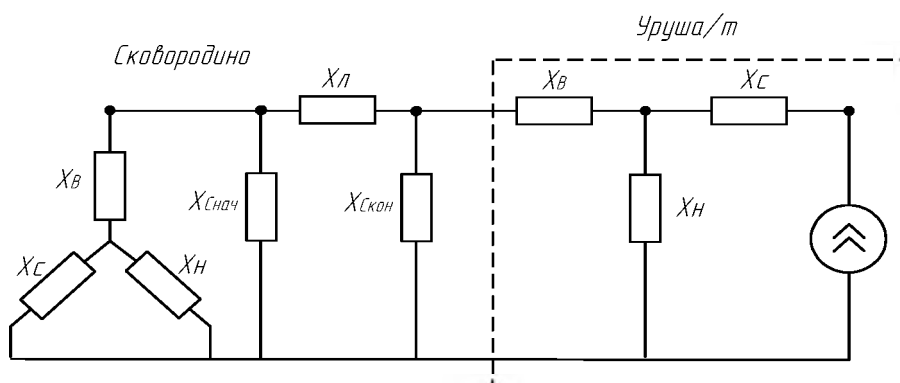
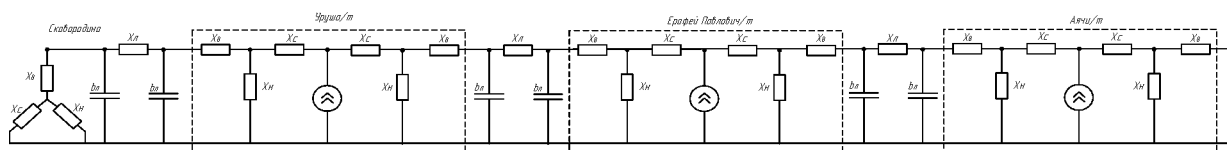
$$S_{ЕрофейПавловичТ} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X_1} = 0.136$$

$$I_{ЕрофейПавлович} := K_1 \cdot I = 2.008 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{ЕрофейПавлович} := I_{ЕрофейПавлович} \cdot X_1 = 0.088 \text{ кВ}$$

Участок сети Сквородино - Уруша/т - Ерофей Павлович/т - Аячи/т



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

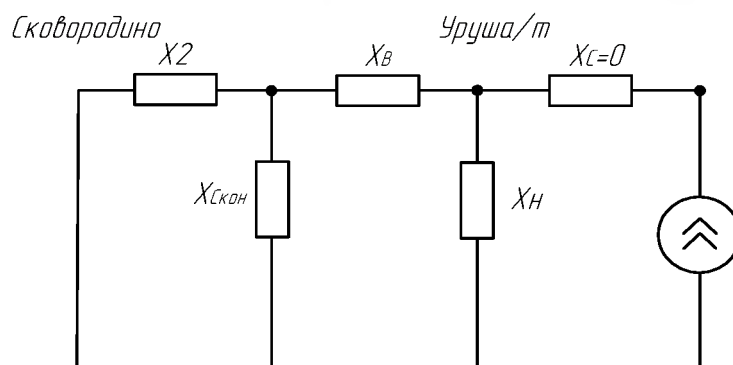
$$X_{BVурушаГ} := \frac{165 \cdot n}{2}$$

$$X_{ЛСковородУрушаГ} := n \cdot 32.4$$

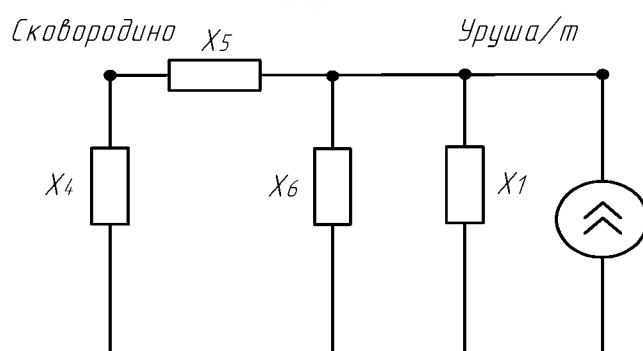
$$X_{CVурушаГ} := 0$$

$$X_{HVурушаГ} := \frac{125 \cdot n}{2} = 437.5$$

$$X_{ССковородУрушаГ} := -\left(\frac{75.54}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -2.04$$



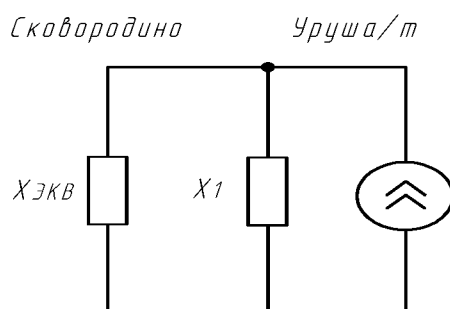
$$X_{2'} := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородУрушаГ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородУрушаГ}} + X_{ЛСковородУрушаГ} = 224.756$$



$$X_{4'} := X_{2'} + X_{ССковородУрушаГ} + \frac{(X_{2'} \cdot X_{ССковородУрушаГ})}{X_{BVурушаГ}} = 221.922$$

$$X_{5'} := X_{2'} + X_{BVурушаГ} + \frac{(X_{2'} \cdot X_{BVурушаГ})}{X_{ССковородУрушаГ}} = -6.282 \times 10^4$$

$$X_{6'} := X_{ССковородУрушаГ} + X_{BVурушаГ} + \frac{(X_{ССковородУрушаГ} \cdot X_{BVурушаГ})}{X_{2'}} = 570.218$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{ЭКВ}' := \frac{(X4' + X5') \cdot X6'}{(X4' + X5') + X6'} = 575.46$$

$$X1' := x_{НУрушаТ} = 437.5$$

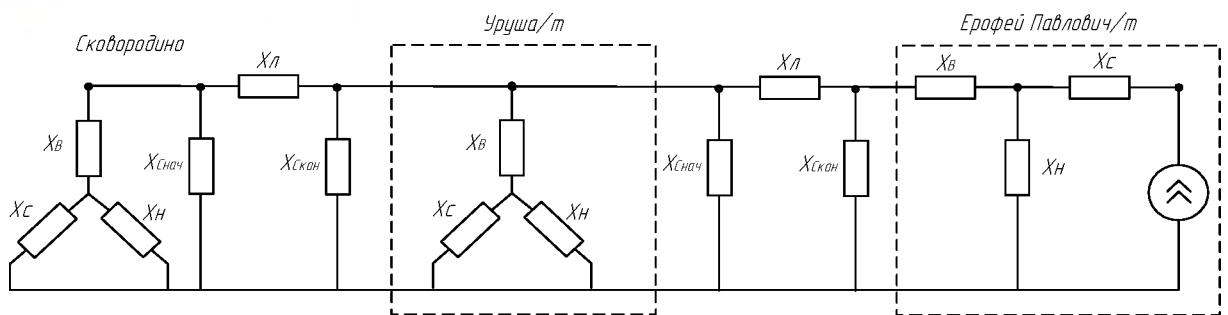
Нагрузка на ПС Уруша/т $S_{УрушаТ} := \sqrt{(22.5)^2 + (24.6)^2} = 33.338 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{УрушаТ}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 6.24 \cdot 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ}'}{X_{ЭКВ}' + X1'} = 0.568$$

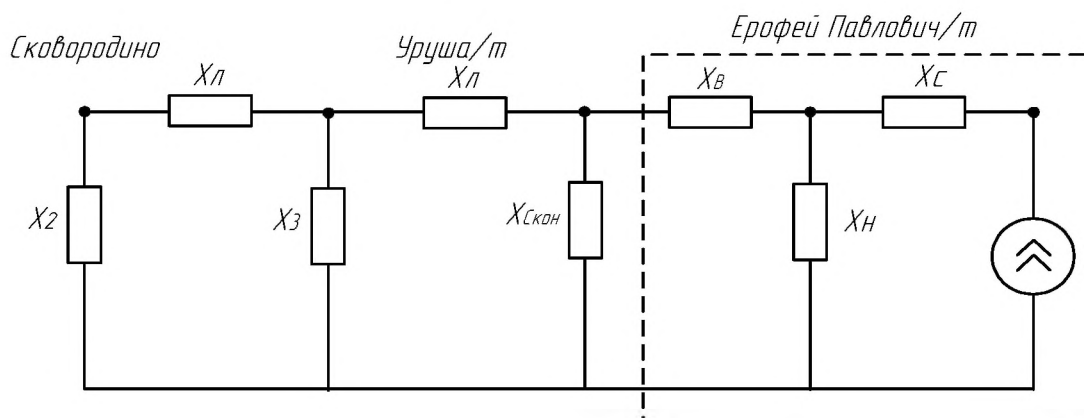
$$I_{1УрушаТ} := K_1 \cdot I = 3.55 \cdot 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1'} := I_{1УрушаТ} \cdot X1' = 1.553 \text{ кВ}$$



$$X_{ЛУрушаТЕПАВЛОВИЧТ} := n \cdot 28.7$$

$$X_{СУрушаТЕПАВЛОВИЧТ} := -\left(\frac{66.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.807$$

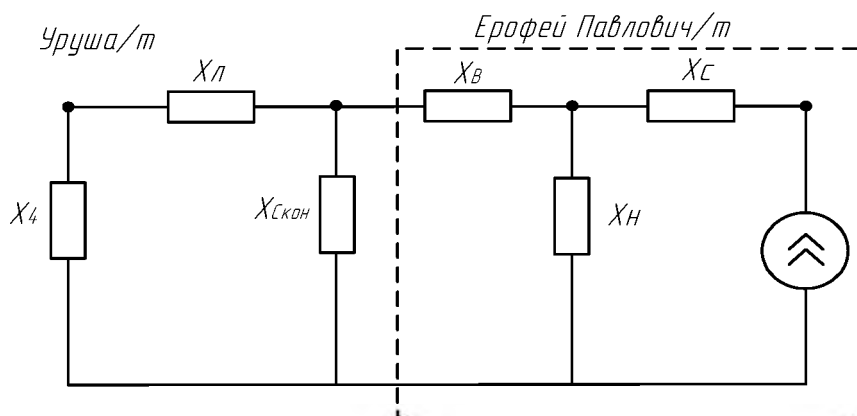


$$X2'' := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородУрушаТ}} = -2.044$$

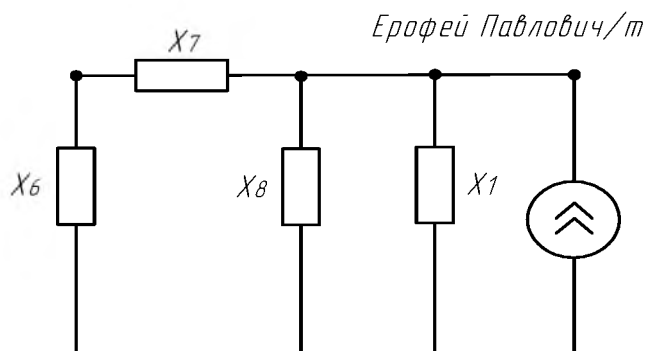
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\underline{X3'''} := \frac{\frac{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) + X_{ССковородУрушаТ}} \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{\frac{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) + X_{ССковородУрушаТ}} + X_{СУрушаТЕПавловичТ}} = -0.959$$



$$\underline{X4'''} := \frac{(X2'' + X_{ЛСковородУрушаТ}) \cdot X3'''}{(X2'' + X_{ЛСковородУрушаТ}) + X3'''} = -0.963$$



$$\underline{X5'''} := X4''' + X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} = 199.937$$

$$\underline{X6'''} := X5''' + X_{СУрушаТЕПавловичТ} + \frac{(X5''' \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ})}{X_{ВЕПавловичТ}} = 197.505$$

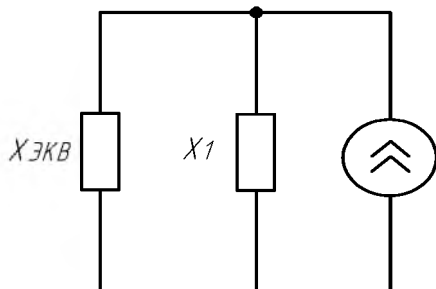
$$\underline{X7'''} := X5''' + X_{ВЕПавловичТ} + \frac{(X5''' \cdot X_{ВЕПавловичТ})}{X_{СУрушаТЕПавловичТ}} = -6.313 \times 10^4$$

$$\underline{X8'''} := X_{СУрушаТЕПавловичТ} + X_{ВЕПавловичТ} \dots = 570.475$$

$$+ \frac{X_{СУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_{ВЕПавловичТ}}{X5'''}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Ерофей Павлович/т



$$X_{ЭКВ}''' := \frac{(X6''' + X7''') \cdot X8'''}{(X6''' + X7''') + X8'''} = 575.693$$

$$X1''' := X_{НПавловичТ} = 437.5$$

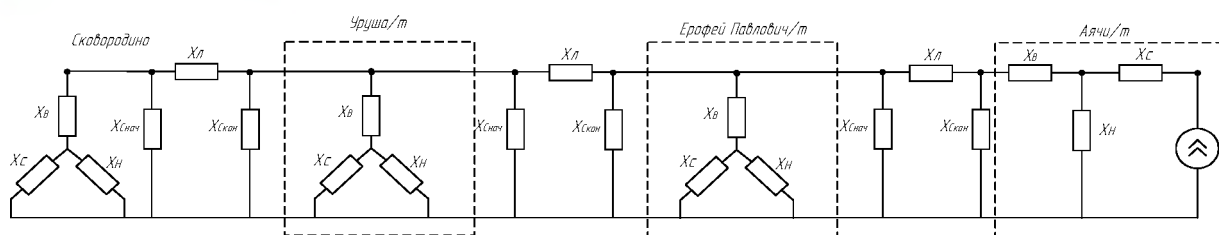
Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{ЕрофейПавловичТ} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887$ МВА

$$I := \frac{S_{ЕрофейПавловичТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 1.478 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВ}'''}{X_{ЭКВ}''' + X1'''} = 0.568$$

$$I_{ЕрофейПавлович2} := K_1 \cdot I = 8.401 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{ЕрофейПавлович2} := I_{ЕрофейПавлович2} \cdot X1''' = 0.368 \text{ кВ}$$



$$X_{ВАячиТ} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

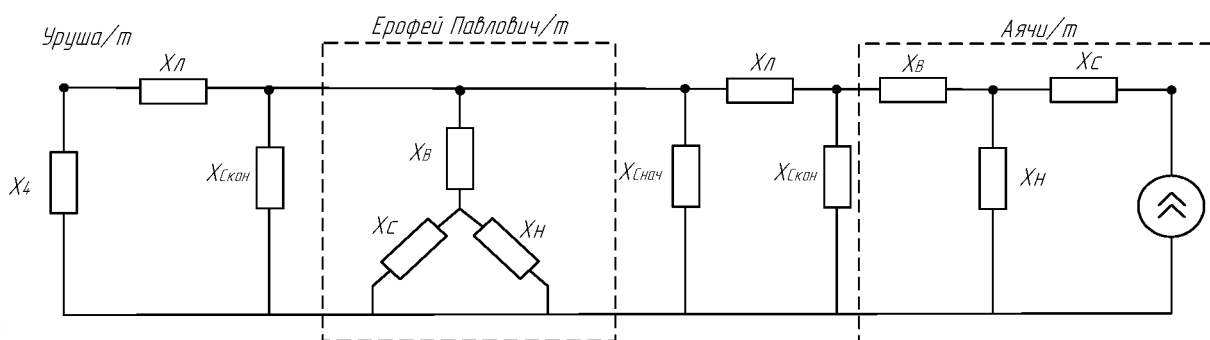
$$X_{ЛЕПавловичТ.АячиТ} := n \cdot 28.7$$

$$X_{С.АячиТ} := 0$$

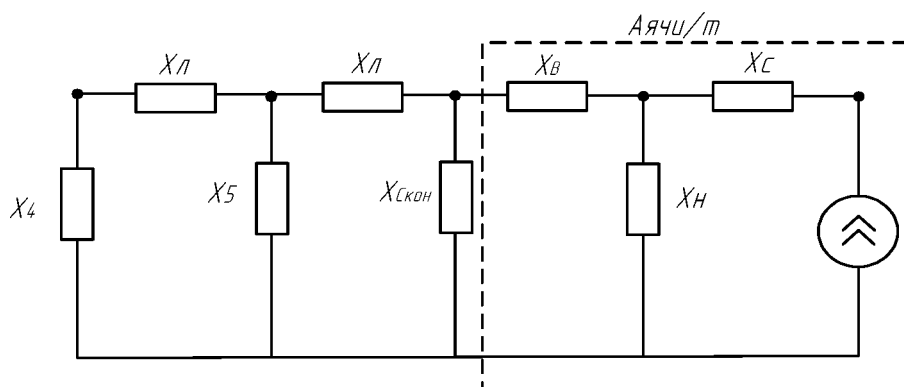
$$X_{НАячиТ} := \frac{n \cdot 125}{2} = 437.5$$

$$X_{СЕПавловичТ.АячиТ} := -\left(\frac{66.9}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.807$$

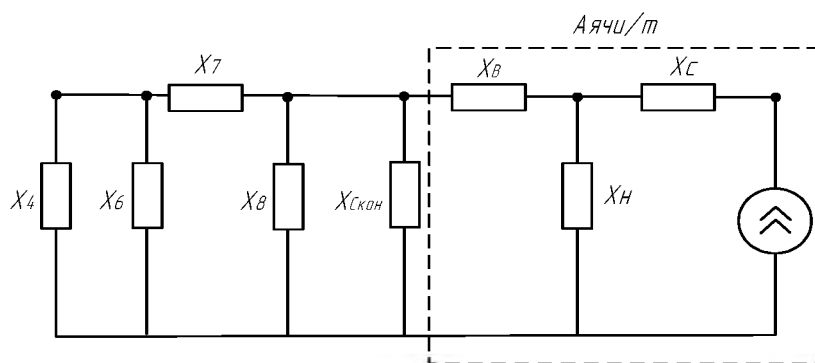
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X4 := X4''' = -0.963$$



$$X5 := \frac{\left[\frac{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}} \right] \cdot X_{СЕПавловичТАячиТ}}{\frac{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}} + X_{СЕПавловичТАячиТ}} = 2.2$$

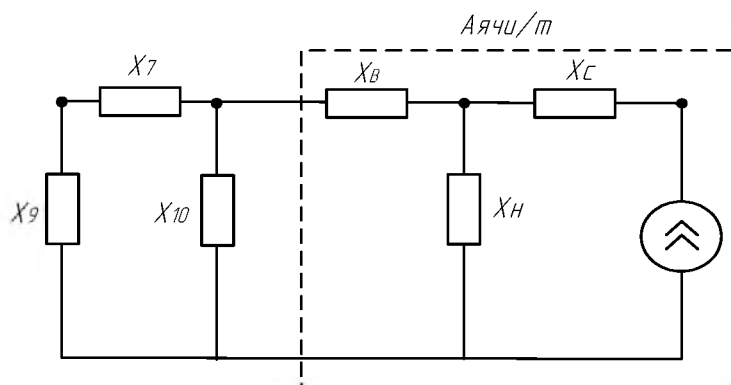


$$X6 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X5 + \frac{(X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X5)}{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}} = 205.379$$

$$X7 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X_{ЛЕПавловичТАячиТ} \dots = 1.842 \times 10^4 + \frac{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_{ЛЕПавловичТАячиТ}}{X5}$$

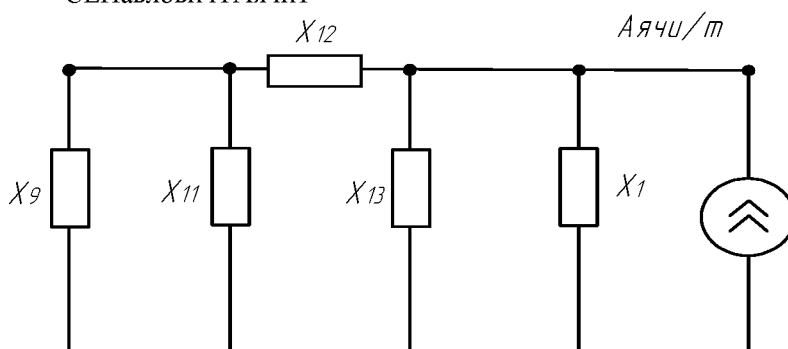
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\underline{X8} := X5 + x_{\text{ЛЕПавловичТАячиТ}} + \frac{(X5 \cdot x_{\text{ЛЕПавловичТАячиТ}})}{x_{\text{ЛУрушаТЕПавловичТ}}} = 205.379$$



$$\underline{X9} := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -0.968$$

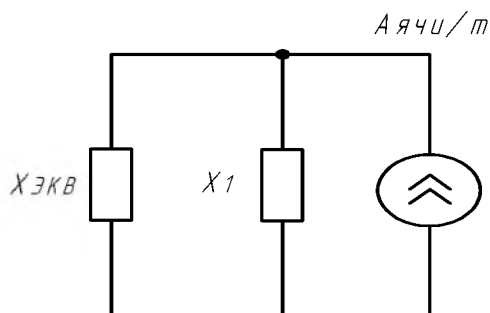
$$\underline{X10} := \frac{X8 \cdot x_{\text{СЕПавловичТАячиТ}}}{X8 + x_{\text{СЕПавловичТАячиТ}}} = -1.823$$



$$\underline{X11} := X7 + X10 + \frac{(X7 \cdot X10)}{X8} = 1.826 \times 10^4$$

$$\underline{X12} := X7 + X8 + \frac{(X7 \cdot X8)}{X10} = -2.057 \times 10^6$$

$$\underline{X13} := X8 + X10 + \frac{(X8 \cdot X10)}{X7} = 203.536$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{ЭКВ}}'' := \frac{\left(X_{12} + \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} \right) \cdot X_{13}}{\left(X_{12} + \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} \right) + X_{13}} = 203.557$$

$$X_1 := X_{\text{НАЯЧИТ}}$$

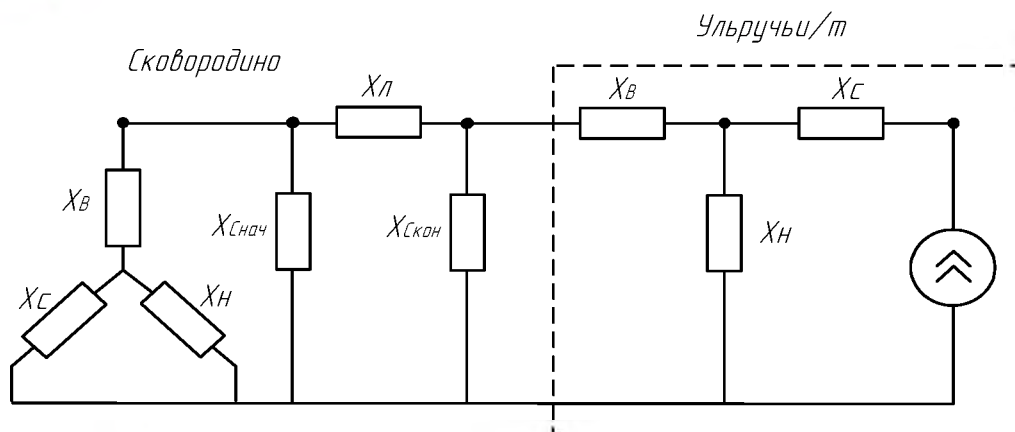
Нагрузка на ПС Аячи/т $S_{\text{АячиТ}} := \sqrt{(9.9)^2 + (12)^2} = 15.557 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{\text{АячиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 5.832 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}''}{X_{\text{ЭКВ}}'' + X_1} = 0.318 \text{ кВ}$$

$$I_{1\text{АячиТ}} := K_1 \cdot I = 1.852 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Аячи}} := I_{1\text{АячиТ}} \cdot X_1 = 0.81 \text{ кВ}$$



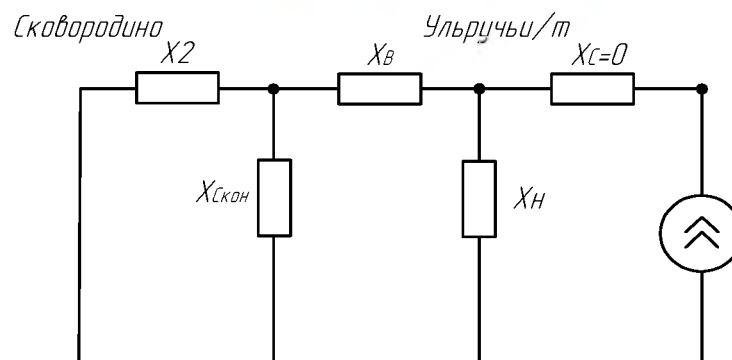
$$X_{\text{ВульручыТ}} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

$$X_{\text{ЛСковородиноУльручыТ}} := n \cdot 10.67$$

$$X_{\text{СУльручыТ}} := 0$$

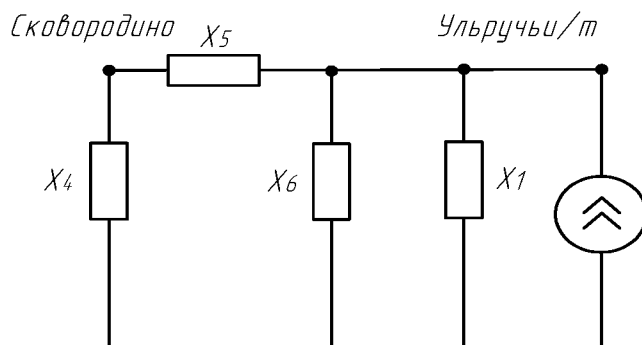
$$X_{\text{НУльручыТ}} := \frac{n \cdot 125}{2} = 437.5$$

$$X_{\text{ССковородиноУльручыТ}} := -\left(\frac{25.83}{2} \right) \cdot \frac{1}{n} = -0.698$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$\underline{X2} := \frac{(X_{ВСквород} + X_{НСквород}) \cdot X_{ССквородиноУльручьГ}}{(X_{ВСквород} + X_{НСквород}) + X_{ССквородиноУльручьГ} + X_{ЛСквородиноУльручьГ}} \dots = 73.992$$

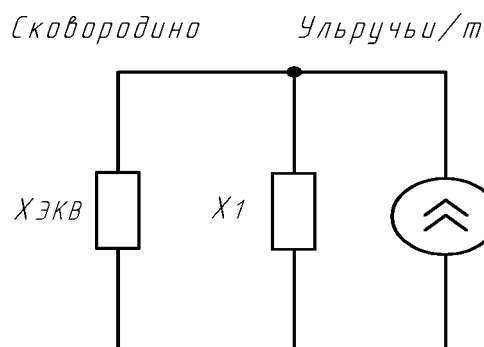


$$\underline{X4} := X2 + X_{ССквородиноУльручьГ} + \frac{(X2 \cdot X_{ССквородиноУльручьГ})}{X_{ВульручьГ}} = 73.205$$

$$\underline{X5} := X2 + X_{ВульручьГ} + \frac{(X2 \cdot X_{ВульручьГ})}{X_{ССквородиноУльручьГ}} = -6.061 \times 10^4$$

$$\underline{X6} := X_{ССквородиноУльручьГ} + X_{ВульручьГ} \dots = 571.358$$

$$+ \frac{X_{ССквородиноУльручьГ} \cdot X_{ВульручьГ}}{X2}$$



$$\underline{X_{ЭКВ}} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 576.802$$

$$\underline{X1} := X_{НУльручьГ} = 437.5$$

Нагрузка на ПС Ульручь/т $\underline{S_{УльручьГ}} := \sqrt{(11.1)^2 + (8.6)^2} = 14.042 \text{ МВА}$

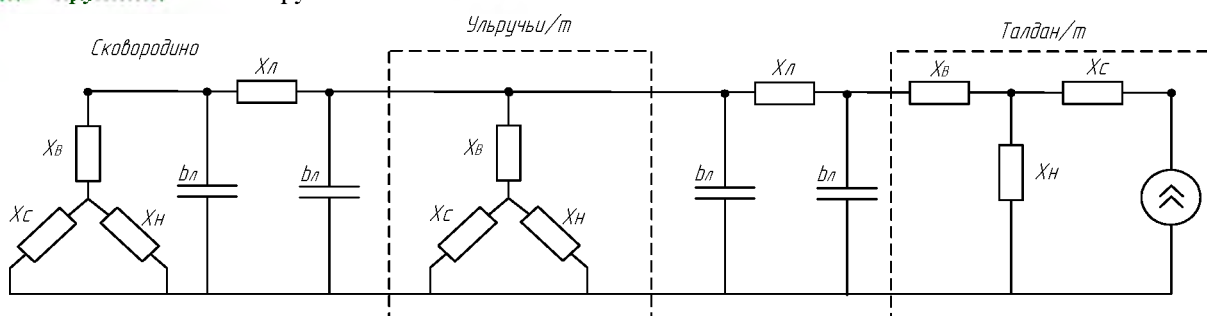
$$\underline{I} := \frac{S_{УльручьГ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = \text{кА}4 \times 10^{-3}$$

$$\underline{K_{Л1}} := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X1} = 0.569$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I_{1\text{УльручыТ}} := K_1 \cdot I = 2.994 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{1\text{УльручыТ}} := I_{1\text{УльручыТ}} \cdot X1 = 1.31 \quad \text{кВ}$$



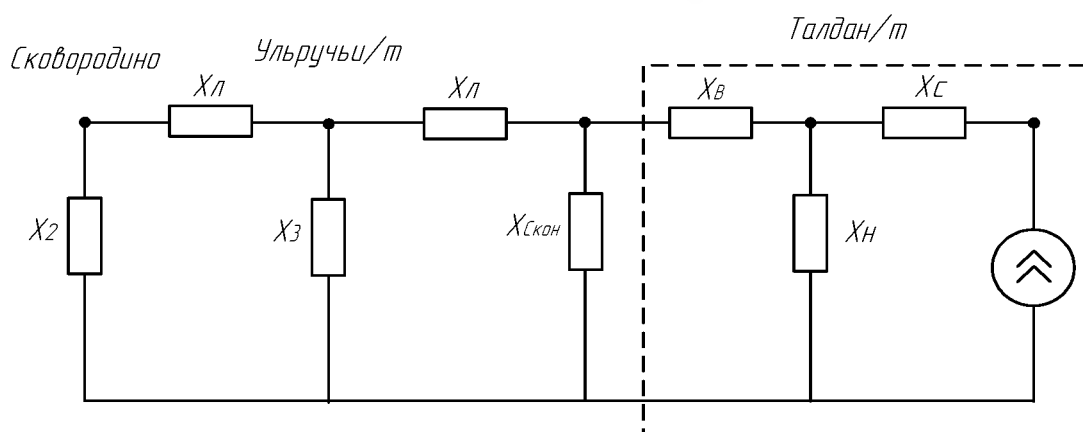
$$X_{\text{ВТалданТ}} := n \cdot 165$$

$$X_{\text{ДУльручыТТалданТ}} := n \cdot 19.36$$

$$X_{\text{СТалданТ}} := 0$$

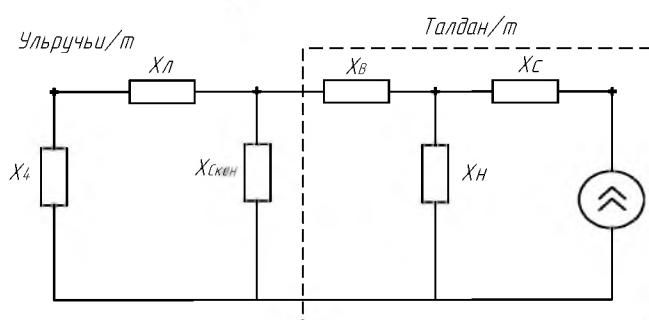
$$X_{\text{НТалданТ}} := n \cdot 125 = 875$$

$$X_{\text{СУльручыТТалданТ}} := - \left(\frac{48.04}{2.645} \right) \cdot \frac{1}{n} = -1.297$$



$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}} = -0.698$$

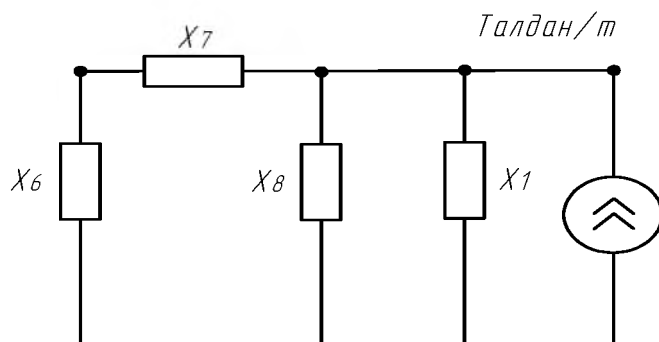
$$X_3 := \frac{(X_{\text{ВТалданТ}} + X_{\text{НТалданТ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}}{(X_{\text{ВТалданТ}} + X_{\text{НТалданТ}}) + X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}} \cdot X_{\text{СУльручыТТалданТ}} = -0.45$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

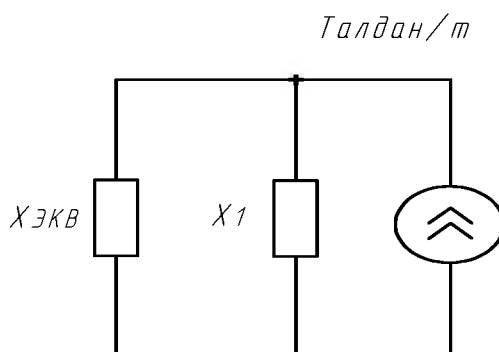
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьГ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьГ}} + X2) + X3} = -0.457$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) + X_{\text{ССковородиноУльручьГ}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьГ}} + X_{\text{ВТалданГ}}} = 134.284$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) + X_{\text{ВТалданГ}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) \cdot X_{\text{ВТалданГ}} + X_{\text{ССковородиноУльручьГ}}} = -2.223 \times 10^5$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{ССковородиноУльручьГ}}) + X_{\text{ВТалданГ}} \dots}{X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}} + \frac{X_{\text{ССковородиноУльручьГ}} \cdot X_{\text{ВТалданГ}}}{X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}}} = 1.148 \times 10^3$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 1.154 \times 10^3$$

$$X1 := X_{\text{ВТалданГ}} = 1.155 \times 10^3$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{ТалданГ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{ТалданГ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 1.781 \times 10^{-3}$$

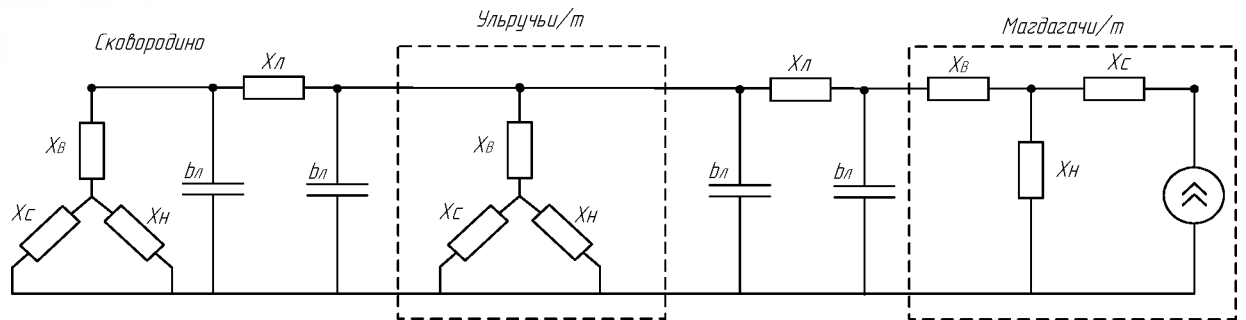
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.5$$

$$I_{1\text{Талдан}} := K_1 \cdot I = 8,903 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Талдан}} := I_{1\text{Талдан}} \cdot X_1 = 1.028 \text{ кВ}$$

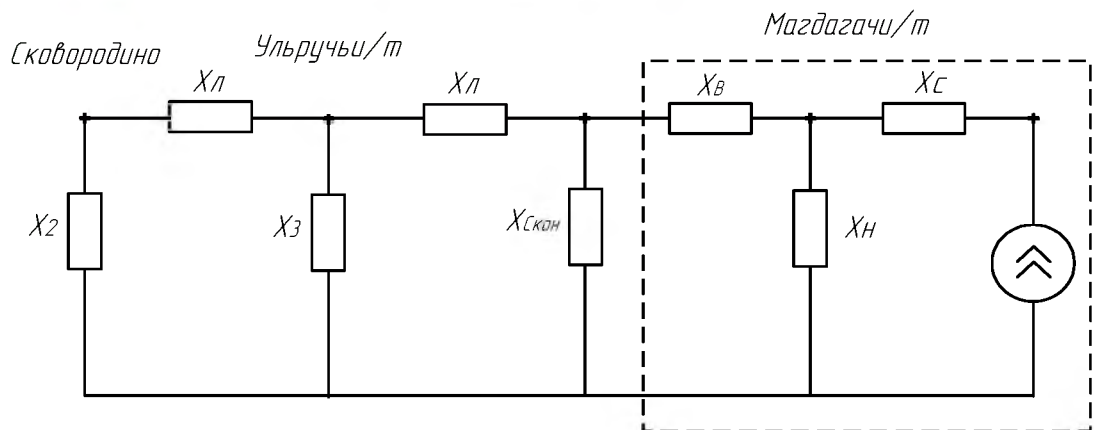


$$X_{\text{ВМагдагачиТ}} := \frac{n \cdot 165}{2}$$

$$X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}} := n \cdot 54.14$$

$$X_{\text{СМагдагачиТ}} := 0$$

$$X_{\text{НМагдагачиТ}} := \frac{n \cdot 125}{2} = 437.5 \quad X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} := -\left(\frac{125.7}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -3.395$$

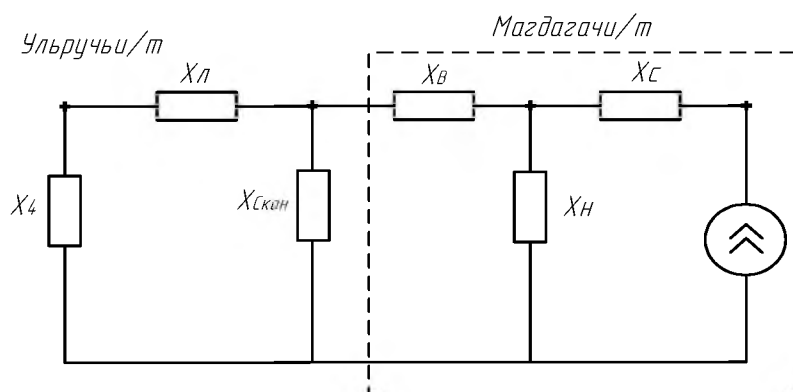


$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}} = -0.698$$

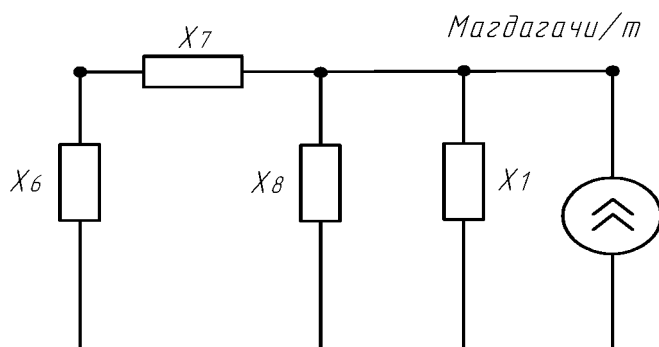
$$\frac{\left(\begin{matrix} X_{\text{ВульручьиТ}} \dots \\ + X_{\text{НУльручьиТ}} \end{matrix} \right) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}}{\left(X_{\text{ВульручьиТ}} + X_{\text{НУльручьиТ}} \right) \dots} \cdot X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} + X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}$$

$$X_3 := \frac{\left(\begin{matrix} X_{\text{ВульручьиТ}} \dots \\ + X_{\text{НУльручьиТ}} \end{matrix} \right) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}}}{\left(X_{\text{ВульручьиТ}} + X_{\text{НУльручьиТ}} \right) \dots} + X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} + X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}} = -0.579$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



$$X4 := \frac{(X_{лСковородиноУльручьиТ} + X2) \cdot X3}{(X_{лСковородиноУльручьиТ} + X2) + X3} = -0.584$$



$$X6 := \left(X4 + X_{лУльручьиТМагдагачи} \right) + X_{сУльручьиТМагдагачи} \dots = 372.778$$

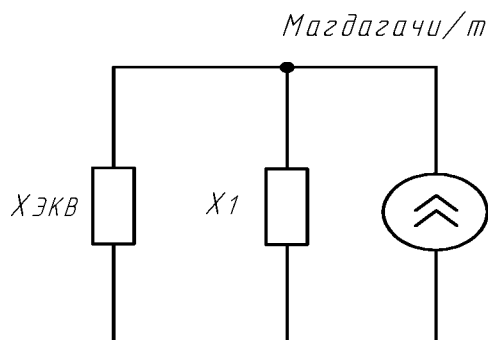
$$+ \frac{\left(X4 + X_{лУльручьиТМагдагачи} \right) \cdot X_{сУльручьиТМагдагачи}}{X_{вМагдагачиТ}}$$

$$X7 := \left(X4 + X_{лУльручьиТМагдагачи} \right) + X_{вМагдагачиТ} \dots = -6.342 \times 10^4$$

$$+ \frac{\left(X4 + X_{лУльручьиТМагдагачи} \right) \cdot X_{вМагдагачиТ}}{X_{сУльручьиТМагдагачи}}$$

$$X8 := \left(X_{сУльручьиТМагдагачи} \right) + X_{вМагдагачиТ} \dots = 568.925$$

$$+ \frac{X_{сУльручьиТМагдагачи} \cdot X_{вМагдагачиТ}}{X4 + X_{лУльручьиТМагдагачи}}$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_6 + X_7) \cdot X_8}{(X_6 + X_7) + X_8} = 574.105$$

$$X_1 := X_{\text{НМагдагачиТ}} = 437.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

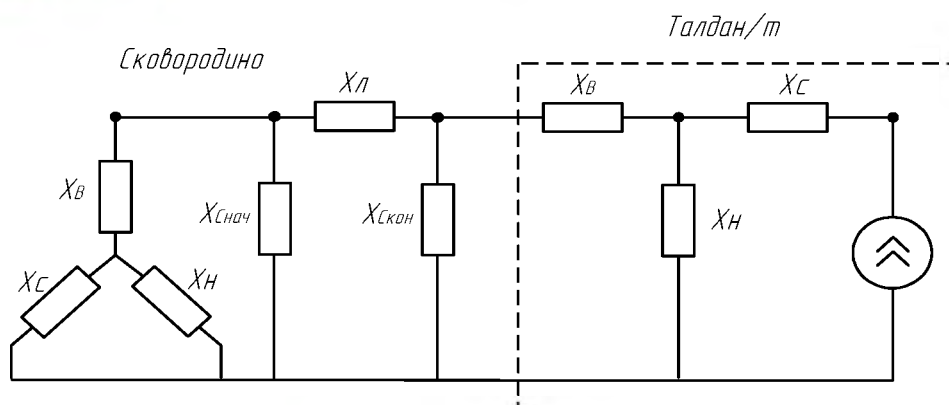
$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.453 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.568$$

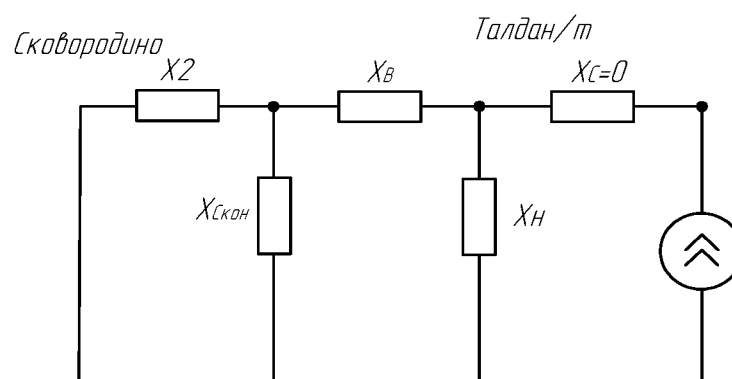
$$I_{1\text{Магдагачи}} := K_1 \cdot I = 1.392 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи}} := I_{1\text{Магдагачи}} \cdot X_1 = 0.609 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЛСковородиноТалданТ}} := n \cdot 27.96$$

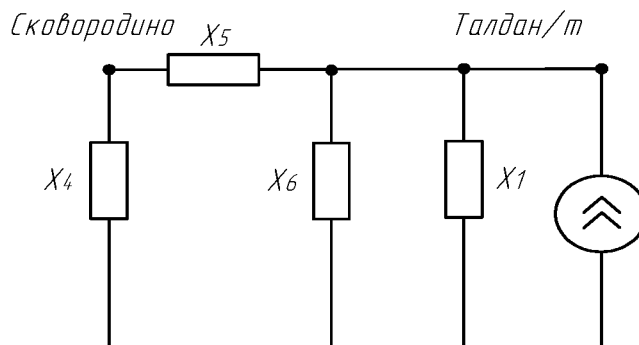
$$X_{\text{ССковородиноТалданТ}} := -\left(\frac{\frac{69.6}{2.645}}{2}\right) \cdot \frac{1}{n} = -1.88$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

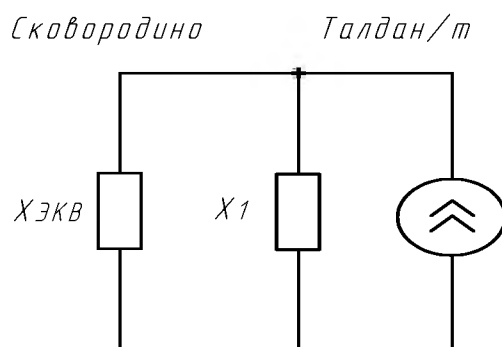
$$X2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноТалданТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноТалданТ}} = -1.883$$



$$X4 := X2 + X_{ССковородиноТалданТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ССковородиноТалданТ})}{X_{ВТалданТ}} = -3.759$$

$$X5 := X2 + X_{ВТалданТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ВТалданТ})}{X_{ССковородиноТалданТ}} = 2.31 \times 10^3$$

$$X6 := X_{ВТалданТ} + X_{ССковородиноТалданТ} + \frac{(X_{ВТалданТ} \cdot X_{ССковородиноТалданТ})}{X2} = 2.306 \times 10^3$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 1.153 \times 10^3$$

$$X1 := X_{НТалданТ} = 875$$

$$\text{Нагрузка на ПС Талдан/т } S_{ТалданТ} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$$

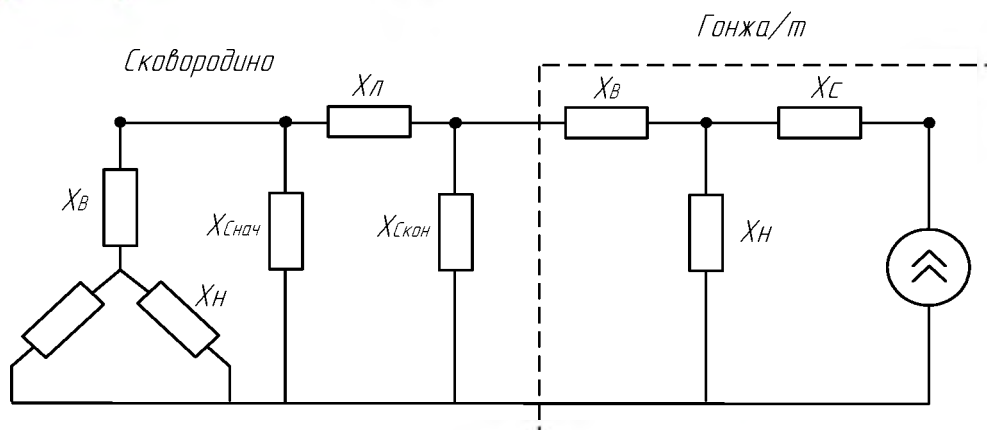
$$I := \frac{\frac{S_{ТалданТ}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 1.781 \times 10^{-3}$$

$$K_{Л} := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X1} = 0.569$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I_{1\text{Талдан2}} := K_1 \cdot I = 1.013 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

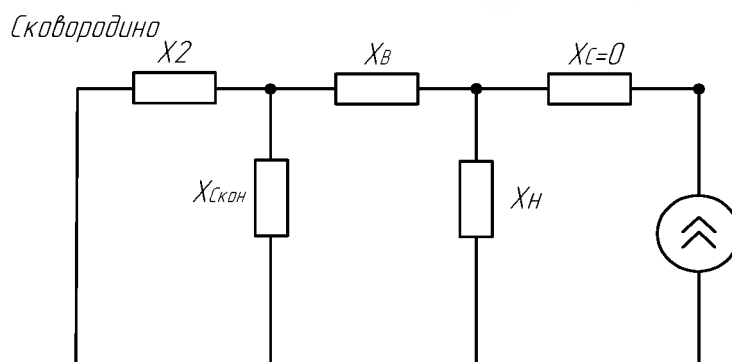
$$U_{1\text{Талдан2}} := I_{1\text{Талдан2}} \cdot X_1 = 0.886 \text{ кВ}$$



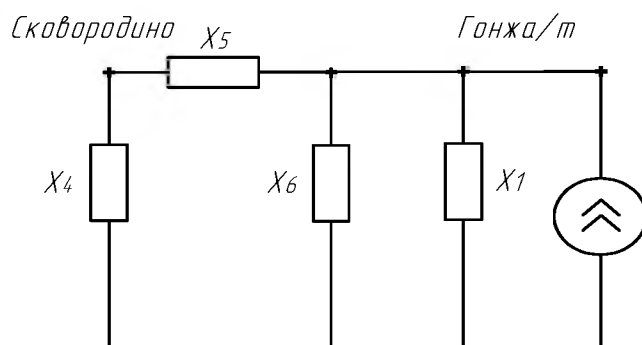
$$X_{\text{вГонжаТ}} := \frac{165 \cdot \pi}{2} = 577.5 \quad X_{\text{лСковородиноГонжаТ}} := \pi \cdot 46.08$$

$$X_{\text{сГонжаТ}} := 0$$

$$X_{\text{нГонжаТ}} := \frac{125 \cdot \pi}{2} = 437.5 \quad X_{\text{сСковородиноГонжаТ}} := -\left(\frac{115.2}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{\pi} = -3.111$$



$$X_2 := \frac{(X_{\text{вСковород}} + X_{\text{нСковород}}) \cdot X_{\text{сСковородиноГонжаТ}}}{(X_{\text{вСковород}} + X_{\text{нСковород}}) + X_{\text{сСковородиноГонжаТ}}} = -3.12$$

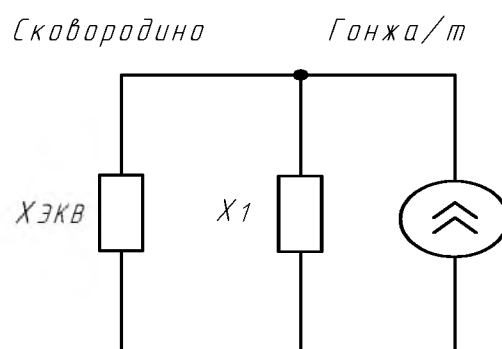


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$X4 := X2 + X_{ССковородиноГонжаТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ССковородиноГонжаТ})}{X_{ВГонжаТ}} = -6.214$$

$$X5 := X2 + X_{ВГонжаТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ВГонжаТ})}{X_{ССковородиноГонжаТ}} = 1.154 \times 10^3$$

$$X6 := X_{ВГонжаТ} + X_{ССковородиноГонжаТ} + \frac{(X_{ВГонжаТ} \cdot X_{ССковородиноГонжаТ})}{X2} = 1.15 \times 10^3$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 574.389$$

$$X1 := X_{НГонжаТ} = 437.5$$

Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{ГонжаТ} := \sqrt{(4.9)^2 + (8.2)^2} = 9.552 \text{ МВА}$

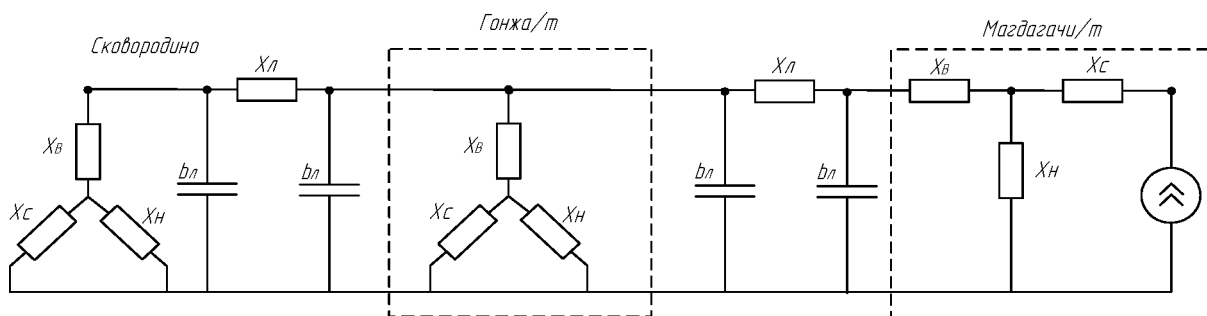
$$I := \frac{S_{ГонжаТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 1.791 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K1 := \frac{X_{ЭКВ}}{X_{ЭКВ} + X1} = 0.568 \text{ кВ}$$

$$I_{Гонжа} := K1 \cdot I = 1.016 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

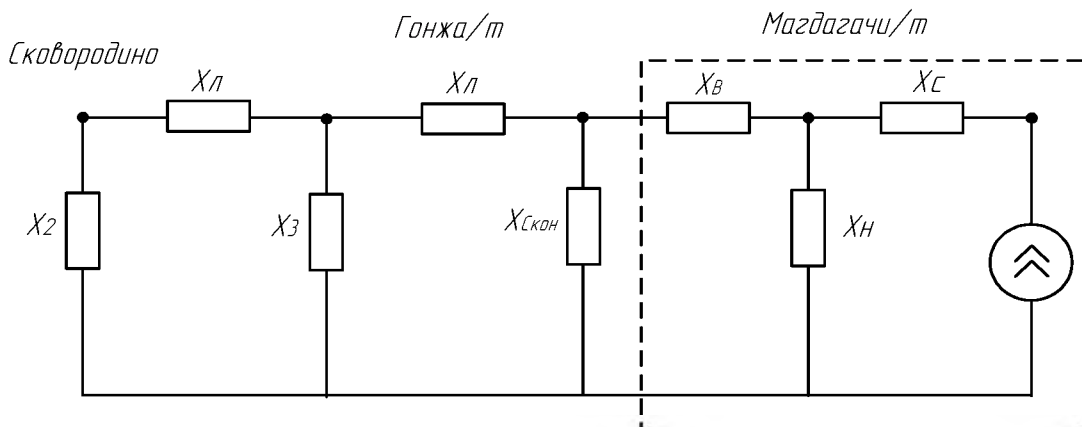
$$U_{Гонжа} := I_{Гонжа} \cdot X1 = 0.445 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения



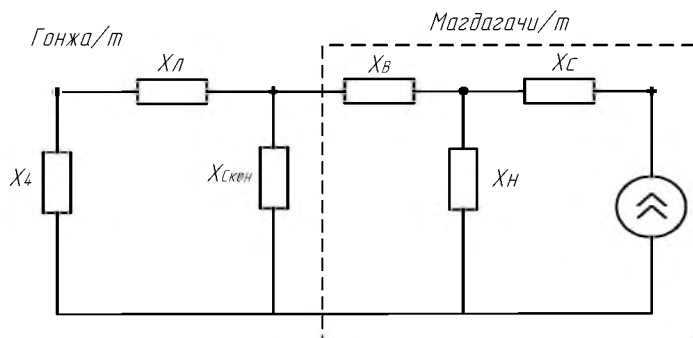
$$X_{ЛГонжаТМагдагачи} := n \cdot 14.38$$

$$X_{СГонжаТМагдагачи} := -\left(\frac{35.95}{2.645}\right) \cdot \frac{1}{n} = -0.971$$



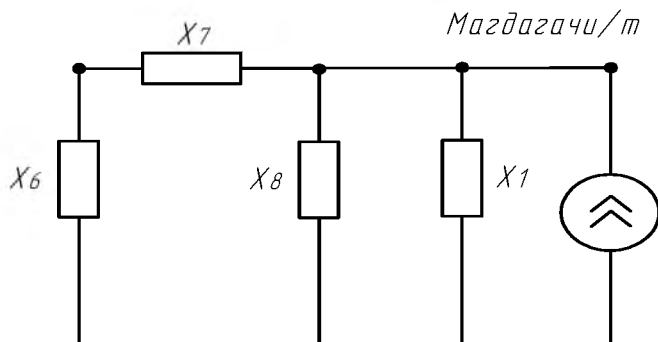
$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} = -3.12$$

$$X_3 := \frac{\frac{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} \cdot X_{СГонжаТМагдагачи}}{\frac{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} + X_{СГонжаТМагдагачи}} = -0.74$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А
 Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

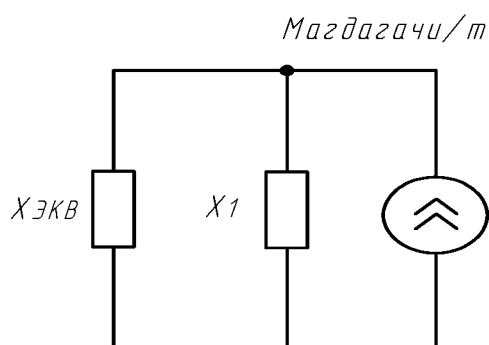
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛсковородиноГонжаТ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛсковородиноГонжаТ}} + X2) + X3} = -0.742$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} + X_{\text{ВМагдагачиТ}}} = 98.779$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}} + X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}} = -5.876 \times 10^4$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{СГонжаТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots}{X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}} + \frac{X_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}}}{X4 + X_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}}} = 570.918$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 576.529$$

$$X1 := X_{\text{НМагдагачиТ}} = 437.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиГ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.453 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + X_1} = 0.569$$

$$I_{1\text{Магдагачи}2} := K_1 \cdot I = 1.395 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи}2} := I_{1\text{Магдагачи}2} \cdot X_1 = 0.61 \text{ кВ}$$

Суммарный ток седьмой гармоники на ПС Сквородино, кА:

$$I_{7\Sigma} := \sqrt{I_{1\text{СквородиноГ}}^2 + (I_{1\text{БАМ}})^2 + (I_{1\text{БольшаяОмутная}})^2 \dots + I_{1\text{ЕрофейПавлович}}^2 \dots + I_{1\text{УрушаГ}}^2 + I_{1\text{ЕрофейПавлович}2}^2 + I_{1\text{АячиГ}}^2 + I_{1\text{УльручыГ}}^2 \dots + I_{1\text{Талдан}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}}^2 + I_{1\text{Талдан}2}^2 + I_{1\text{Гонжа}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}2}^2} = 8.49 \times 10^{-3}$$

Напряжение седьмой гармоники на ПС Сквородино, кВ:

$$U_{7\Sigma} := I_{7\Sigma} \cdot (X_{\text{ВСквород}} + X_{\text{НСквород}}) = 8.902$$

Коэффициент искажения несинусоидальности кривой напряжения:

$$K_U := \frac{\sqrt{U_{3\Sigma}^2 + U_{5\Sigma}^2 + U_{7\Sigma}^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 6.993$$

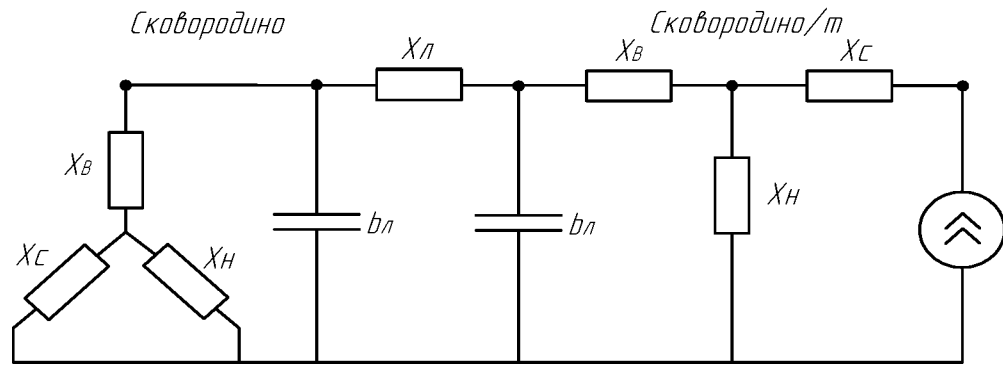
Коэффициент n-ой гармонической составляющей:

$$K_{U3} := \frac{U_{3\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 4.024$$

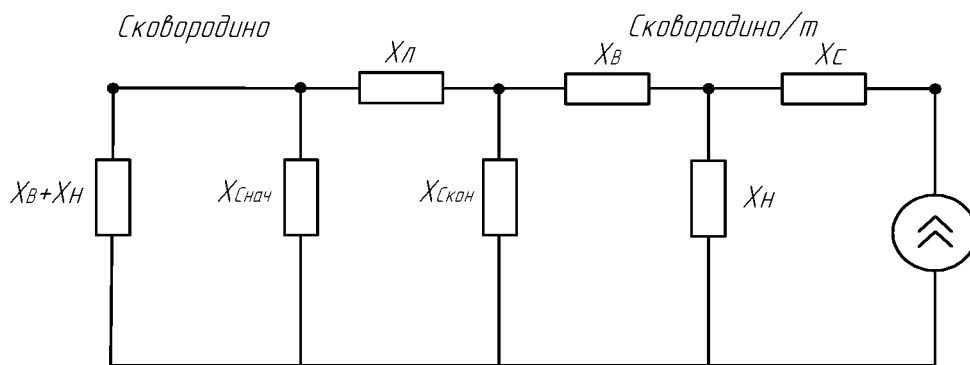
$$K_{U5} := \frac{U_{5\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 4.041$$

$$K_{U7} := \frac{U_{7\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 4.046$$

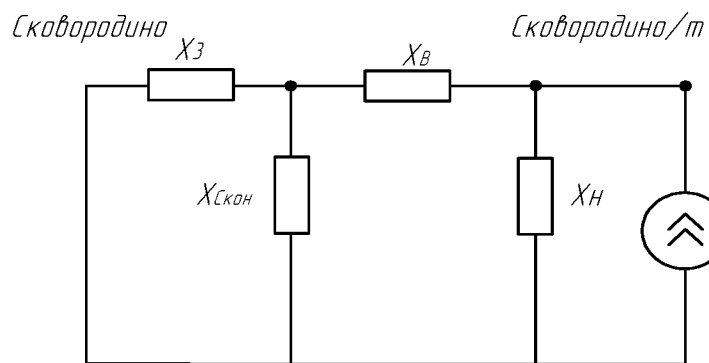
ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности



$$\begin{aligned}
 X_{ВСквород} &:= \frac{104}{2} & X_{ЛСквородСквородТ} &:= 1.137 & X_{ВСквородТ} &:= \frac{165}{2} \\
 X_{ССквород} &:= 0 & b_{ЛСквородСквородТ} &:= 28.05 & X_{ССквородТ} &:= 0 \\
 X_{НСквород} &:= \frac{195.6}{2} = 97.8 & & & X_{НСквородТ} &:= \frac{125}{2} = 62.5
 \end{aligned}$$

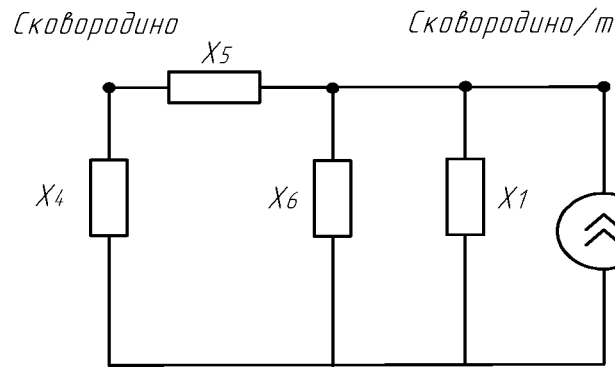


$$X_{ССквородСквородТ} := -\left(\frac{\frac{5.3}{2.645}}{4}\right) = -0.501$$



$$X_{з} := \frac{(X_{ВСквород} + X_{НСквород}) \cdot X_{ССквородСквородТ}}{(X_{ВСквород} + X_{НСквород}) + X_{ССквородСквородТ}} + X_{ЛСквородСквородТ} = 0.634$$

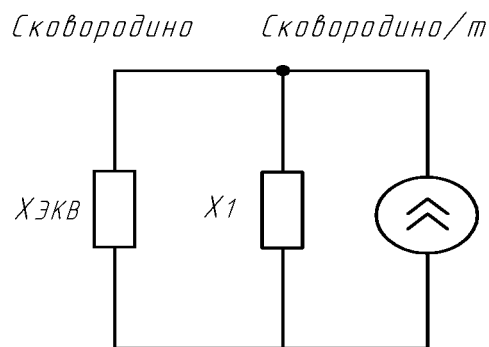
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



$$X_4 := X_3 + x_{\text{ССковородСковородГ}} + \frac{(X_3 \cdot x_{\text{ССковородСковородГ}})}{x_{\text{ВСковородГ}}} = 0.13$$

$$X_5 := X_3 + x_{\text{ВСковородГ}} + \frac{(X_3 \cdot x_{\text{ВСковородГ}})}{x_{\text{ССковородСковородГ}}} = -21.34$$

$$X_6 := x_{\text{ССковородСковородГ}} + x_{\text{ВСковородГ}} + \frac{(x_{\text{ССковородСковородГ}} \cdot x_{\text{ВСковородГ}})}{X_3} = 16.851$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_4 + X_5) \cdot X_6}{(X_4 + X_5) + X_6} = 81.999$$

$$X_1 := x_{\text{НСковородГ}} = 62.5$$

$$i := \sqrt{-1}$$

$$a := e^{i \cdot 120 \text{deg}} = -0.5 + 0.866i$$

Нагрузка на ПС Сковородино/т $S_{\text{СковородиноГ}} := 11 + 11.9 \cdot i \text{MVA}$

$$U_{\text{НОМ}} := 220 \text{ кВ}$$

$$I_I := \frac{\frac{S_{\text{СковородиноГ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.014 + 0.016i \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

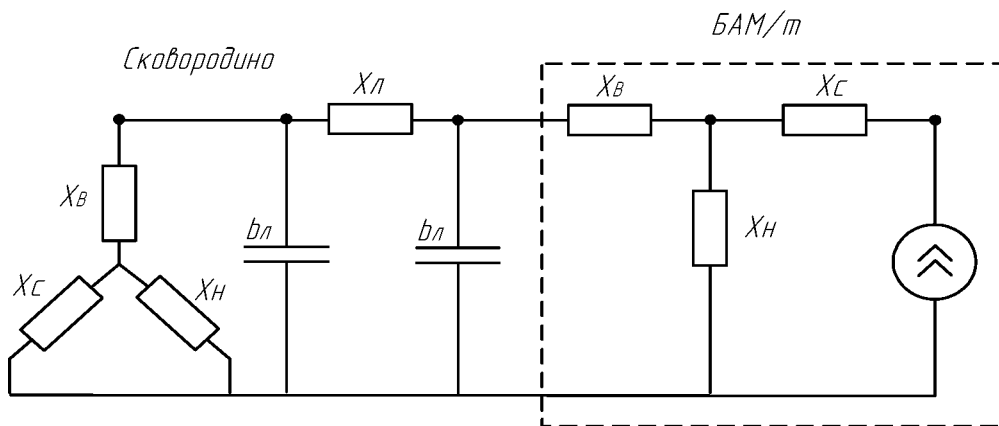
$$I_{II} := I_I = 0.014 + 0.016i$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 6.913 \times 10^{-3} - 1.564i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_{2\text{СковородиноГ}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 7.088 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{2\text{Сковородино}} := I_{2\text{СковородиноГ}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.4 \text{ кВ}$$

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



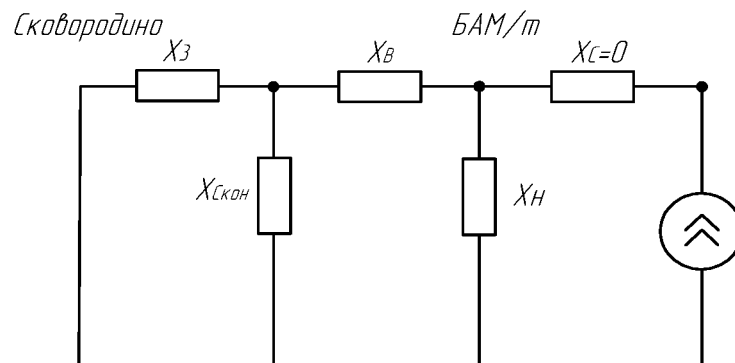
$$X_{\text{ЛСковородБАМТ}} := 11.094$$

$$X_{\text{ВБамТ}} := \frac{165}{2}$$

$$X_{\text{ССковородБАМТ}} := -\left(\frac{\frac{25.86}{2.645}}{2}\right) = -4.888$$

$$X_{\text{СБамТ}} := 0$$

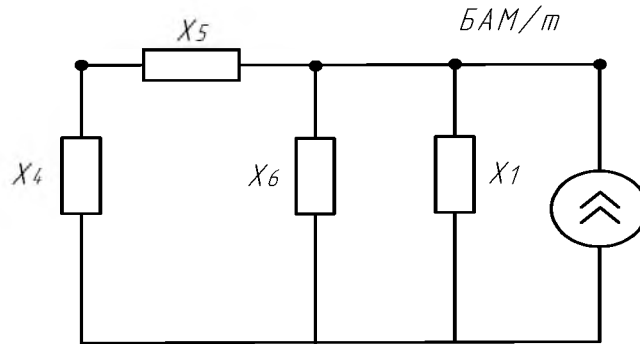
$$X_{\text{НБамТ}} := \frac{125}{2} = 62.5$$



$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородБАМТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородБАМТ}}} = -5.053$$

$$X_3' := X_2 + X_{\text{ЛСковородБАМТ}} = 6.041$$

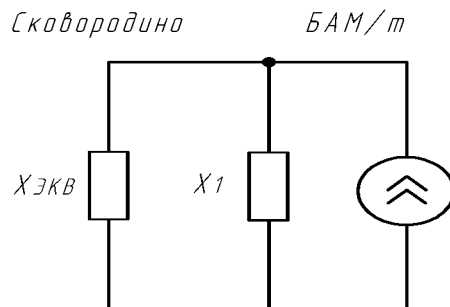
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



$$X_{4'} := X_{3'} + X_{СС\text{сковородБАМТ}} + \frac{(X_{3'} \cdot X_{СС\text{сковородБАМТ}})}{X_{В\text{БАМТ}}} = 0.794$$

$$X_{5'} := X_{3'} + X_{В\text{сковородТ}} + \frac{(X_{3'} \cdot X_{В\text{БАМТ}})}{X_{СС\text{сковородБАМТ}}} = -13.404$$

$$X_{6'} := X_{СС\text{сковородБАМТ}} + X_{В\text{сковородТ}} + \frac{(X_{СС\text{сковородБАМТ}} \cdot X_{В\text{БАМТ}})}{X_{3'}} = 10.847$$



$$X_{ЭКВ'} := \frac{(X_{4'} + X_{5'}) \cdot X_{6'}}{(X_{4'} + X_{5'}) + X_{6'}} = 77.612$$

$$X_{1'} := X_{Н\text{БАМТ}} = 62.5$$

Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМ}} := 16.6 + 24 \cdot i \text{ МВА}$

$$I_{\text{I}} := \frac{\frac{S_{\text{БАМ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.022 + 0.031i \text{ кА}$$

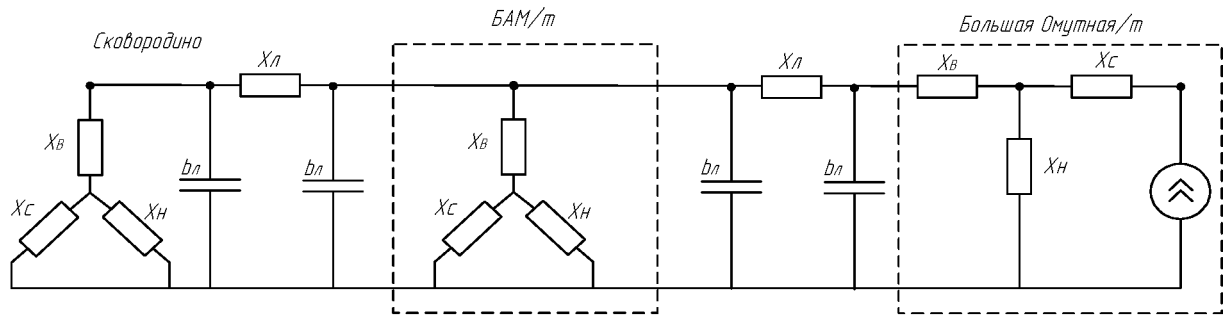
$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 0.022 + 0.031i$$

$$I_{2'} := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 0.013 - 1.039i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{БАМ}} := \sqrt{(\text{Re}(I_{2'}))^2 + (\text{Im}(I_{2'}))^2} = 0.013 \text{ кА}$$

$$U_{2\text{БАМ}} := I_{2\text{БАМ}} \cdot X_{ЭКВ'} = 0.991 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



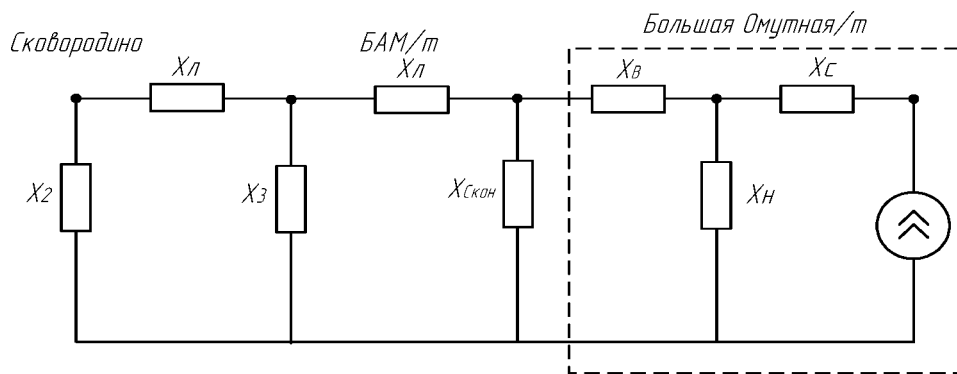
$$X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} := 45.861$$

$$X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}} := \frac{165}{2}$$

$$X_{\text{СБольшаяОмутнаяТ}} := 0$$

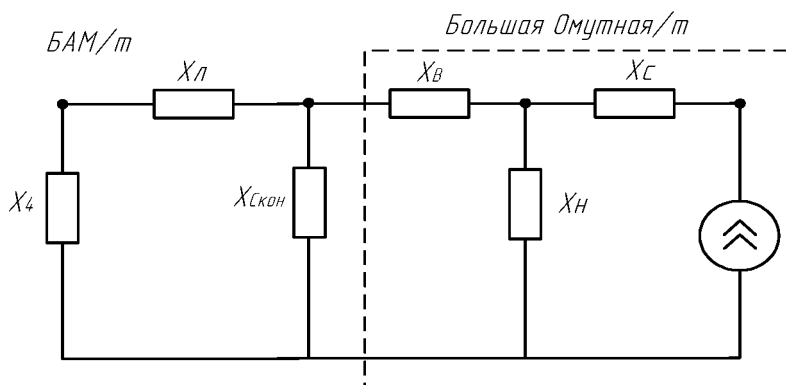
$$X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} := -\left(\frac{106.9}{2.645}\right) = -20.208$$

$$X_{\text{НБольшаяОмутнаяТ}} := \frac{125}{2} = 62.5$$



$$X_{2''} := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородБАМТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородБАМТ}}} = -5.053$$

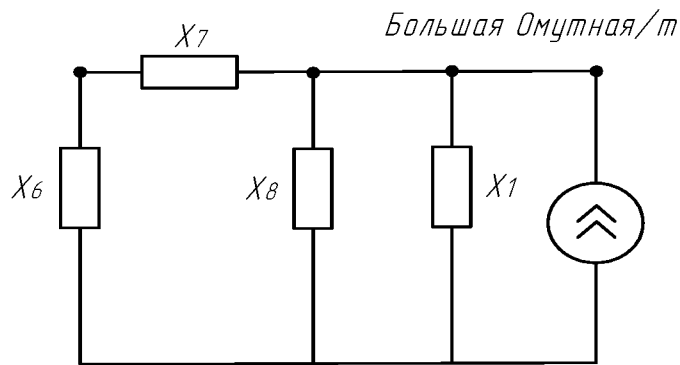
$$X_{3''} := \frac{\frac{(X_{\text{ВСковородТ}} + X_{\text{НСковородТ}}) \cdot X_{\text{ССковородБАМТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковородТ}}) + X_{\text{ССковородБАМТ}}} \cdot X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}}{\frac{(X_{\text{ВСковородТ}} + X_{\text{НСковородТ}}) \cdot X_{\text{ССковородБАМТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковородТ}}) + X_{\text{ССковородБАМТ}}} + X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = -4.9$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

$$X_{4''} := \frac{(X_{2''} + x_{ЛСковородБАМТ}) \cdot X_{3''}}{(X_{2''} + x_{ЛСковородБАМТ}) + X_{3''}} = -25.922$$

$$X_{5''} := X_{4''} + x_{ЛБАМТБольшаяОмутнаяГ} = 19.939$$

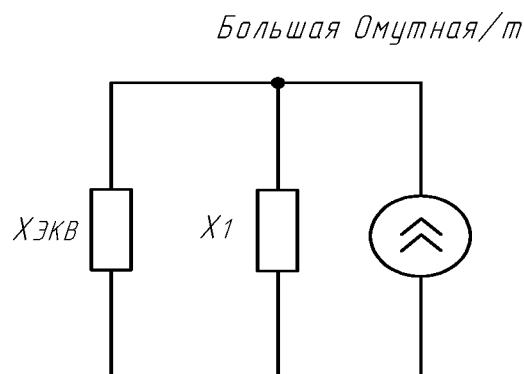


$$X_{6''} := X_{5''} + x_{СБАМТБольшаяОмутнаяГ} + \frac{(X_{5''} \cdot x_{СБАМТБольшаяОмутнаяГ})}{x_{ВСковородГ}} = -5.153$$

$$X_{7''} := X_{5''} + x_{ВСковородГ} + \frac{(X_{5''} \cdot x_{ВСковородГ})}{x_{СБАМТБольшаяОмутнаяГ}} = 21.037$$

$$X_{8''} := x_{СБАМТБольшаяОмутнаяГ} + x_{ВСковородГ} \dots = -21.32$$

$$+ \frac{x_{СБАМТБольшаяОмутнаяГ} \cdot x_{ВСковородГ}}{X_{5''}}$$



$$X_{ЭКВ''} := \frac{(X_{6''} + X_{7''}) \cdot X_{8''}}{(X_{6''} + X_{7''}) + X_{8''}} = 62.292$$

$$X_{1''} := x_{НСковородГ} = 62.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{\text{БОмутная}} := 11.8 + 14.4 \cdot i \text{ МВА}$

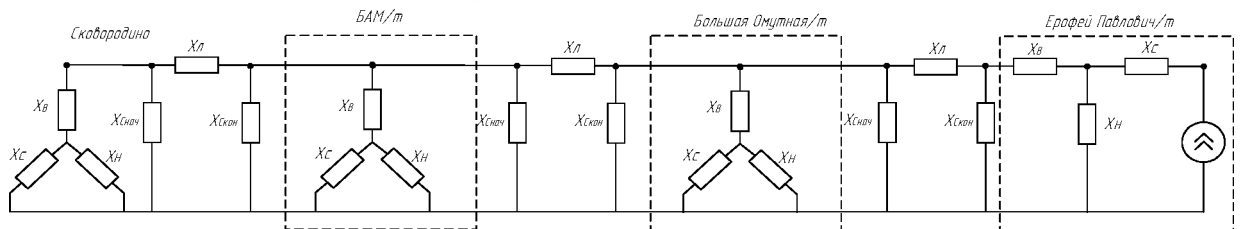
$$I_{\text{I}} := \frac{S_{\text{БОмутная}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.015 + 0.019i \text{ кА}$$

$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 0.015 + 0.019i \text{ кА}$$

$$I_{\text{2}} := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 8.035 \times 10^{-3} - 1.321i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{\text{2БОмутная}} := \sqrt{(\text{Re}(I_{\text{2}}))^2 + (\text{Im}(I_{\text{2}}))^2} = 8.143 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{2БОмутная}} := I_{\text{2БОмутная}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.507 \text{ кВ}$$



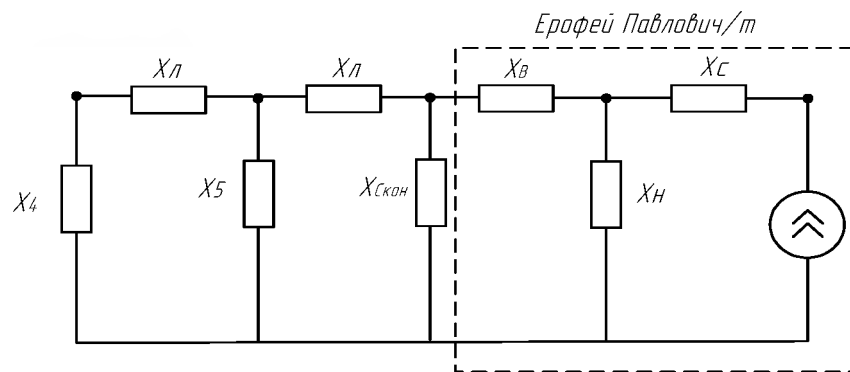
$$X_{\text{ВЕПавловичТ}} := \frac{165}{2}$$

$$X_{\text{ЛБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} := 10.25$$

$$X_{\text{СЕПавловичТ}} := 0$$

$$X_{\text{НПавловичТ}} := \frac{125}{2} = 62.5$$

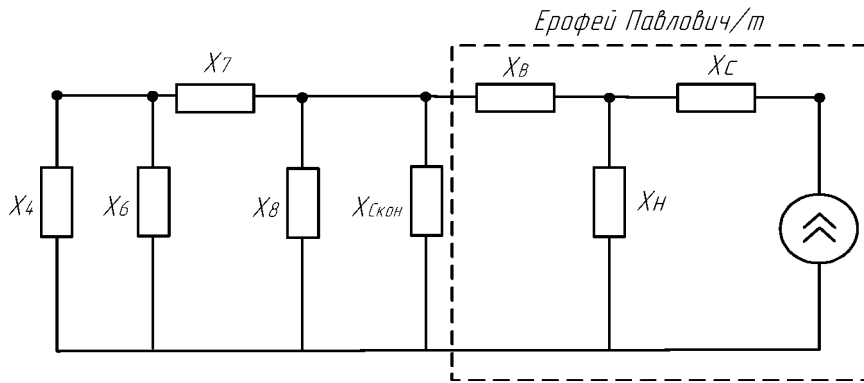
$$X_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} := -\left(\frac{23.9}{2.645}\right) = -4.518$$



$$X_4 := X_4'' = -25.922$$

$$X_5 := \frac{\frac{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}}{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}} \cdot X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}}{\frac{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}}{X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X_{\text{ВБольшаяОмутнаяТ}}} + X_{\text{СБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = -11.514$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

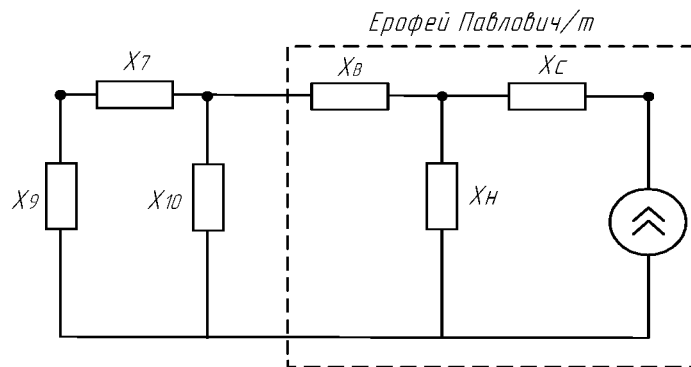


$$X6 := X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X5 + \frac{(X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X5)}{X_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = -17.17$$

$$X7 := X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} + X_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} \dots = 15.285$$

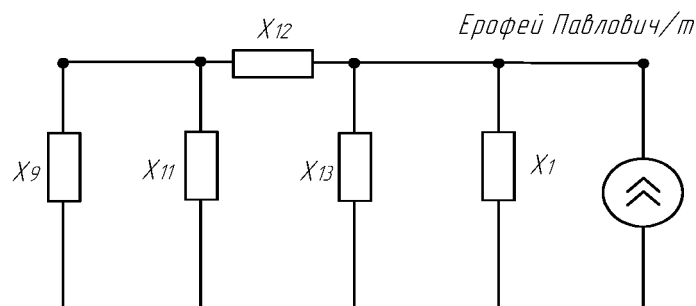
$$+ \frac{X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}} \cdot X_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X5}$$

$$X8 := X_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} + X5 + \frac{(X_{\text{БольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}} \cdot X5)}{X_{\text{ЛБАМТБольшаяОмутнаяТ}}} = -3.83$$



$$X9 := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -10.329$$

$$X10 := \frac{X8 \cdot X_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}}{X8 + X_{\text{СБольшаяОмутнаяТЕПавловичТ}}} = -2.075$$

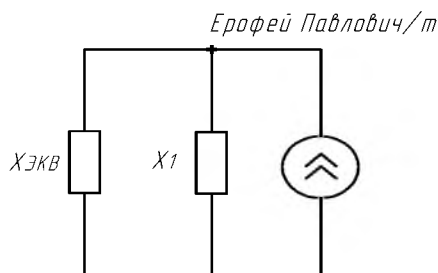


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

$$X_{11} := X_7 + X_{10} + \frac{(X_7 + X_{10})}{X_8} = 9.768$$

$$X_{12} := X_7 + X_8 + \frac{(X_7 + X_8)}{X_{10}} = 5.931$$

$$X_{13} := X_{10} + X_8 + \frac{(X_{10} + X_8)}{X_7} = -6.299$$



$$X_{14} := \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} = 179.856$$

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_{14} + X_{12}) \cdot X_{13}}{(X_{14} + X_{12}) + X_{13}} = -6.52$$

$$X_1 := x_{\text{НПавловичТ}} = 62.5$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{\text{ЕрофейПавлович}} := 5 + 6.1 \cdot i = 5 + 6.1i \text{ МВА}$

$$I_{\text{I}} := \frac{S_{\text{ЕрофейПавлович}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

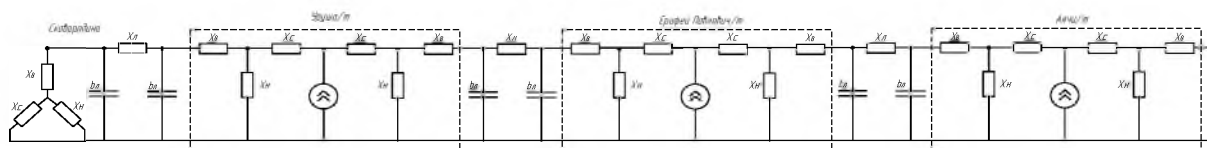
$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 1.702 \times 10^{-3} - 2.8i \times 10^{-4} \text{ кА}$$

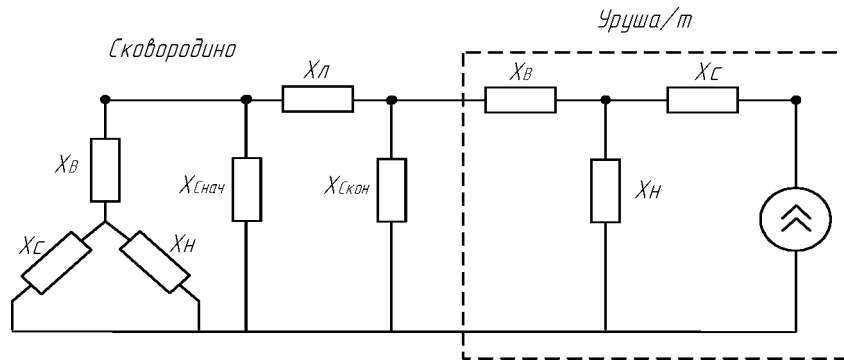
$$I_{2\text{ЕрофейПавлович}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 1.725 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{ЕрофейПавлович}} := I_{2\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = -0 \text{ кВ}$$

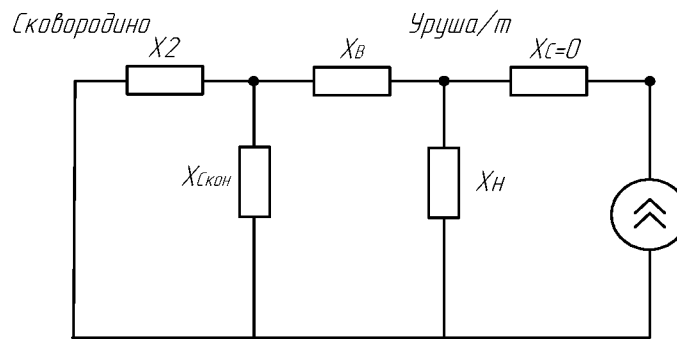
Участок сети Сковородино - Уруша/т - Ерофей Павлович/т - Аячи/т



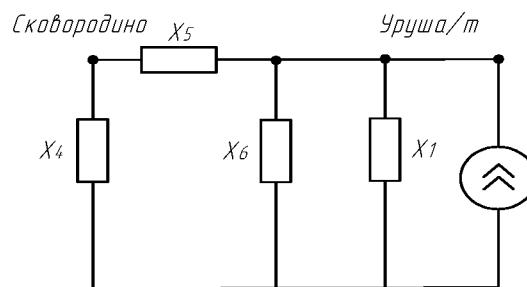
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



$$\begin{aligned}
 X_{ВУрушаТ} &:= \frac{165}{2} & X_{ЛСковородУрушаТ} &:= 32.4 \\
 X_{СУрушаТ} &:= 0 \\
 X_{НУрушаТ} &:= \frac{125}{2} = 62.5 & X_{ССковородУрушаТ} &:= -\left(\frac{75.54}{2.645}\right) = -14.28
 \end{aligned}$$



$$X2' := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородУрушаТ}} + X_{ЛСковородУрушаТ} = 16.616$$

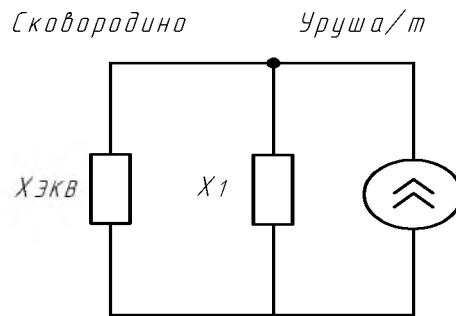


$$X4' := X2' + X_{ССковородУрушаТ} + \frac{(X2' \cdot X_{ССковородУрушаТ})}{X_{ВУрушаТ}} = -0.54$$

$$X5' := X2' + X_{ВУрушаТ} + \frac{(X2' \cdot X_{ВУрушаТ})}{X_{ССковородУрушаТ}} = 3.121$$

$$X6' := X_{ССковородУрушаТ} + X_{ВУрушаТ} + \frac{(X_{ССковородУрушаТ} \cdot X_{ВУрушаТ})}{X2'} = -2.682$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



$$X_{ЭКВ}' := \frac{(X4' + X5') \cdot X6'}{(X4' + X5') + X6'} = 68.22$$

$$X1' := X_{НУрушаТ} = 62.5$$

Нагрузка на ПС Уруша/т $S_{Уруша} := 22.5 + 24.6 \cdot i$ МВА

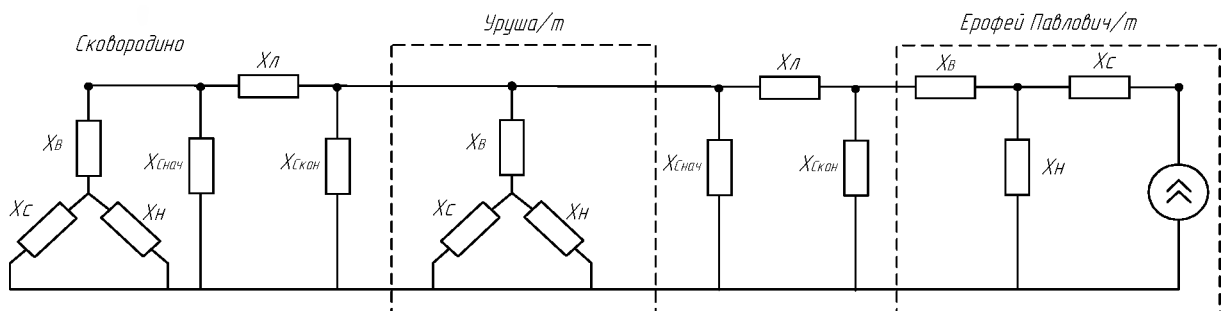
$$I_{I1} := \frac{S_{Уруша}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 0.03 + 0.032i \quad \text{кА}$$

$$I_{II1} := I_{I1} = 0.03 + 0.032i$$

$$I_{I2} := \frac{1}{3} \cdot (I_{I1} + a^2 \cdot I_{II1}) = 0.014 - 3.143i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

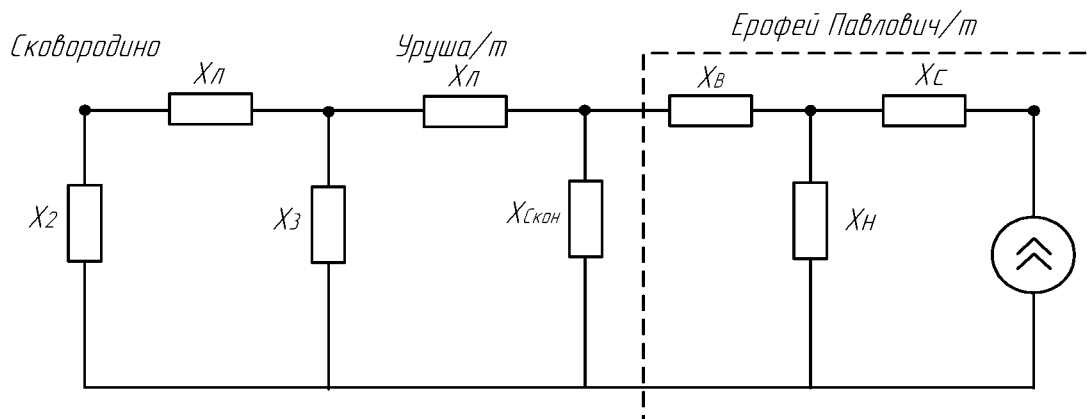
$$I_{2Уруша} := \sqrt{(\text{Re}(I_{I2}))^2 + (\text{Im}(I_{I2}))^2} = 0.015 \quad \text{кА}$$

$$U_{2Уруша} := I_{2Уруша} \cdot X_{ЭКВ}' = 0.9 \text{ кВ}$$



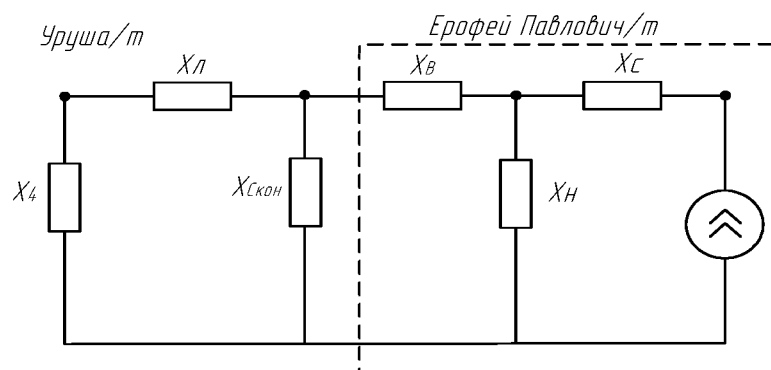
$$X_{СУрушаТЕПавловичТ} := -\left(\frac{66.9}{2.645}\right) = -12.647 \quad X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} := 28.7$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

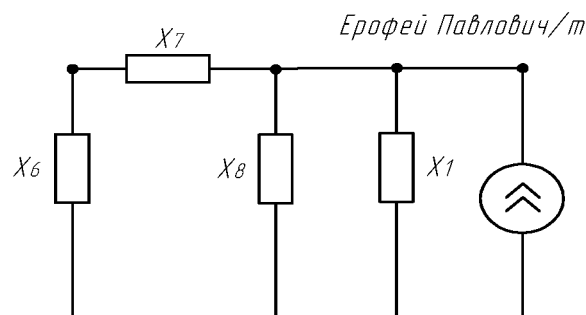


$$X2'' := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородУрушаТ}} = -15.784$$

$$X3''' := \frac{\frac{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) + X_{ССковородУрушаТ}} \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{\frac{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) \cdot X_{ССковородУрушаТ}}{(X_{ВУрушаТ} + X_{НУрушаТ}) + X_{ССковородУрушаТ}} + X_{СУрушаТЕПавловичТ}} = -7.032$$



$$X4''' := \frac{(X2'' + X_{ЛСковородУрушаТ}) \cdot X3'''}{(X2'' + X_{ЛСковородУрушаТ}) + X3'''} = -12.192$$



$$X5''' := X4''' + X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} = 16.508$$

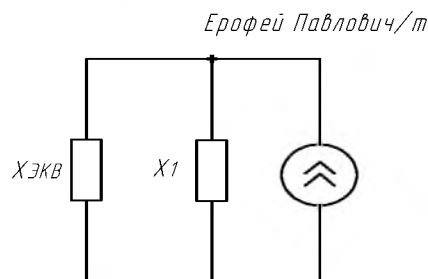
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$X6''' := X5''' + X_{СУрушаТЕПавловичТ} + \frac{(X5''' \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ})}{X_{ВЕПавловичТ}} = 1.331$$

$$X7''' := X5''' + X_{ВЕПавловичТ} + \frac{(X5''' \cdot X_{ВЕПавловичТ})}{X_{СУрушаТЕПавловичТ}} = -8.683$$

$$X8''' := X_{СУрушаТЕПавловичТ} + X_{ВЕПавловичТ} \dots = 6.652$$

$$+ \frac{X_{СУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_{ВЕПавловичТ}}{X5'''}$$



$$X_{ЭКВ}''' := \frac{(X6''' + X7''') \cdot X8'''}{(X6''' + X7''') + X8'''} = 69.853$$

$$X1''' := X_{НПавловичТ} = 62.5$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{ЕрофейПавлович} := 5 + 6.1 \cdot i = 5 + 6.1i$ МВА

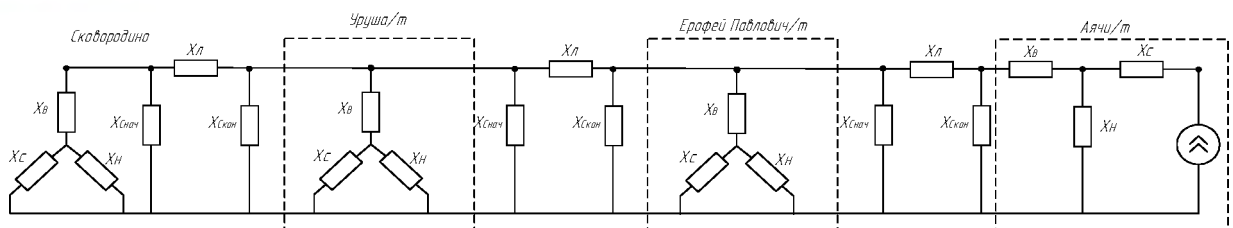
$$I_I := \frac{S_{ЕрофейПавлович}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{II} := I_I = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 1.702 \times 10^{-3} - 2.8i \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$I_{2ЕрофейПавлович2} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 1.725 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2Уруша} := I_{2ЕрофейПавлович2} \cdot X_{ЭКВ}''' = 0.12 \text{ кВ}$$



$$X_{ВАячиТ} := \frac{165}{2}$$

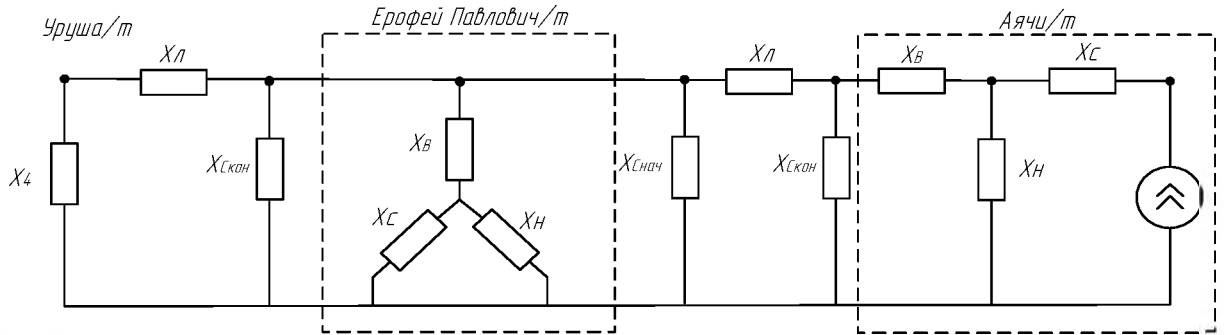
$$X_{ЛЕПавловичТАячиТ} := 28.7$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

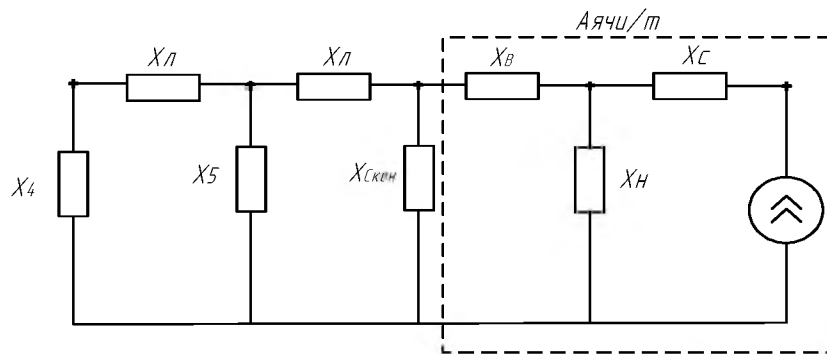
$$X_{САячиТ} := 0$$

$$X_{НАячиТ} := \frac{125}{2} = 62.5$$

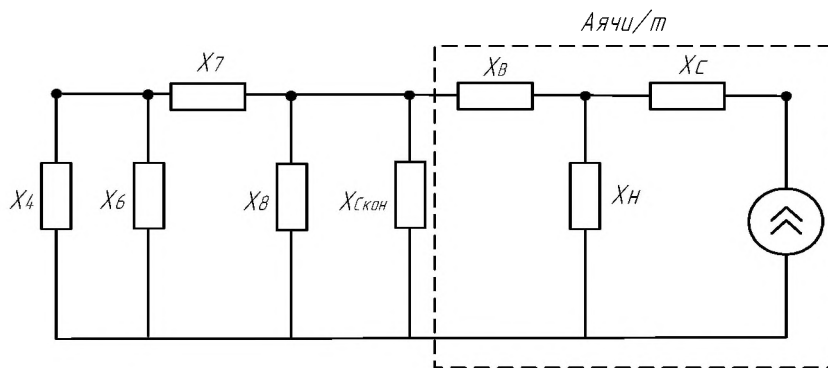
$$X_{СЕПавловичТАячиТ} := -\left(\frac{66.9}{2}\right) = -12.647$$



$$X_4 := X_4''' = -12.192$$



$$X_5 := \frac{\left[\frac{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}} \right] \cdot X_{СЕПавловичТАячиТ}}{\frac{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}}{(X_{ВЕПавловичТ} + X_{НПавловичТ}) \cdot X_{СУрушаТЕПавловичТ}} + X_{СЕПавловичТАячиТ}} = 1.08$$



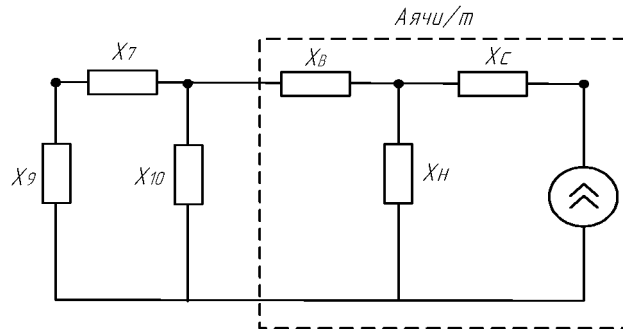
$$X_6 := X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} + X_5 + \frac{(X_{ЛУрушаТЕПавловичТ} \cdot X_5)}{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}} = 30.872$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

$$\underline{X7} := \underline{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ}} + \underline{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}} \dots = 815.958$$

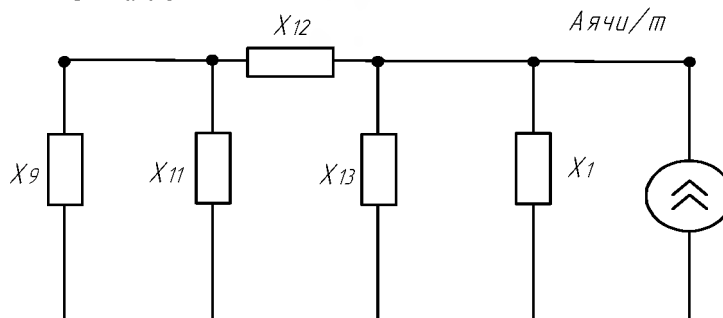
$$+ \frac{\underline{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ}} \cdot \underline{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}}}{X5}$$

$$\underline{X8} := X5 + \underline{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}} + \frac{(X5 \cdot \underline{X_{ЛЕПавловичТАячиТ}})}{\underline{X_{ЛУрушаТЕПавловичТ}}} = 30.872$$



$$\underline{X9} := \frac{X4 \cdot X6}{X4 + X6} = -20.149$$

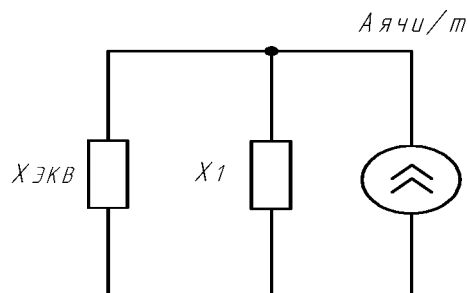
$$\underline{X10} := \frac{X8 \cdot \underline{X_{СЕПавловичТАячиТ}}}{X8 + \underline{X_{СЕПавловичТАячиТ}}} = -21.422$$



$$\underline{X11} := X7 + X10 + \frac{(X7 \cdot X10)}{X8} = 228.342$$

$$\underline{X12} := X7 + X8 + \frac{(X7 \cdot X8)}{X10} = -329.07$$

$$\underline{X13} := X8 + X10 + \frac{(X8 \cdot X10)}{X7} = 8.639$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$X_{\text{ЭКВ}}'' := \frac{\left(X_{12} + \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} \right) \cdot X_{13}}{\left(X_{12} + \frac{X_9 \cdot X_{11}}{X_9 + X_{11}} \right) + X_{13}} = 8.857$$

$$X_1 := X_{\text{НАЯЧИТ}}$$

Нагрузка на ПС Аячи/т $S_{\text{Аячи}} := 9.9 + 12 \cdot i \text{ МВА}$

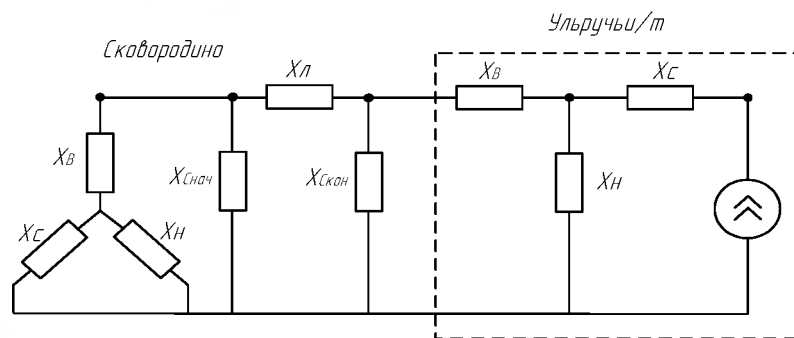
$$I_{\text{I}} := \frac{S_{\text{Аячи}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.013 + 0.016i \text{ кА}$$

$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 0.013 + 0.016i \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 6.711 \times 10^{-3} - 1.126i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{Аячи}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 6.804 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{Аячи}} := I_{2\text{Аячи}} \cdot X_{\text{ЭКВ}}'' = 0.06 \text{ кВ}$$



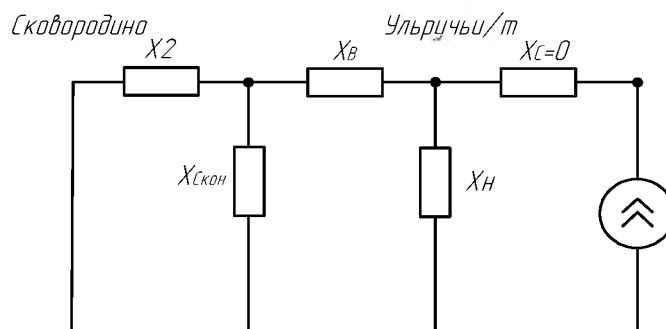
$$X_{\text{ВульручьиТ}} := \frac{165}{2}$$

$$X_{\text{ЛСковородиноУльручьиТ}} := 10.67$$

$$X_{\text{СУльручьиТ}} := 0$$

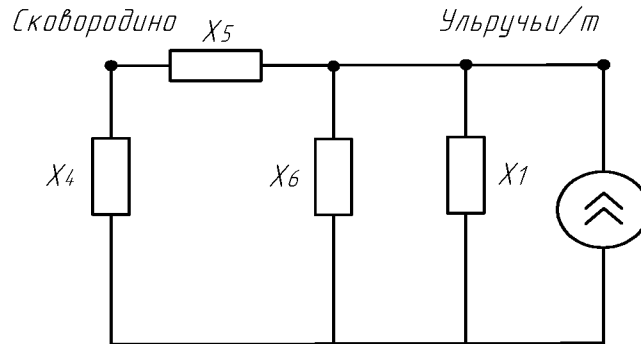
$$X_{\text{НУльручьиТ}} := \frac{125}{2} = 62.5$$

$$X_{\text{ССковородиноУльручьиТ}} := -\left(\frac{\frac{25.83}{2.645}}{2} \right) = -4.883$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

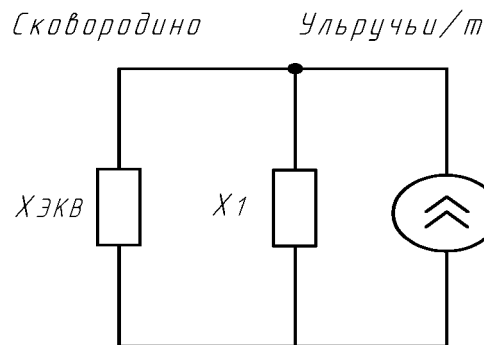
$$X2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноУльручьГ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноУльручьГ} + X_{ЛСковородиноУльручьГ}} \dots = 5.623$$



$$X4 := X2 + X_{ССковородиноУльручьГ} + \frac{(X2 \cdot X_{ССковородиноУльручьГ})}{X_{ВульручьГ}} = 0.407$$

$$X5 := X2 + X_{ВульручьГ} + \frac{(X2 \cdot X_{ВульручьГ})}{X_{ССковородиноУльручьГ}} = -6.878$$

$$X6 := X_{ССковородиноУльручьГ} + X_{ВульручьГ} \dots = 5.973 + \frac{X_{ССковородиноУльручьГ} \cdot X_{ВульручьГ}}{X2}$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 77.617$$

$$X1 := X_{НУльручьГ} = 62.5$$

Нагрузка на ПС УльручьГ/т $S_{УльручьГ} := 11.1 + 8.6 \cdot i$ МВА

$$I_{II} := \frac{S_{УльручьГ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 0.015 + 0.011i \text{ кА}$$

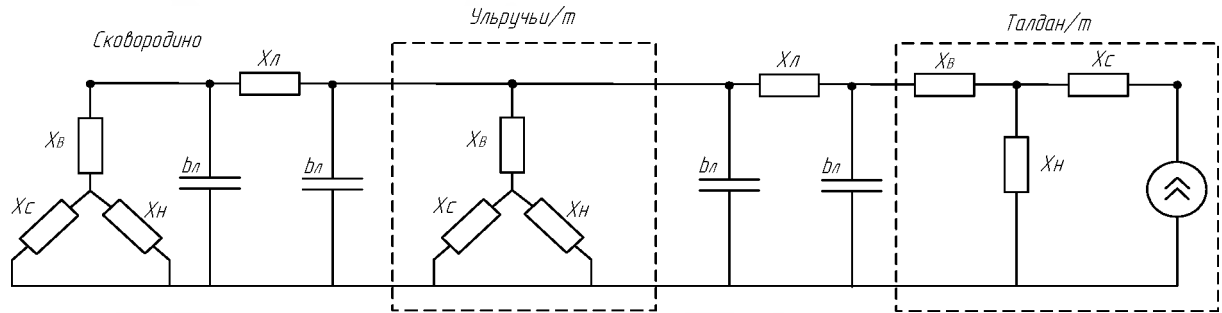
$$I_{II} := I_I = 0.015 + 0.011i \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 5.685 \times 10^{-3} - 2.324i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{Ульручы}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 6.142 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{Ульручы}} := I_{2\text{Ульручы}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.477 \text{ кВ}$$



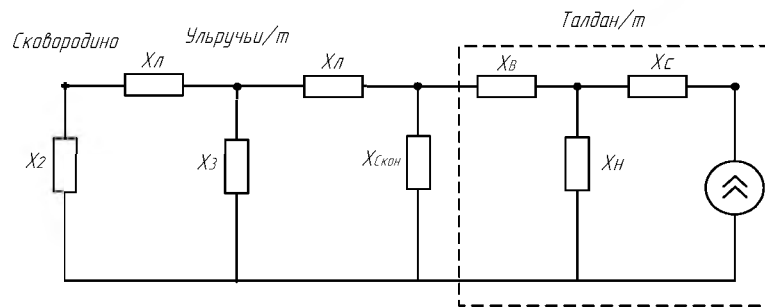
$$X_{\text{ВТалданТ}} := 165$$

$$X_{\text{ЛУльручыТТалданТ}} := 19.36$$

$$X_{\text{СТалданТ}} := 0$$

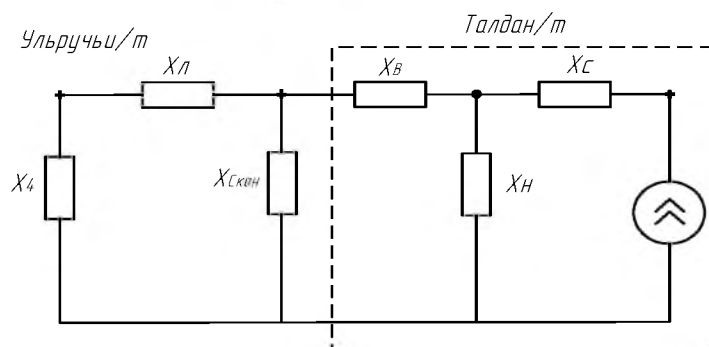
$$X_{\text{НТалданТ}} := 125 = 125$$

$$X_{\text{СУльручыТТаладанТ}} := -\left(\frac{\frac{48.04}{2.645}}{2}\right) = -9.081$$



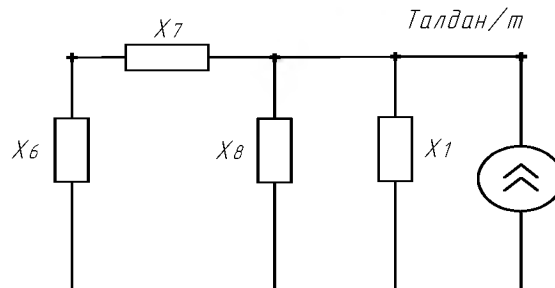
$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}} = -5.047$$

$$X_3 := \frac{\frac{(X_{\text{ВТалданТ}} + X_{\text{НТалданТ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручыТ}} \cdot X_{\text{СУльручыТТаладанТ}}}{(X_{\text{ВТалданТ}} + X_{\text{НТалданТ}}) + X_{\text{ССковородиноУльручыТ}}}}{(X_{\text{ВТалданТ}} + X_{\text{НТалданТ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручыТ}} + X_{\text{СУльручыТТаладанТ}}} = -3.211$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

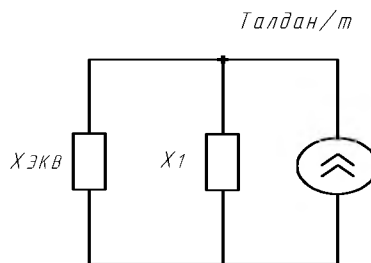
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьГ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьГ}} + X2) + X3} = -7.484$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) + X_{\text{ССковородиноУльручьГ}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) \cdot X_{\text{ССковородиноУльручьГ}}} = 6.642$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) + X_{\text{ВТалданГ}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}}) \cdot X_{\text{ВТалданГ}}} = -224.438$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{ССковородиноУльручьГ}}) + X_{\text{ВТалданГ}} + \frac{(X_{\text{ССковородиноУльручьГ}} \cdot X_{\text{ВТалданГ}})}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьГТалданГ}})}}{X_{\text{ССковородиноУльручьГ}}} = 92.2$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 160.117$$

$$X1 := X_{\text{ВТалданГ}} = 165$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{Талдан}} := 4.8 + 8.2 \cdot i$ МВА

$$I_{\text{Л}} := \frac{S_{\text{Талдан}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

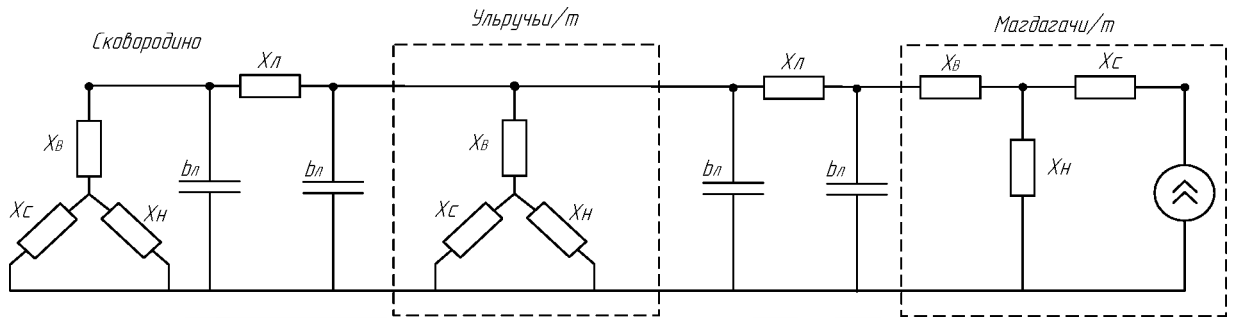
$$I_{\text{Ц}} := I_{\text{Л}} = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{Л}} + a^2 \cdot I_{\text{Ц}}) = 2.078 \times 10^{-3} - 1.245i \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{Талдан}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 2.078 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{Талдан}} := I_{2\text{Талдан}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.333 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



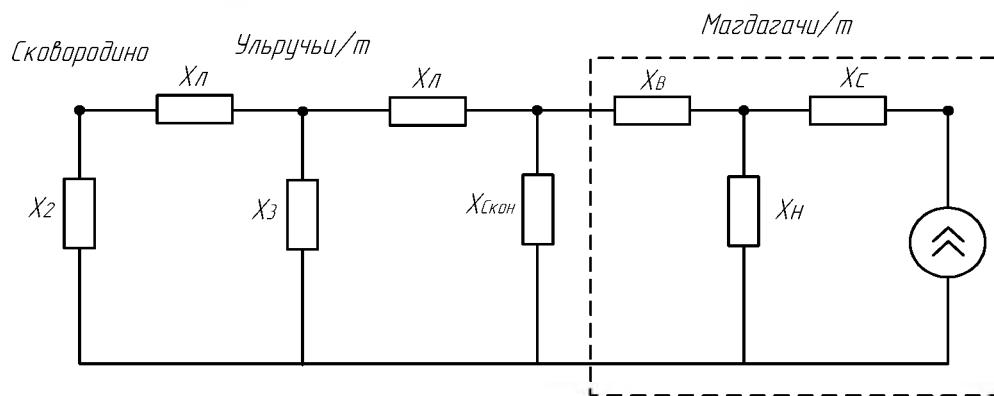
$$X_{ВМагдагачиТ} := \frac{165}{2}$$

$$X_{ЛУльручьиТМагдагачи} := 54.14$$

$$X_{СМагдагачиТ} := 0$$

$$X_{НМагдагачиТ} := \frac{125}{2} = 62.5$$

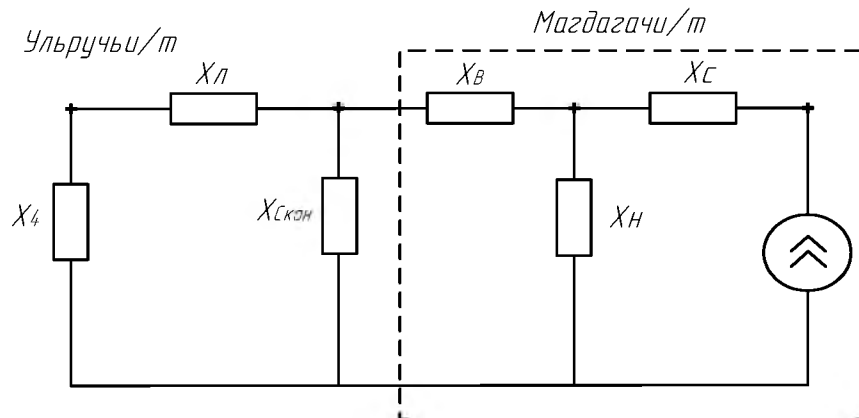
$$X_{СУльручьиТМагдагачи} := -\left(\frac{125.7}{2.645}\right) = -23.762$$



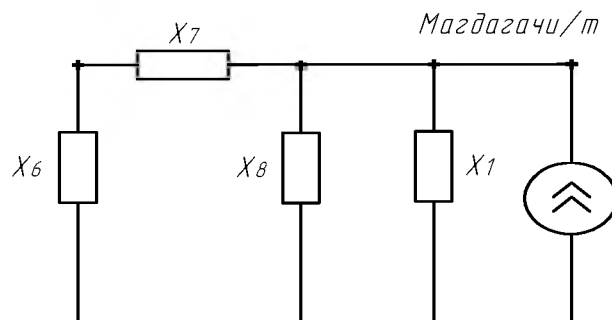
$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноУльручьиТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноУльручьиТ}} = -5.047$$

$$X_3 := \frac{\left(\begin{matrix} X_{ВульручьиТ} \dots \\ + X_{НУльручьиТ} \end{matrix} \right) \cdot X_{ССковородиноУльручьиТ}}{\left(\begin{matrix} X_{ВульручьиТ} \dots \\ + X_{НУльручьиТ} \end{matrix} \right) + X_{ССковородиноУльручьиТ}} \cdot X_{СУльручьиТМагдагачи} = -4.167$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
 Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
 последовательности



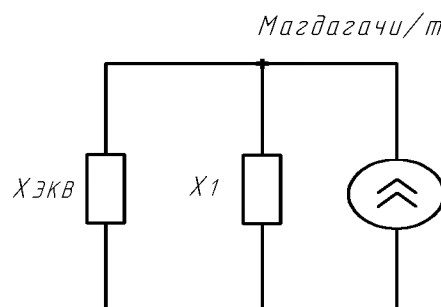
$$X4 := \frac{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьиТ}} + X2) \cdot X3}{(X_{\text{ЛСковородиноУльручьиТ}} + X2) + X3} = -16.093$$



$$X6 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}}) + X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} + X_{\text{ВМагдагачиТ}}} = 3.327$$

$$X7 := \frac{(X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots}{(X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}}) \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}} + X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}}} = -11.55$$

$$X8 := \frac{(X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}}) + X_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots}{X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}} + \frac{X_{\text{СУльручьиТМагдагачи}} \cdot X_{\text{ВМагдагачиТ}}}{X4 + X_{\text{ЛУльручьиТМагдагачи}}}} = 7.213$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

$$X_{\text{ЭКВ}} := \frac{(X_6 + X_7) \cdot X_8}{(X_6 + X_7) + X_8} = 58.738$$

$$X_1 := X_{\text{НМагдагачиГ}} = 62.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи $S_{\text{Магдагачи27.5}} := (3.67 + 3.63) + (5.38 + 5.48) \cdot i \quad \text{МВА}$

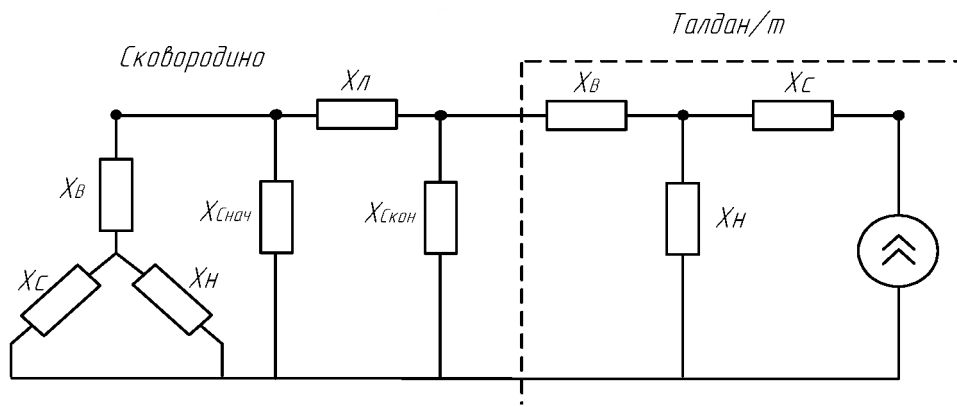
$$I_{\text{I}} := \frac{\frac{S_{\text{Магдагачи27.5}}}{4}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 2.855 \times 10^{-3} - 1.951i \times 10^{-4} \quad \text{кА}$$

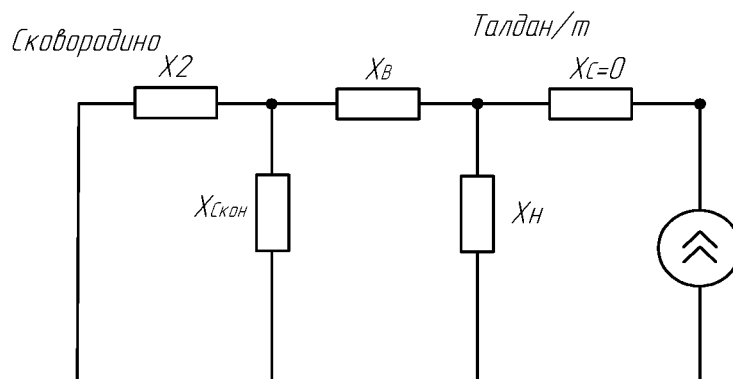
$$I_{2\text{Магдагачи}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 2.862 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{2\text{Магдагачи}} := I_{2\text{Магдагачи}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.168 \quad \text{кВ}$$



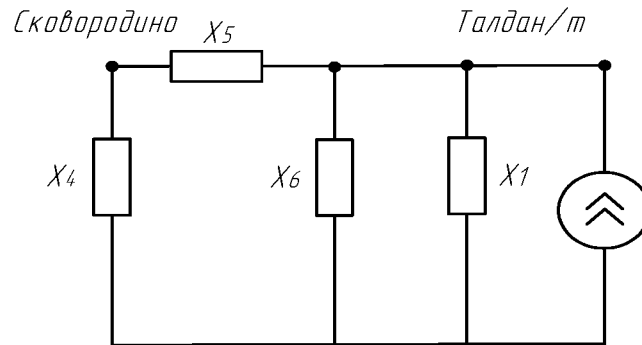
$$X_{\text{ССковородиноТалданГ}} := -\left(\frac{\frac{69.6}{2.645}}{2}\right) = -13.157$$

$$X_{\text{ЛСковородиноТалданГ}} := 27.96$$



$$X_2 := \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot X_{\text{ССковородиноТалданГ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + X_{\text{ССковородиноТалданГ}}} = -14.424$$

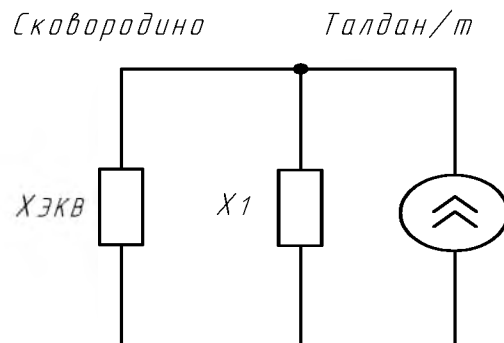
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



$$X4 := X2 + X_{ССковородиноТалданТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ССковородиноТалданТ})}{X_{ВТалданТ}} = -26.431$$

$$X5 := X2 + X_{ВТалданТ} + \frac{(X2 \cdot X_{ВТалданТ})}{X_{ССковородиноТалданТ}} = 331.464$$

$$X6 := X_{ВТалданТ} + X_{ССковородиноТалданТ} + \frac{(X_{ВТалданТ} \cdot X_{ССковородиноТалданТ})}{X2} = 302.351$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 151.843$$

$$X1 := X_{НТалданТ} = 125$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{Талдан} := 4.8 + 8.2 \cdot i$ МВА

$$I_{I} := \frac{S_{Талдан}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

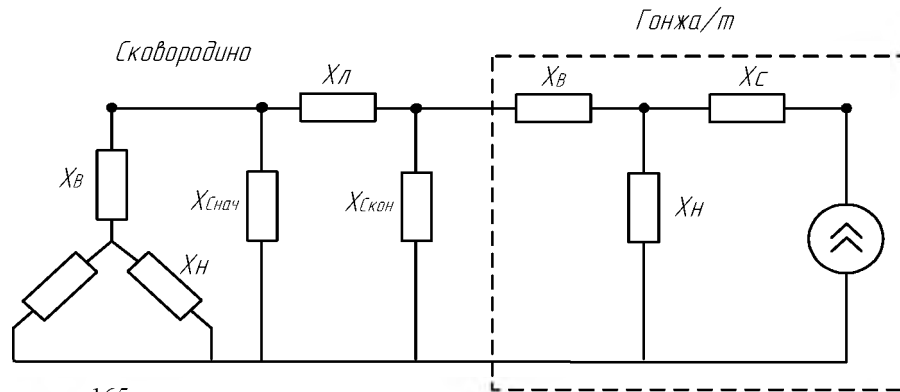
$$I_{II} := I_I = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 2.078 \times 10^{-3} - 1.245i \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$I_{2Талдан2} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 2.078 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2Талдан2} := I_{2Талдан2} \cdot X_{ЭКВ} = 0.316 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности



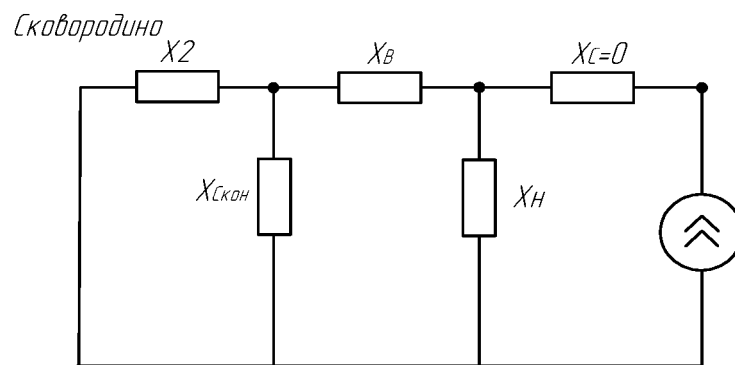
$$X_{ВГонжаТ} := \frac{165}{2} = 82.5$$

$$X_{ЛсковородиноГонжаТ} := 46.08$$

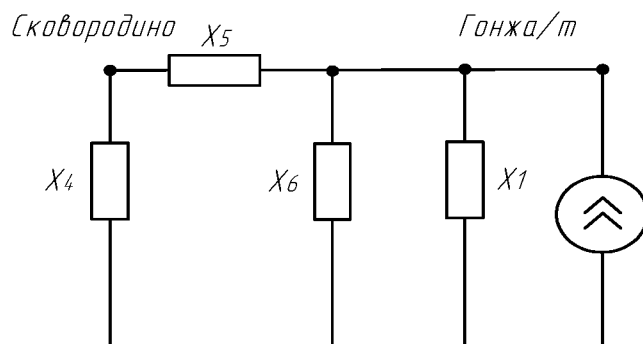
$$X_{СГонжаТ} := 0$$

$$X_{НГонжаТ} := \frac{125}{2} = 62.5$$

$$X_{ССковородиноГонжаТ} := -\left(\frac{\frac{115.2}{2.645}}{2}\right) = -21.777$$



$$X_2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} = -25.481$$

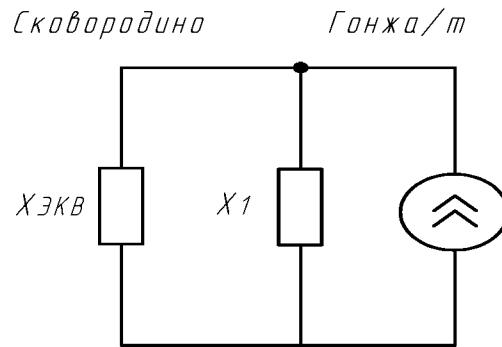


$$X_4 := X_2 + X_{ССковородиноГонжаТ} + \frac{(X_2 \cdot X_{ССковородиноГонжаТ})}{X_{ВГонжаТ}} = -40.532$$

$$X_5 := X_2 + X_{ВГонжаТ} + \frac{(X_2 \cdot X_{ВГонжаТ})}{X_{ССковородиноГонжаТ}} = 153.552$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности

$$X6 := X_{ВГонжаТ} + X_{ССковородиноГонжаТ} + \frac{(X_{ВГонжаТ} \cdot X_{ССковородиноГонжаТ})}{X2} = 131.23$$



$$X_{ЭКВ} := \frac{(X4 + X5) \cdot X6}{(X4 + X5) + X6} = 60.723$$

$$X1 := X_{НГонжаТ} = 62.5$$

Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{ГонжаТ} := 4.9 + 8.2 \cdot \text{МВА}$

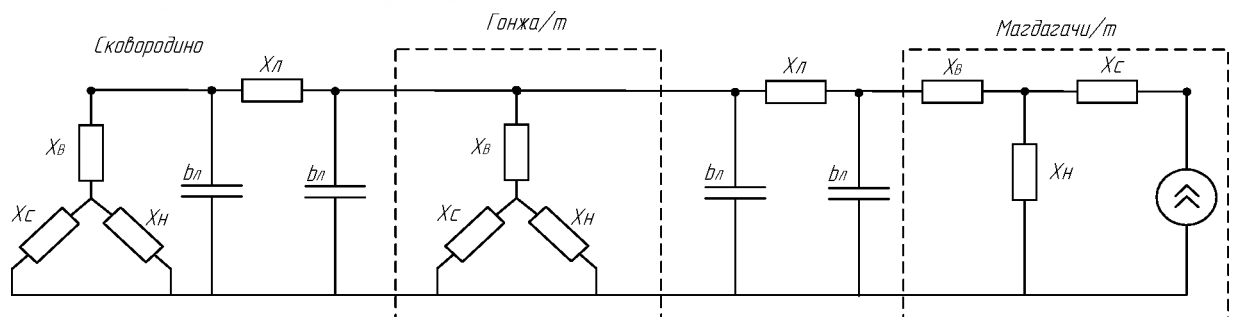
$$I_{II} := \frac{S_{ГонжаТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 6.43 \times 10^{-3} + 0.011i \text{ кА}$$

$$I_{II} := I_I = 6.43 \times 10^{-3} + 0.011i \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 4.178 \times 10^{-3} - 6.278i \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$I_{2Гонжа} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 4.178 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

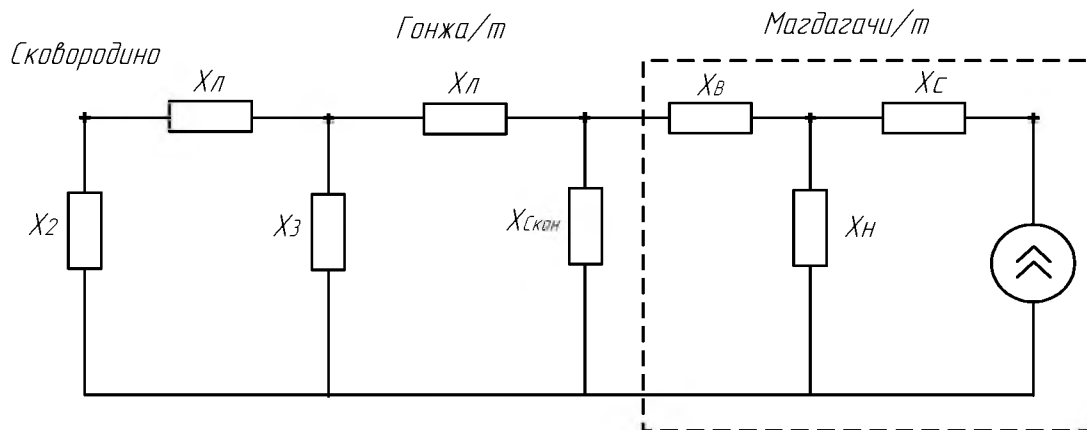
$$U_{2Гонжа} := I_{2Гонжа} \cdot X_{ЭКВ} = 0.254 \text{ кВ}$$



$$X_{СГонжаТМагдагачи} := -\left(\frac{35.95}{2.645}\right) = -6.796$$

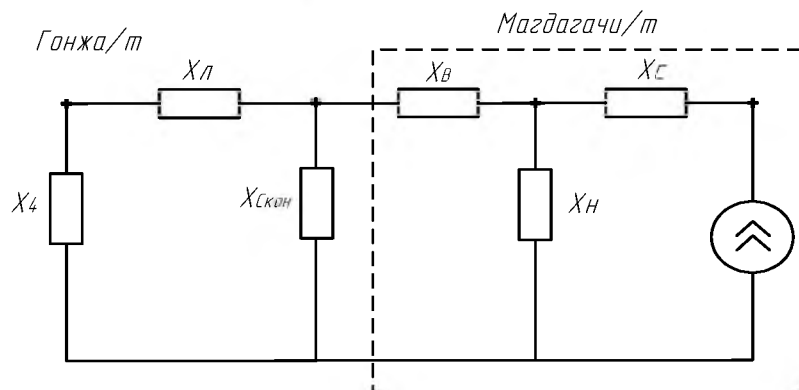
$$X_{ЛГонжаТМагдагачи} := 14.38$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

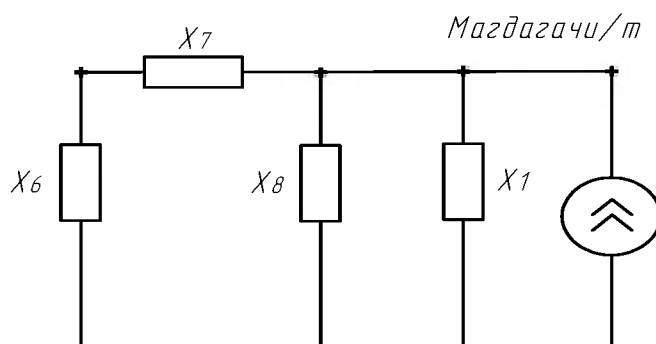


$$X2 := \frac{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВСковород} + X_{НСковород}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} = -25.481$$

$$X3 := \frac{\frac{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} \cdot X_{СГонжаТМагдагачи}}{\frac{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) \cdot X_{ССковородиноГонжаТ}}{(X_{ВГонжаТ} + X_{НГонжаТ}) + X_{ССковородиноГонжаТ}} + X_{СГонжаТМагдагачи}} = -5.371$$



$$X4 := \frac{(X_{ЛСковородиноГонжаТ} + X2) \cdot X3}{(X_{ЛСковородиноГонжаТ} + X2) + X3} = -7.266$$

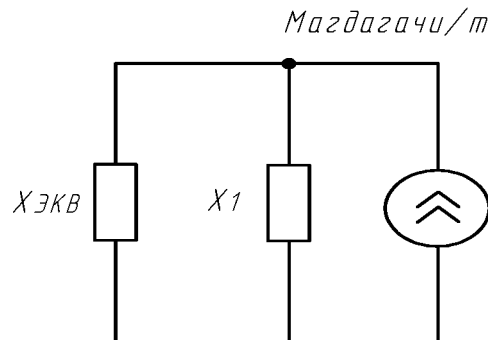


Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
последовательности

$$\underline{X6} := \frac{(X4 + x_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + x_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \dots}{(X4 + x_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot x_{\text{СГонжаТМагдагачи}} + x_{\text{ВМагдагачиТ}}} = -0.268$$

$$\underline{X7} := \frac{(X4 + x_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) + x_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots}{(X4 + x_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}) \cdot x_{\text{ВМагдагачиТ}} + x_{\text{СГонжаТМагдагачи}}} = 3.253$$

$$\underline{X8} := \frac{x_{\text{СГонжаТМагдагачи}} + x_{\text{ВМагдагачиТ}} \dots}{x_{\text{СГонжаТМагдагачи}} \cdot x_{\text{ВМагдагачиТ}} + X4 + x_{\text{ЛГонжаТМагдагачи}}} = -3.107$$



$$\underline{X_{ЭКВ}} := \frac{(X6 + X7) \cdot X8}{(X6 + X7) + X8} = 75.704$$

$$\underline{X1} := x_{\text{НМагдагачиТ}} = 62.5$$

Нагрузка на ПС Магдагачи $\underline{S_{\text{Магдагачи27.5}}} := (3.67 + 3.63) + (5.38 + 5.48) \cdot i \text{ МВА}$

$$\underline{I_{II}} := \frac{S_{\text{Магдагачи27.5}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$\underline{I_{II}} := I_{II} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$\underline{I_2} := \frac{1}{3} \cdot (I_{II} + a^2 \cdot I_{II}) = 2.855 \times 10^{-3} - 1.951i \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{Магдагачи2}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 2.862 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{Магдагачи2}} := I_{2\text{Магдагачи2}} \cdot X_{ЭКВ} = 0.217 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б
 Расчет коэффициента несимметрии напряжений по обратной
 последовательности

Ток обратной последовательности на ПС Сковородино, кА:

$$I_{2\Sigma} := \sqrt{I_{2\text{СковородиноГ}}^2 + (I_{2\text{БАМ}})^2 + (I_{2\text{БОмутная}})^2 + (I_{2\text{ЕрофейПавлович}})^2 \dots = 0.025 \text{ кА}$$

$$\sqrt{+ I_{2\text{Уруша}}^2 + I_{2\text{ЕрофейПавлович2}}^2 + I_{2\text{Аячи}}^2 + I_{2\text{Ульручы}}^2 \dots}$$

$$\sqrt{+ I_{2\text{Талдан}}^2 + I_{2\text{Магдагачи}}^2 + I_{2\text{Талдан2}}^2 + I_{2\text{Гонжа}}^2 + I_{2\text{Магдагачи2}}^2}$$

$$X_{\text{ВСковород}} := 104$$

$$X_{\text{НСковород}} := 97.8 \cdot 2 = 195.6$$

Напряжение обратной последовательности на ПС Сковородино, кВ:

$$U_{2\Sigma} := I_{2\Sigma} \cdot (X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) = 7.487$$

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности :

$$K_{2U} := \frac{U_{2\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = 3.403$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчет показателей качества электрической энергии после установки фильтросимметрирующего устройства

$$n := 3$$

$$Q_{AC} := 7 \text{ МВар}$$

$$Q_{BC} := 5.9 \text{ МВар}$$

$$X_{ACc} := \frac{U_{НОМ}^2}{-Q_{AC} \cdot n} = -22.1 \text{ Ом}$$

$$X_{BCc} := \frac{U_{НОМ}^2}{-Q_{BC} \cdot n} = -27.345 \text{ Ом}$$

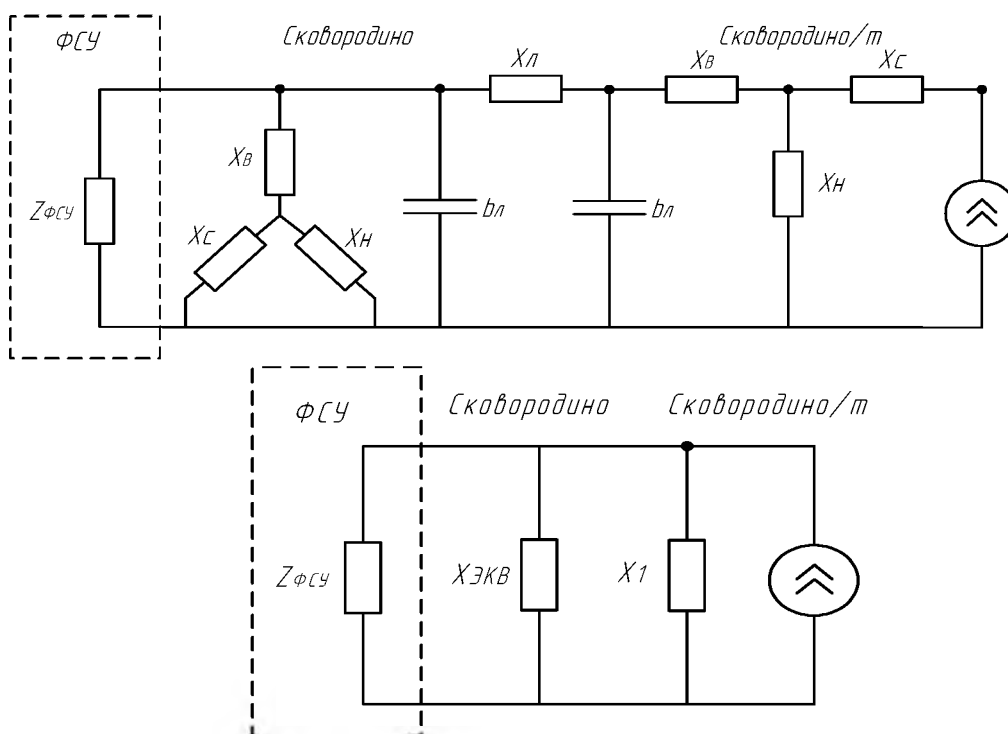
$$X_{ACL} := \frac{|X_{ACc}|}{n^2} = 2.456 \text{ Ом}$$

$$X_{BCL} := \frac{|X_{BCc}|}{n^2} = 3.038 \text{ Ом}$$

$$X_{AC} := X_{ACc} + X_{ACL} = -19.645$$

$$X_{BC} := X_{BCc} + X_{BCL} = -24.306$$

$$Z_{ФСУ} := \frac{X_{AC} \cdot X_{BC}}{X_{AC} + X_{BC}} = -10.864$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 247.333 \quad X_1 := 187.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.363$$

$$\text{Нагрузка на ПС Сковородино/т} \quad S_{\text{СковородиноТ}} := \sqrt{11^2 + 11.9^2} = 16.205 \text{ МВА}$$

$$U_{НОМ} := 220 \text{ кВ}$$

$$I := \frac{S_{\text{СковородиноТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 0.014 \text{ кА}$$

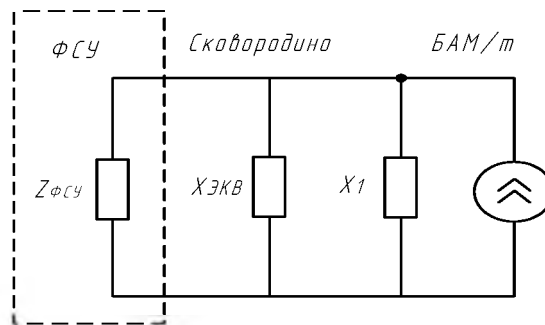
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.065$$

$$I_{1\text{СковородиноТ}} := K_1 \cdot I = -9.145 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{СковородиноТ}} := I_{1\text{СковородиноТ}} \cdot X_1 = -0.171 \text{ кВ}$$

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



$$X_{\text{ЭКВ}'} := 69.132$$

$$X_{1'} := 187.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}'} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.89$$

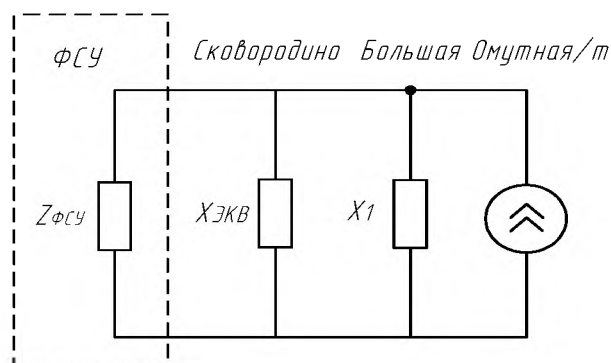
Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМТ}} := \sqrt{(16.6)^2 + 24^2} = 29.182 \text{ МВА}$

$$I' := \frac{S_{\text{БАМТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.026 \text{ кА}$$

$$K_{1'} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.074$$

$$I_{1\text{БАМ}} := K_{1'} \cdot I = -9.145 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{БАМ}} := I_{1\text{БАМ}} \cdot X_1 = -0.171 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}''} := 75.764$$

$$X_{1''} := 62.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.683$$

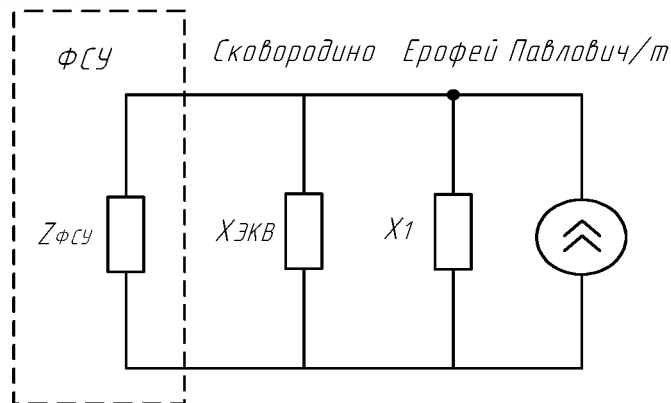
Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{\text{БОмутнаяТ}} := \sqrt{11.8^2 + (14.4)^2} = 18.617$ МВА

$$I := \frac{S_{\text{БОмутнаяТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.016 \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.255$$

$$I_{\text{БольшаяОмутная}} := K_1 \cdot I = -4.146 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{БольшаяОмутная}} := I_{\text{БольшаяОмутная}} \cdot X_1 = -0.259 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 26.65$$

$$X_1 := 187.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -18.341$$

С_ЕрофейПавловичТ $S_{\text{ЕрофейПавловичТ}} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887$ МВА

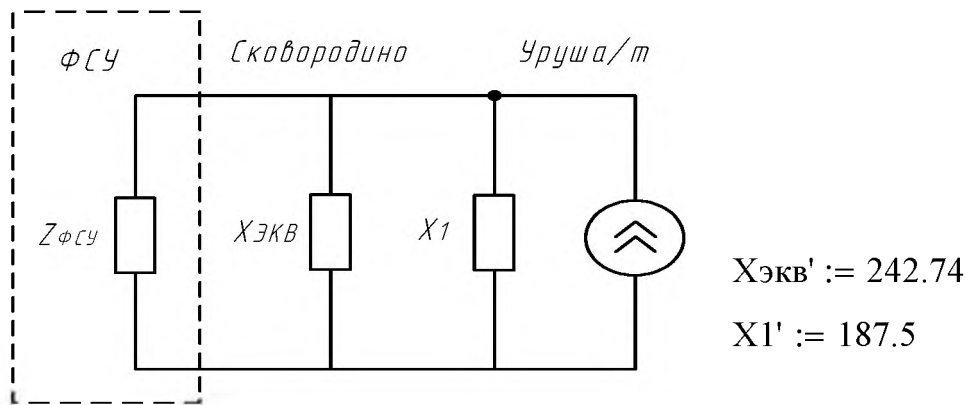
$$I := \frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.45 \text{ кА} \cdot 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.108$$

$$I_{\text{ЕрофейПавлович}} := K_1 \cdot I = -3.74 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{ЕрофейПавлович}} := I_{\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_1 = -0.07 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВФСУ}' := \frac{X_{ЭКВ}' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}' + Z_{ФСУ}} = -11.373$$

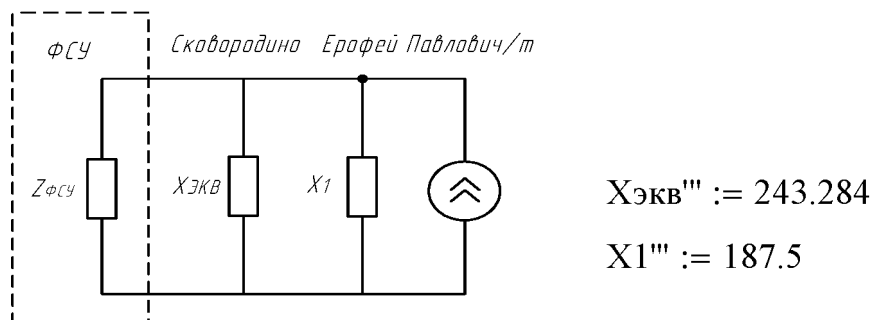
Нагрузка на ПС Уруша/т $S_{УрушаГ} := \sqrt{(22.5)^2 + (24.6)^2} = 33.338 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{УрушаГ}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 0.015 \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X1'} = -0.065$$

$$I_{1УрушаГ} := K_1 \cdot I = -9.416 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_1 := I_{1УрушаГ} \cdot X1' = -0.177 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВФСУ}''' := \frac{X_{ЭКВ}''' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}''' + Z_{ФСУ}} = -11.373$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т

$$S_{ЕрофейПавловичГ} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

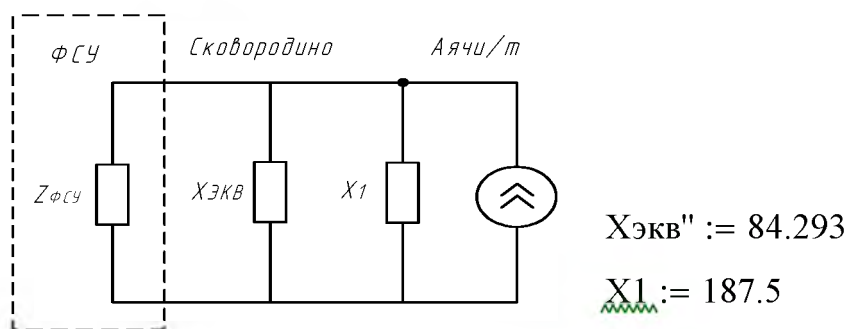
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$I := \frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.45 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_{\text{ЭКВФСУ}}} = 0.5$$

$$I_{1\text{ЕрофейПавловичТ}} := K_1 \cdot I = 1.725 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{ЕрофейПавловичТ}} := I_{1\text{ЕрофейПавловичТ}} \cdot X1'' = 0.323 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}' \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}}' + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.373$$

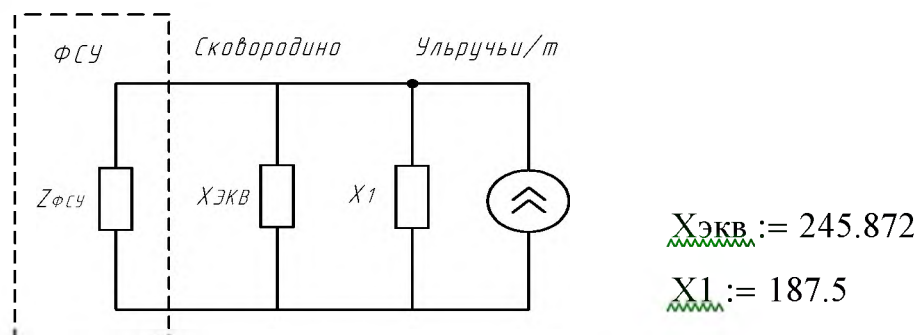
Нагрузка на ПС Аячи/т $S_{\text{АячиТ}} := \sqrt{(9.9)^2 + (12)^2} = 15.557 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{\text{АячиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.014 \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X1} = -0.065$$

$$I_{1\text{АячиТ}} := K_1 \cdot I = -8.788 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Аячи}} := I_{1\text{АячиТ}} \cdot X1 = -0.165 \text{ кВ}$$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.366$$

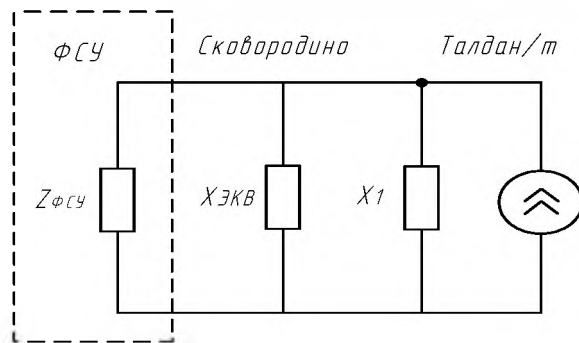
Нагрузка на ПС Ульручьи/т $S_{\text{УльручьиТ}} := \sqrt{(11.1)^2 + (8.6)^2} = 14. \text{MBA}$

$$I := \frac{S_{\text{УльручьиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.012 \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.065$$

$$I_{1\text{УльручьиТ}} := K_1 \cdot I = -7.927 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{УльручьиТ}} := I_{1\text{УльручьиТ}} \cdot X_1 = -0.149 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 493.372$$

$$X_1 := 375$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.109$$

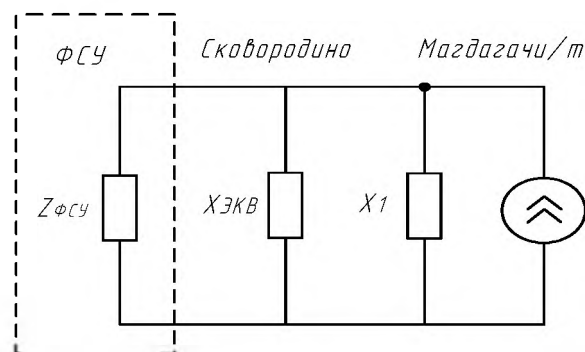
Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{ТалданТ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ MBA}$

$$I := \frac{S_{\text{ТалданТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 4.156 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.031$$

$$I_{1\text{Талдан}} := K_1 \cdot I = -1.269 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Талдан}} := I_{1\text{Талдан}} \cdot X_1 = -0.048 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 239.579$$

$$X_1 := 187.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.38$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

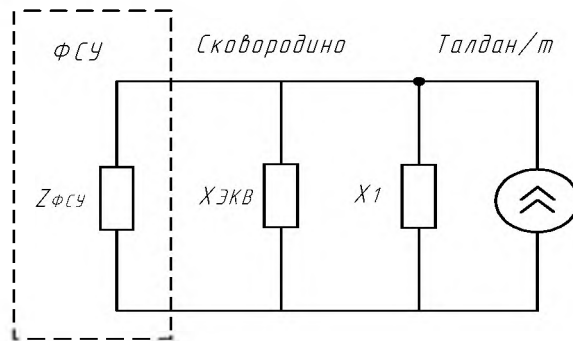
$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 1 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 5.723 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.065$$

$$I_{1\text{Магдагачи}} := K_1 \cdot I = -3.698 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи}} := I_{1\text{Магдагачи}} \cdot X_1 = -0.069 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 490.614$$

$$X_1 := 375$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = \blacksquare$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{ТалданТ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

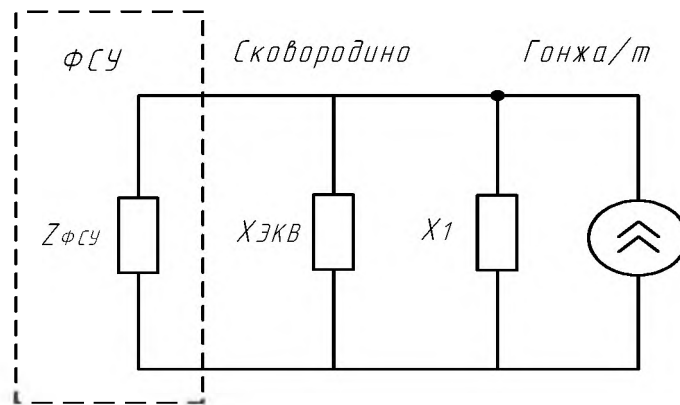
$$I := \frac{\frac{S_{\text{ТалданТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 4.156 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.031$$

$$I_{1\text{Талдан2}} := K_1 \cdot I = -1.269 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Талдан2}} := I_{1\text{Талдан2}} \cdot X_1 = -0.048 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВ} := 240.241$$

$$X1 := 187.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = \blacksquare$$

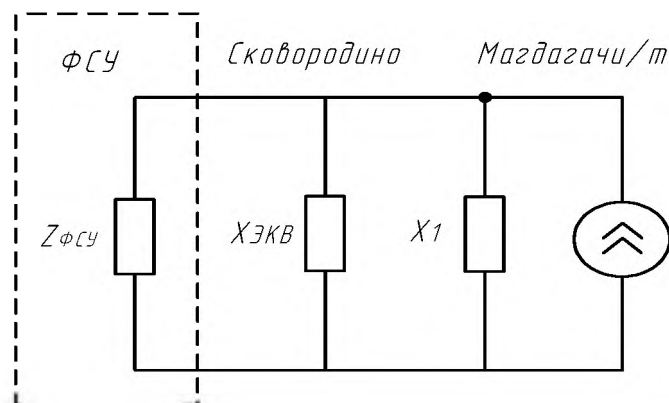
Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{ГонжаТ} := \sqrt{(4.9)^2 + (8.2)^2} = 9.5 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{ГонжаТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta} = 4.178 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X1} = -0.065$$

$$I_{Гонжа} := K_1 \cdot I = -2.699 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{Гонжа} := I_{Гонжа} \cdot X1 = -0.051 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВ} := 245.235$$

$$X1 := 187.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = \dots$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{\text{МагдагачиГ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \quad \text{МВА}$$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{МагдагачиГ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 5.723 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.065$$

$$I_{1\text{Магдагачи2}} := K_1 \cdot I = -3.694 \times 10^{-4} \quad \text{кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи2}} := I_{1\text{Магдагачи2}} \cdot X_1 = -0.069 \quad \text{кВ}$$

Суммарный ток третьей гармоники на ПС Сковородино, кА:

$$I_{3\Sigma} := \sqrt{I_{1\text{СковородиноГ}}^2 + (I_{1\text{БАМ}}^2) + (I_{1\text{БольшаяОмутная}})^2 \dots = 4.964 \times 10^{-3}$$

$$+ (I_{1\text{ЕрофейПавлович}})^2 \dots$$

$$+ I_{1\text{УрушаГ}}^2 + I_{1\text{ЕрофейПавлович2}}^2 + I_{1\text{АячиГ}}^2 + I_{1\text{УльручьГ}}^2 \dots$$

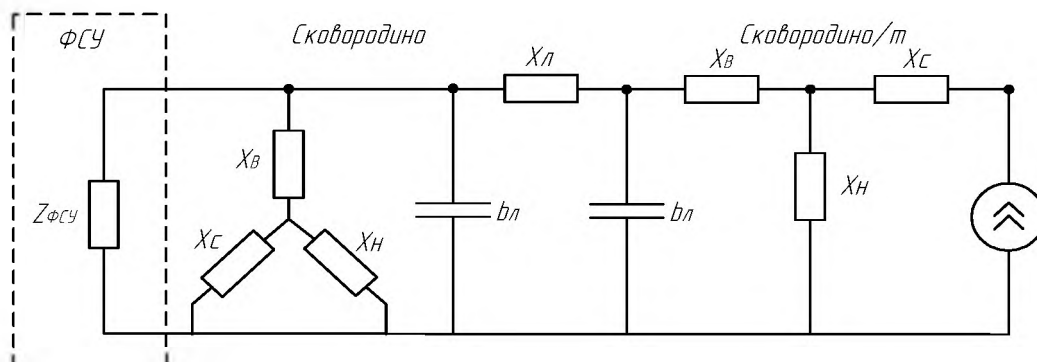
$$+ I_{1\text{Талдан}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}}^2 + I_{1\text{Талдан2}}^2 + I_{1\text{Гонжа}}^2 \dots$$

$$+ I_{1\text{Магдагачи2}}^2$$

Напряжение третьей гармоники на ПС Сковородино, кВ:

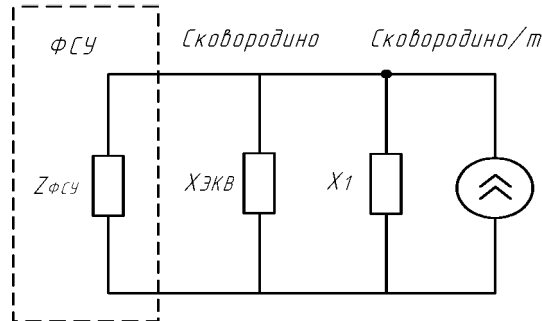
$$U_{3\Sigma} := I_{3\Sigma} \cdot (X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) = 2.231$$

5 гармоника $n := 5$



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства

$$Z_{\Phi\text{СУ}} := \frac{X_{\text{АС}} \cdot X_{\text{ВС}}}{X_{\text{АС}} + X_{\text{ВС}}}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 412.4$$

$$X_1 := 312.5$$

$$X_{\text{ЭКВ}\Phi\text{СУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\Phi\text{СУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\Phi\text{СУ}}} = -11.158$$

Нагрузка на ПС Skovorodino/т $S_{\text{SkovorodinoT}} := \sqrt{11^2 + 11.9^2} = 16.205 \text{ МВА}$

$$U_{\text{НОМ}} := 220 \text{ кВ}$$

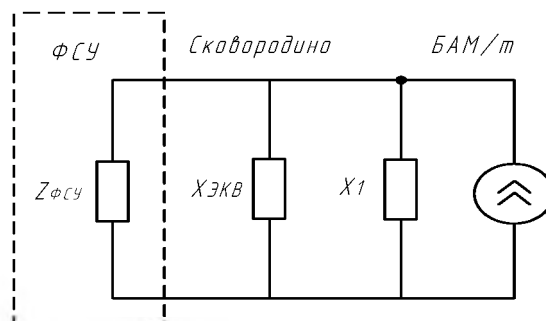
$$I := \frac{S_{\text{SkovorodinoT}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 8.506 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВ}\Phi\text{СУ}}}{X_{\text{ЭКВ}\Phi\text{СУ}} + X_1} = -0.037$$

$$I_{\text{SkovorodinoT}} := K_1 \cdot I = -3.149 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{SkovorodinoT}} := I_{\text{SkovorodinoT}} \cdot X_1 = -0.098 \text{ кВ}$$

Участок сети Skovorodino - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



$$X_{\text{ЭКВ}} := 411.522$$

$$X_1 := 312.5$$

$$X_{\text{ЭКВ}\Phi\text{СУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\Phi\text{СУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\Phi\text{СУ}}} = -11.159$$

Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМТ}} := \sqrt{(16.6)^2 + 24^2} = 29.182 \text{ МВА}$

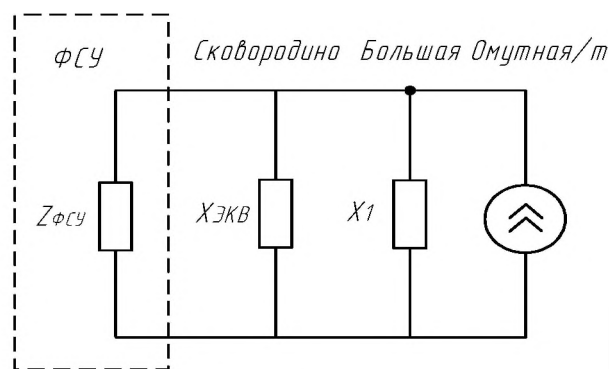
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства

$$I'_{\omega} := \frac{S_{\text{БАМТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.015 \text{ кА}$$

$$K_{I1} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.037$$

$$I_{\text{БАМТ}} := K_{I1} \cdot I = -3.149 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{БАМТ}} := I_{\text{БАМТ}} \cdot X_1 = -0.098 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}}'' := 408.458$$

$$X_1'' := 312.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}'' \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}}'' + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.161$$

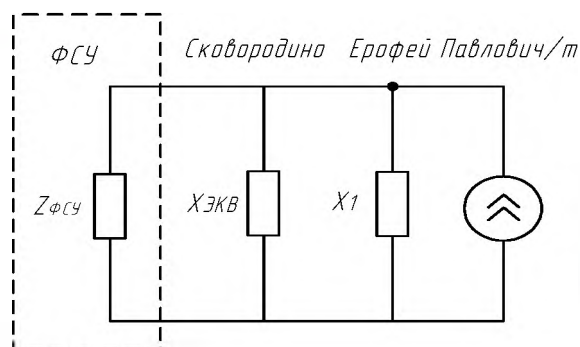
Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{\text{БОмутнаяТ}} := \sqrt{11.8^2 + (14.4)^2} = 18 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{\text{БОмутнаяТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 9.771 \times \text{кА}^{-3}$$

$$K_{I1} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1''} = -0.037$$

$$I_{\text{БольшаяОмутная}} := K_{I1} \cdot I = -3.619 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{БольшаяОмутная}} := I_{\text{БольшаяОмутная}} \cdot X_1'' = -0.113 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 43.412$$

$$X_1 := 312.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -14.491$$

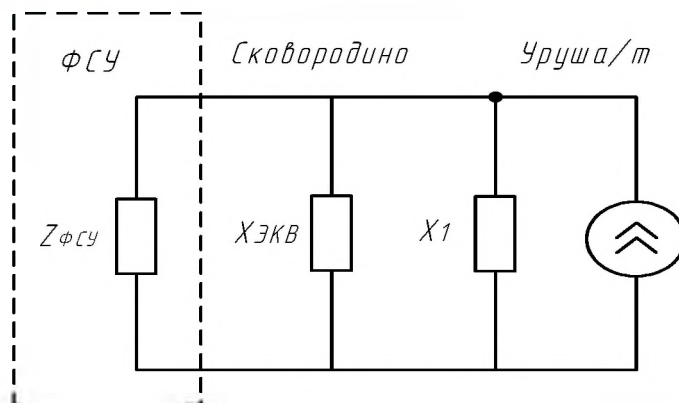
$$S_{\text{ЕрофейПавловичТ}} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.07 \text{ кА} \cdot 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.049$$

$$I_{\text{ЕрофейПавлович}} := K_1 \cdot I = -1.006 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{ЕрофейПавлович}} := I_{\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_1 = -0.031 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}'} := 409.644$$

$$X_1' := 312.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}'} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.16$$

Нагрузка на ПС Уруша/т $S_{\text{УрушаТ}} := \sqrt{(22.5)^2 + (24.6)^2} = 33.338 \text{ МВА}$

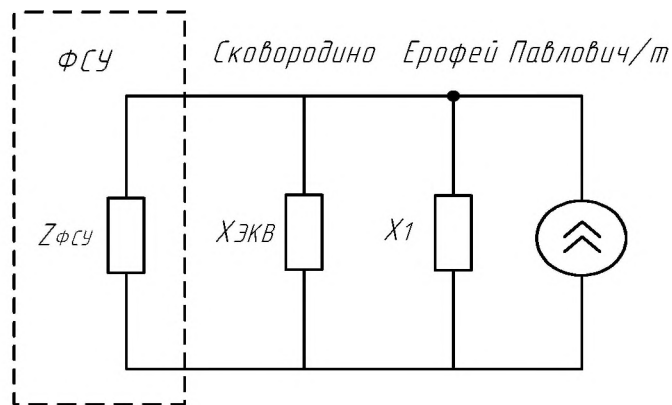
$$I := \frac{\frac{S_{\text{УрушаТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 8.749 \times \text{кА}^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1'} = -0.037$$

$$I_{\text{УрушаТ}} := K_1 \cdot I = -3.24 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{УрушаТ}} := I_{\text{УрушаТ}} \cdot X_1' = -0.101 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВ}''' := 409.971$$

$$X1''' := 312.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ}' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}' + Z_{ФСУ}} = -11.16$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т

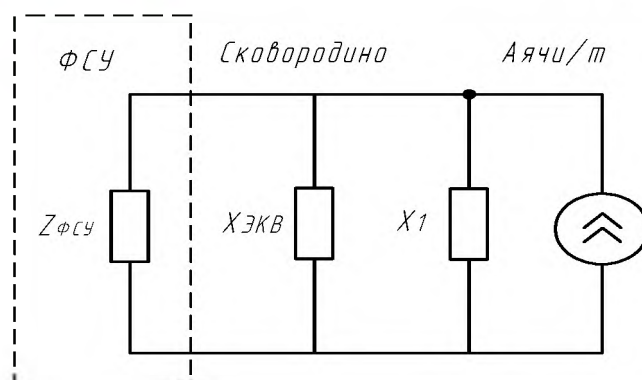
$$S_{ЕрофейПавловичТ} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{ЕрофейПавловичТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 2.07 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X_{ЭКВФСУ}} = 0.5$$

$$I_{ЕрофейПавлович2} := K_1 \cdot I = 1.035 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{ЕрофейПавлович2} := I_{ЕрофейПавлович2} \cdot X1''' = 0.323 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВ}'' := 144.234$$

$$X1 := 312.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ}' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}' + Z_{ФСУ}} = -11.16$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

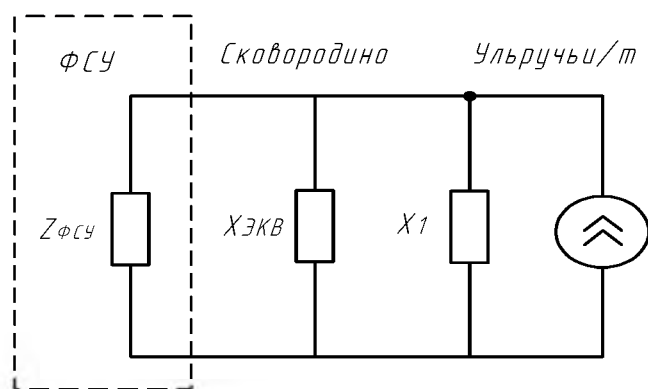
Нагрузка на ПС Аячи/т $S_{\text{АячиТ}} := \sqrt{(9.9)^2 + (12)^2} = 15.557 \text{ МВА}$

$$I := \frac{S_{\text{АячиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 8.165 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.037$$

$$I_{1\text{АячиТ}} := K_1 \cdot I = -3.024 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Аячи}} := I_{1\text{АячиТ}} \cdot X_1 = -0.094 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 411.523$$

$$X_1 := 312.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.159$$

Нагрузка на ПС Ульручьи/т $S_{\text{УльручьиТ}} := \sqrt{(11.1)^2 + (8.6)^2} = 14. \text{ МВА}$

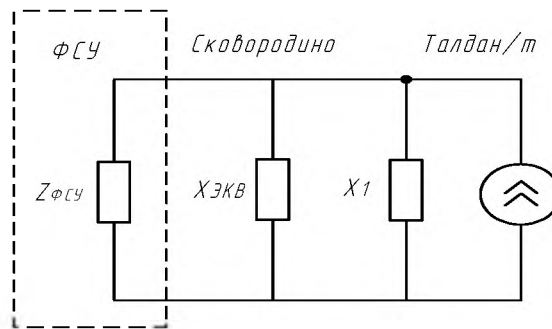
$$I := \frac{S_{\text{УльручьиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 7.37 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.037$$

$$I_{1\text{УльручьиТ}} := K_1 \cdot I = -2.729 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{УльручьиТ}} := I_{1\text{УльручьиТ}} \cdot X_1 = -0.085 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВ} := 494.023$$

$$X_1 := 495$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.108$$

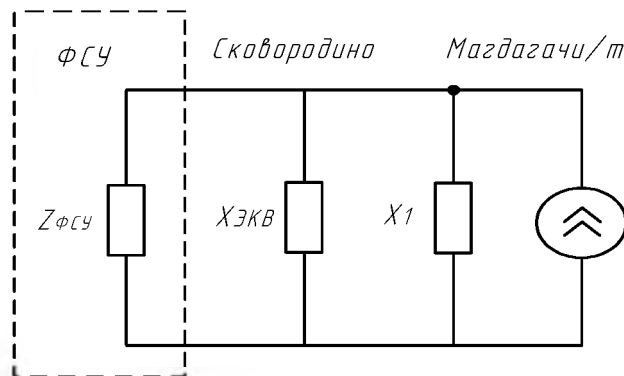
Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{ТалданТ} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{ТалданТ}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 2.494 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X_1} = -0.023$$

$$I_{Талдан} := K_1 \cdot I = -5.724 \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$U_{Талдан} := I_{Талдан} \cdot X_1 = -0.028 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВ} := 242.748$$

$$X_1 := 187.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.373$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

Нагрузка на ПС Магдагачи

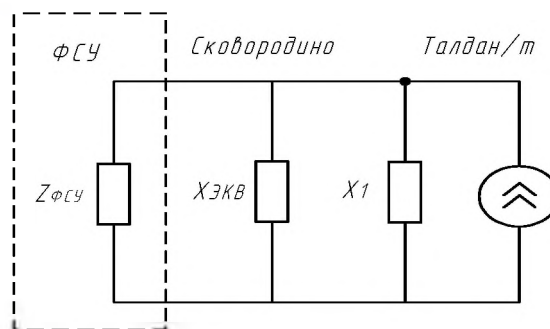
$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \quad \text{МВА}$$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.434 \times 10^{-4} \quad \text{кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X1} = -0.065$$

$$I_{\text{Магдагачи}} := K_1 \cdot I = -2.217 \times 10^{-4} \quad \text{кА}$$

$$U_{\text{Магдагачи}} := I_{\text{Магдагачи}} \cdot X1 = -0.042 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 492.369$$

$$X1 := 375$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.109$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{ТалданТ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \quad \text{МВА}$

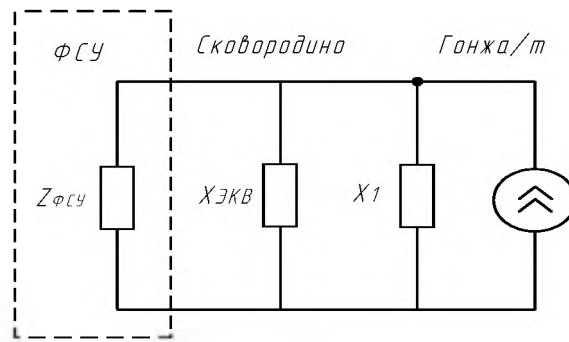
$$I := \frac{\frac{S_{\text{ТалданТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.494 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X1} = -0.031$$

$$I_{\text{Талдан2}} := K_1 \cdot I = -7.613 \times 10^{-5} \quad \text{кА}$$

$$U_{\text{Талдан2}} := I_{\text{Талдан2}} \cdot X1 = -0.029 \quad \text{кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВ} := 408.145$$

$$X1 := 312.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.161$$

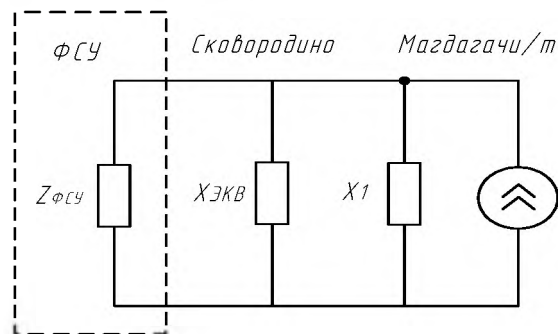
Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{ГонжаТ} := \sqrt{(4.9)^2 + (8.2)^2} = 9.5 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{ГонжаТ}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 2.507 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X1} = -0.037$$

$$I_{Гонжа} := K_1 \cdot I = -9.285 \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$U_{Гонжа} := I_{Гонжа} \cdot X1 = -0.029 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВ} := 246.141$$

$$X1 := 187.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.366$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{МагдагачиТ} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиГ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 3.434 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.065$$

$$I_{1\text{Магдагачи2}} := K_1 \cdot I = -2.216 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{1\text{Магдагачи2}} := I_{1\text{Магдагачи2}} \cdot X_1 = -0.042 \text{ кВ}$$

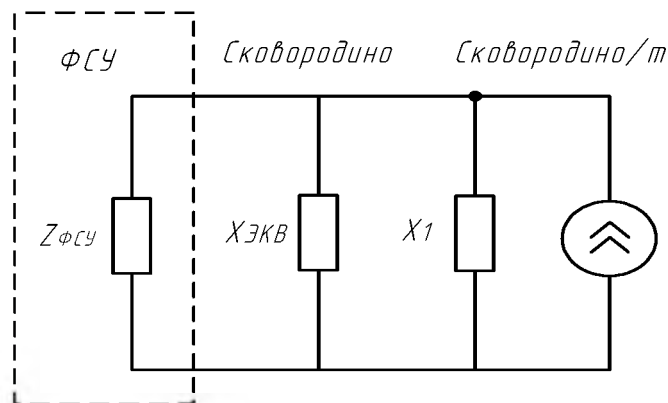
Суммарный ток пятой гармоники на ПС Сковородино, кА:

$$I_{5\Sigma} := \sqrt{I_{1\text{СковородиноГ}}^2 + (I_{1\text{БАМ}})^2 + (I_{1\text{БольшаяОмутная}})^2 \dots + I_{1\text{ЕрофейПавлович}}^2 \dots + I_{1\text{УрушаГ}}^2 + I_{1\text{ЕрофейПавлович2}}^2 + I_{1\text{АячиГ}}^2 \dots + I_{1\text{УльручьиГ}}^2 \dots + I_{1\text{Талдан}}^2 + I_{1\text{Магдагачи}}^2 + I_{1\text{Талдан2}}^2 + I_{1\text{Гонжа}}^2 \dots + I_{1\text{Магдагачи2}}^2} = 1.341 \times 10^{-3}$$

Напряжение пятой гармоники на ПС Сковородино, кВ:

$$U_{5\Sigma} := I_{5\Sigma} \cdot (X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) = 0.603$$

$$n := 7$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 577.428 \quad X_1 := 437.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.073$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

Нагрузка на ПС Сковородино/т $S_{\text{СковородиноТ}} := \sqrt{11^2 + 11.9^2} = 16.205 \text{ МВА}$

$U_{\text{НОМ}} := 220 \text{ кВ}$

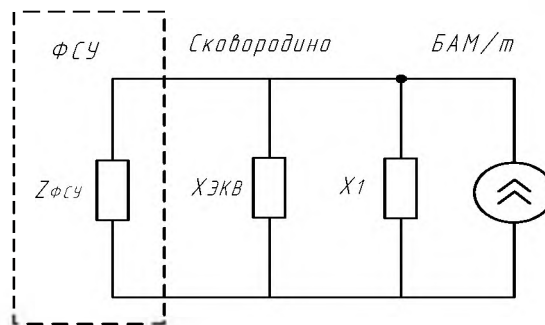
$I := \frac{S_{\text{СковородиноТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 6.075 \text{ кА} \cdot 10^{-3}$

$K_{\text{Л}} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.026$

$I_{\text{СковородиноТ}} := K_1 \cdot I = -1.578 \times 10^{-4} \text{ кА}$

$U_{\text{СковородиноТ}} := I_{\text{СковородиноТ}} \cdot X_1 = -0.069 \text{ кВ}$

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



$X_{\text{ЭКВ}} := 574.613$

$X_{\text{Л}} := 437.5$

$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.074$

Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМТ}} := \sqrt{(16.6)^2 + 24^2} = 29.1 \text{ МВА}$

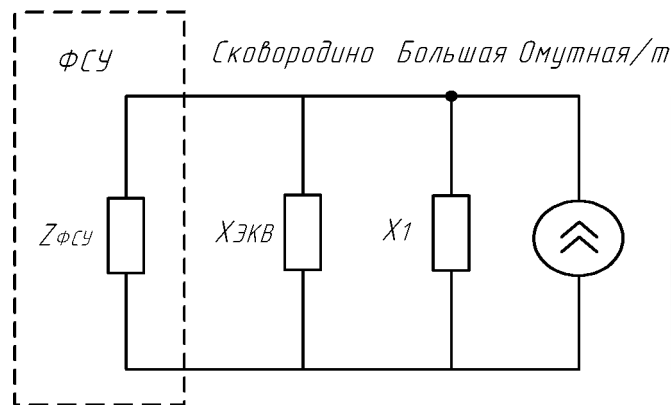
$I' := \frac{S_{\text{БАМТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 0.011 \text{ кА}$

$K_{\text{Л}} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.026$

$I_{\text{БАМ}} := K_1 \cdot I = -1.578 \times 10^{-4} \text{ кА}$

$U_{\text{БАМ}} := I_{\text{БАМ}} \cdot X_1 = -0.069 \text{ кВ}$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВ}'' := 574.613$$

$$X_1'' := 437.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ}'' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}'' + Z_{ФСУ}} = -11.074$$

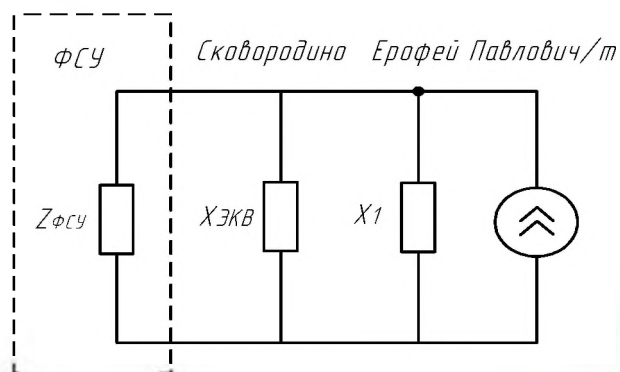
Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{БОмутнаяТ} := \sqrt{11.8^2 + (14.4)^2} = 18.617 \text{ МВ}$

$$I := \frac{S_{БОмутнаяТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta} = 6.98 \times \text{кА}^3$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X_1''} = -0.026$$

$$I_{БольшаяОмутная} := K_1 \cdot I = -1.812 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{БольшаяОмутная} := I_{БольшаяОмутная} \cdot X_1'' = -0.079 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВ} := 68.747$$

$$X_1 := 437.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -12.903$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{ЕрофейПавловичТ} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$

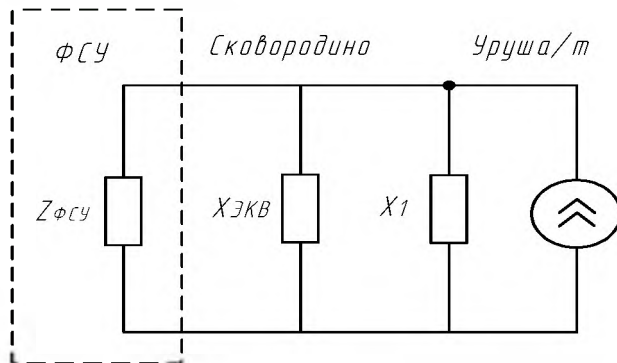
$$I := \frac{S_{ЕрофейПавловичТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot \eta} = 1.478 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$K_{1\text{ЕрофейПавлович}} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.03$$

$$I_{\text{ЕрофейПавлович}} := K_1 \cdot I = -4.493 \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$U_{\text{ЕрофейПавлович}} := I_{\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_1 = -0.02 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}}' := 575.46$$

$$X_1' := 437.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}' \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}}' + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.073$$

Нагрузка на ПС Уруша/т

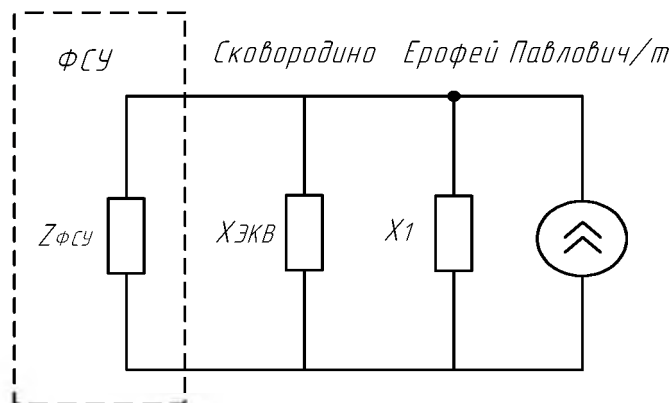
$$S_{\text{УрушаТ}} := \sqrt{(22.5)^2 + (24.6)^2} = 33.33 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{\text{УрушаТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 6.249 \times \text{кА}^{-3}$$

$$K_{1\text{УрушаТ}} := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.026$$

$$I_{\text{УрушаТ}} := K_1 \cdot I = -1.623 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{УрушаТ}} := I_{\text{УрушаТ}} \cdot X_1' = -0.071 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}}''' := 575.693$$

$$X_1''' := 437.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}'} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.073$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т

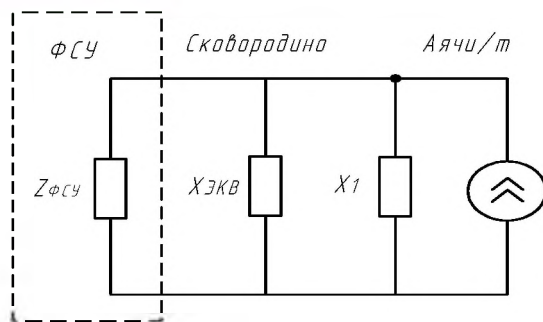
$$S_{\text{ЕрофейПавловичТ}} := \sqrt{5^2 + (6.1)^2} = 7.887 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{\text{ЕрофейПавловичТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 1.478 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_{\text{ЭКВ}'} } = 0.5$$

$$I_{\text{ЕрофейПавлович2}} := K_1 \cdot I = 7.392 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{ЕрофейПавлович2}} := I_{\text{ЕрофейПавлович2}} \cdot X1''' = 0.323 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}''} := 203.557$$

$$X1 := 437.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}'} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.073$$

Нагрузка на ПС Аячи/т $S_{\text{АячиТ}} := \sqrt{(9.9)^2 + (12)^2} = 15.557 \text{ МВА}$

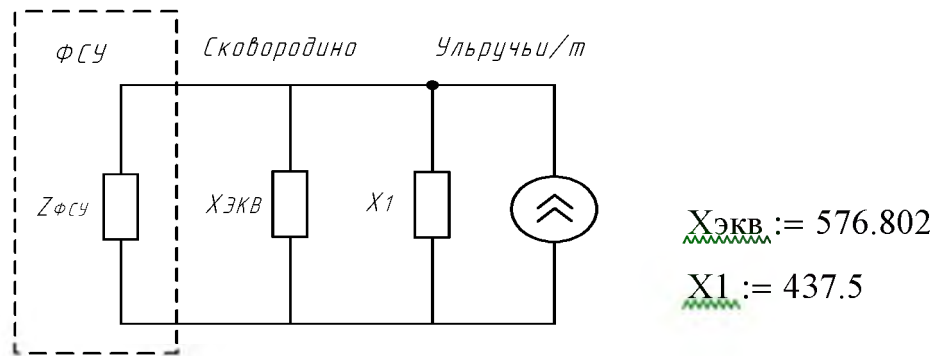
$$I := \frac{S_{\text{АячиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 5.832 \times \text{кА}^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X1} = -0.026$$

$$I_{\text{АячиТ}} := K_1 \cdot I = -1.514 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$U_{\text{Аячи}} := I_{\text{АячиТ}} \cdot X1 = -0.066 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.073$$

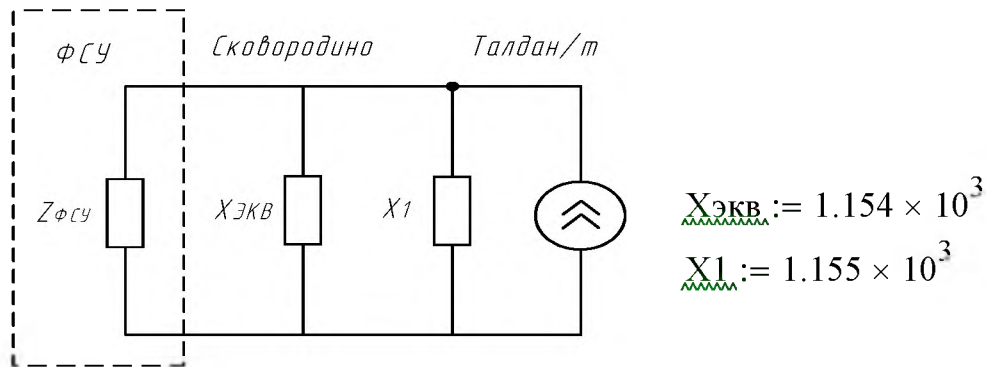
Нагрузка на ПС Ульручы/т $S_{УльручыТ} := \sqrt{(11.1)^2 + (8.6)^2} = 14. \text{MVA}$

$$I := \frac{S_{УльручыТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 5.264 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X1} = -0.026$$

$$I_{УльручыТ} := K_1 \cdot I = -1.367 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{УльручыТ} := I_{УльручыТ} \cdot X1 = -0.06 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -10.967$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{ТалданТ} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.502 \text{ MVA}$

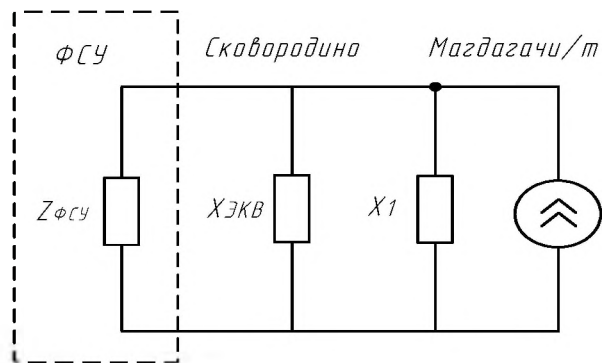
$$I := \frac{S_{ТалданТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 1.781 \times 10^{-3}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -9.587 \times 10^{-3}$$

$$I_{\text{Талдан}} := K_1 \cdot I = -1.707 \times 10^{-5} \quad \text{кА}$$

$$U_{\text{Талдан}} := I_{\text{Талдан}} \cdot X_1 = -0.02 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 574.105$$

$$X_1 := 437.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.074$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

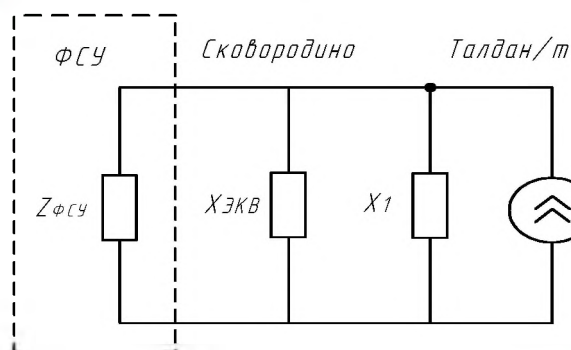
$$S_{\text{МагдагачиТ}} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \quad \text{МВА}$$

$$I := \frac{S_{\text{МагдагачиТ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 2.453 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.026$$

$$I_{\text{Магдагачи}} := K_1 \cdot I = -6.37 \times 10^{-5} \quad \text{кА}$$

$$U_{\text{Магдагачи}} := I_{\text{Магдагачи}} \cdot X_1 = -0.028 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 1.153 \times 10^3$$

$$X_1 := 875$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -10.968$$

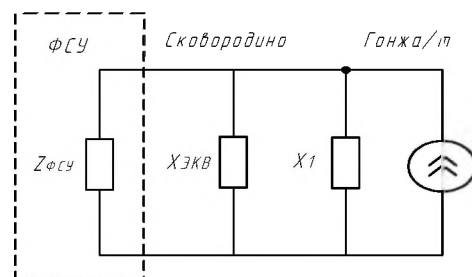
Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{ТалданТ}} := \sqrt{(4.8)^2 + (8.2)^2} = 9.5 \text{ МВА}$

$$I := \frac{\frac{S_{\text{ТалданТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 1.781 \times 10^{-3}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.013$$

$$I_{\text{Талдан2}} := K_1 \cdot I = -2.261 \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$U_{\text{Талдан2}} := I_{\text{Талдан2}} \cdot X_1 = -0.02 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 574.389$$

$$X_1 := 437.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.074$$

Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{\text{ГонжаТ}} := \sqrt{(4.9)^2 + (8.2)^2} = 9.5 \text{ МВА}$

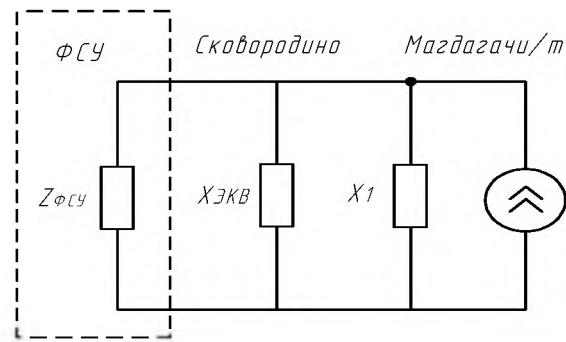
$$I := \frac{\frac{S_{\text{ГонжаТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot n} = 1.791 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{\text{ЭКВФСУ}}}{X_{\text{ЭКВФСУ}} + X_1} = -0.026$$

$$I_{\text{Гонжа}} := K_1 \cdot I = -4.65 \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$U_{\text{Гонжа}} := I_{\text{Гонжа}} \cdot X_1 = -0.02 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВ} := 576.529$$

$$X1 := 437.5$$

$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.073$$

Нагрузка на ПС Магдагачи

$$S_{МагдагачиТ} := \sqrt{(3.67 + 3.63)^2 + (5.38 + 5.48)^2} = 13.085 \text{ МВА}$$

$$I := \frac{S_{МагдагачиТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ} \cdot n} = 2.453 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$K_1 := \frac{X_{ЭКВФСУ}}{X_{ЭКВФСУ} + X1} = -0.026$$

$$I_{Магдагачи2} := K_1 \cdot I = -6.369 \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$U_{Магдагачи2} := I_{Магдагачи2} \cdot X1 = -0.028 \text{ кВ}$$

Суммарный ток седьмой гармоники на ПС Сковородино, кА:

$$I_{7\Sigma} := \sqrt{I_{1СковородиноТ}^2 + (I_{1БАМ}^2) + (I_{1БольшаяОмутная})^2 \dots = 8.427 \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$+ (I_{1ЕрофейПавлович})^2 \dots$$

$$+ I_{1УрушаТ}^2 + I_{1ЕрофейПавлович2}^2 + I_{1АячиТ}^2 \dots$$

$$+ I_{1УльручьиТ}^2 \dots$$

$$+ I_{1Талдан}^2 + I_{1Магдагачи}^2 + I_{1Талдан2}^2 + I_{1Гонжа}^2 \dots$$

$$+ I_{1Магдагачи2}^2$$

Напряжение третьей гармоники на ПС Сковородино, кВ:

$$U_{7\Sigma} := I_{7\Sigma} \cdot (X_{ВСковород} + X_{НСковород}) = 0.379 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства

Коэффициент искажения несинусоидальности кривой напряжения:

$$K_U := \frac{\sqrt{U_{3\Sigma}^2 + U_{5\Sigma}^2 + U_{7\Sigma}^2}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 1.064 \quad \%$$

Коэффициент n-ой гармонической составляющей:

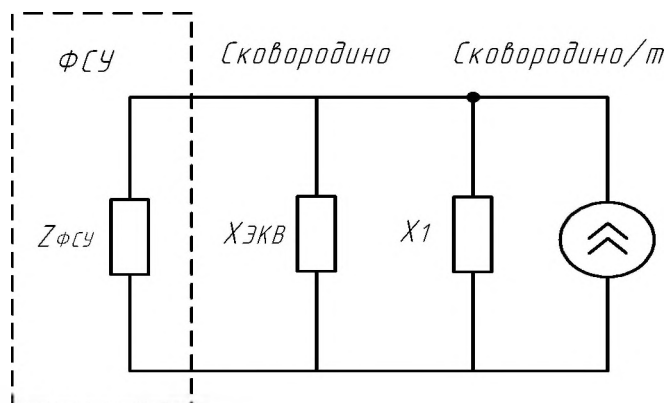
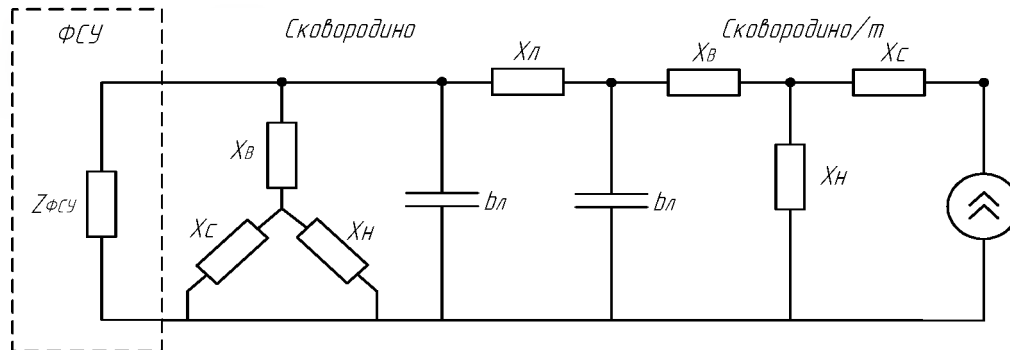
$$K_{U3} := \frac{U_{3\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 1.014$$

$$K_{U5} := \frac{U_{5\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 0.274$$

$$K_{U7} := \frac{U_{7\Sigma}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100 = 0.172$$

Расчет коэффициента несимметрии по обратной последовательности после установки ФСУ

$$Z_{\text{ФСУ}} := \frac{X_{AC} \cdot X_{BC}}{X_{AC} + X_{BC}}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 81.999$$

$$X_1 := 62.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.523$$

$$i := \sqrt{-1}$$

$$a := e^{i \cdot 120 \text{deg}} = -0.5 + 0.866i$$

Нагрузка на ПС Сковородино/т $S_{\text{СковородиноТ}} := 11 + 11.9 \text{ МВА}$

$$U_{\text{НОМ}} := 220 \text{ кВ}$$

$$I_{\text{I}} := \frac{\frac{S_{\text{СковородиноТ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.014 + 0.016i \text{ кА}$$

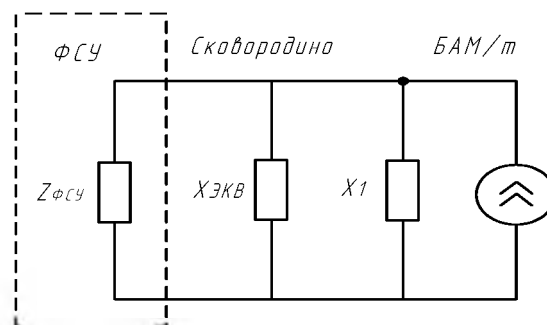
$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 0.014 + 0.016i$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 6.913 \times 10^{-3} - 1.564i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{СковородиноТ}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 7.088 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{Сковородино}} := I_{2\text{СковородиноТ}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.581 \text{ кВ}$$

Участок сети Сковородино - БАМ/т - Б.Омутная/т - Ерофей Павлович/т



$$X_{\text{ЭКВ}'} := 77.612$$

$$X_{1'} := 62.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}'} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}'} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.633$$

Нагрузка на ПС БАМ/т $S_{\text{БАМ}} := 16.6 + 24 \cdot \text{МВА}$

$$I_{\text{I}'} := \frac{\frac{S_{\text{БАМ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.022 + 0.031i \text{ кА}$$

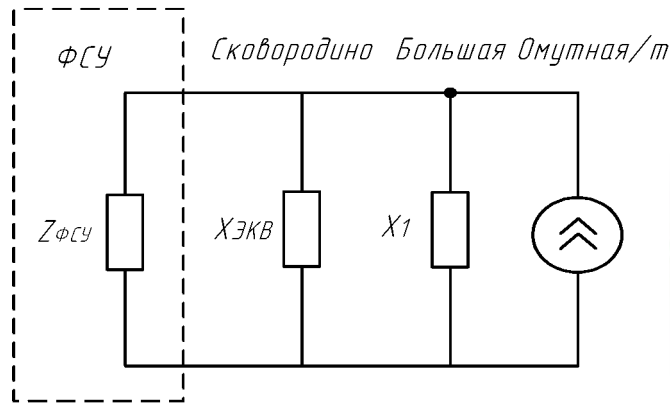
$$I_{\text{II}'} := I_{\text{I}'} = 0.022 + 0.031i$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
 Расчет показателей качества электрической энергии после установки
 фильтросимметрирующего устройства

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 0.013 - 1.039i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{БАМ}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 0.015 \text{ кА}$$

$$U_{2\text{БАМ}} := I_{2\text{БАМ}} \cdot X_{\text{ЭКВ}}' = 0.991 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}}'' := 62.292$$

$$X_1'' := 62.5$$

$$X_{\text{ЭКВ}\phi\text{СУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}}'' \cdot Z_{\phi\text{СУ}}}{X_{\text{ЭКВ}}'' + Z_{\phi\text{СУ}}} = -13.159$$

Нагрузка на ПС Большая Омутная/т $S_{\text{БОмутная}} := 11.8 + 14.4 \cdot \text{МВА}$

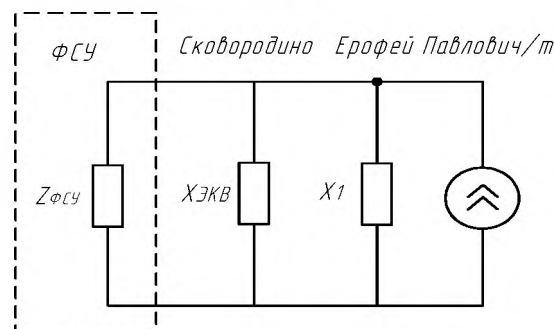
$$I_I := \frac{S_{\text{БОмутная}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.015 + 0.019i \text{ кА}$$

$$I_{II} := I_I = 0.015 + 0.019i \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 8.035 \times 10^{-3} - 1.321i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{БОмутная}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 8.143 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{БОмутная}} := I_{2\text{БОмутная}} \cdot X_{\text{ЭКВ}}'' = 0.507 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := -6.52$$

$$X_1 := 62.5$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$\underline{X_{\text{ЭКВФСУ}}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -4.075$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $S_{\text{ЕрофейПавлович}} := 5 + 6.1 \cdot i = 5 + 6. \text{ МВА}$

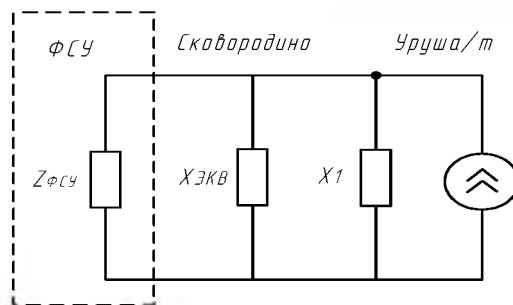
$$\underline{I_{\text{I}}} := \frac{\frac{S_{\text{ЕрофейПавлович}}}{4}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$\underline{I_{\text{II}}} := I_{\text{I}} = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$\underline{I_{\text{2}}} := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 1.702 \times 10^{-3} - 2.8i \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{ЕрофейПавлович}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 1.725 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2\text{ЕрофейПавлович}} := I_{2\text{ЕрофейПавлович}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = -0.011 \text{ кВ}$$



$$\underline{X_{\text{ЭКВ}'}} := 68.22$$

$$\underline{X_{\text{I}'}} := 62.5$$

$$\underline{X_{\text{ЭКВФСУ}}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}'}}{X_{\text{ЭКВ}'} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.922$$

Нагрузка на ПС Уруша/т $S_{\text{Уруша}} := 22.5 + 24.6 \cdot i \text{ МВА}$

$$\underline{I_{\text{I}}} := \frac{\frac{S_{\text{Уруша}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.03 + 0.032i \text{ кА}$$

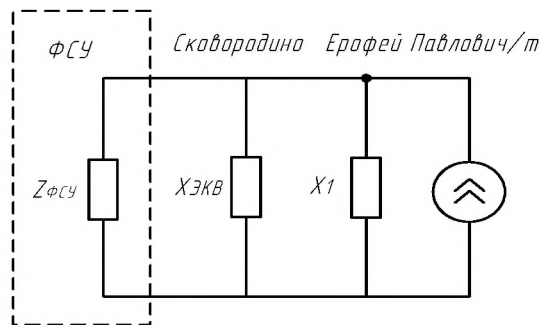
$$\underline{I_{\text{II}}} := I_{\text{I}} = 0.03 + 0.032i \text{ кА}$$

$$\underline{I_{\text{2}}} := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 0.014 - 3.143i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{2\text{Уруша}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 0.015 \text{ кА}$$

$$U_{2\text{Уруша}} := I_{2\text{Уруша}} \cdot X_{\text{ЭКВ}'} = 0.995 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства



$$\underline{X_{ЭКВ}'''} := 69.853$$

$$\underline{X1}''' := 62.5$$

$$\underline{X_{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{ЭКВ}' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}' + Z_{ФСУ}} = -12.922$$

Нагрузка на ПС Ерофей Павлович/т $\underline{S_{ЕрофейПавлович}} := 5 + 6.1 \cdot i = 5 + 6. \text{ МВА}$

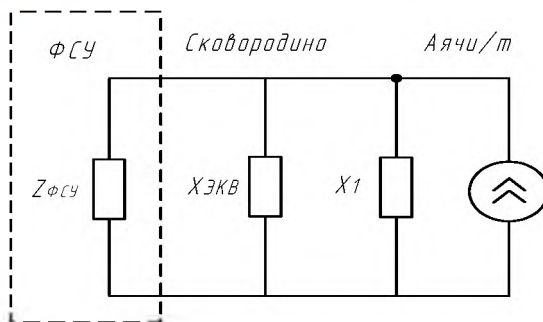
$$\underline{I_{I}} := \frac{\underline{S_{ЕрофейПавлович}}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$\underline{I_{II}} := I_I = 3.28 \times 10^{-3} + 4.002i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$\underline{I_2} := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 1.702 \times 10^{-3} - 2.8i \times 10^{-4} \quad \text{кА}$$

$$\underline{I_{2ЕрофейПавлович2}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 1.725 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$\underline{U_{2Уруша}} := I_{2ЕрофейПавлович2} \cdot X_{ЭКВ}''' = 0.12 \quad \text{кВ}$$



$$\underline{X_{ЭКВ}''} := 8.857$$

$$\underline{X1} := 62.5$$

$$\underline{X_{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{ЭКВ}' \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ}' + Z_{ФСУ}} = -12.922$$

Нагрузка на ПС Аячи/т $\underline{S_{Аячи}} := 9.9 + 12 \cdot i \quad \text{МВА}$

$$\underline{I_{I}} := \frac{\underline{S_{Аячи}}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 0.013 + 0.016i \quad \text{кА}$$

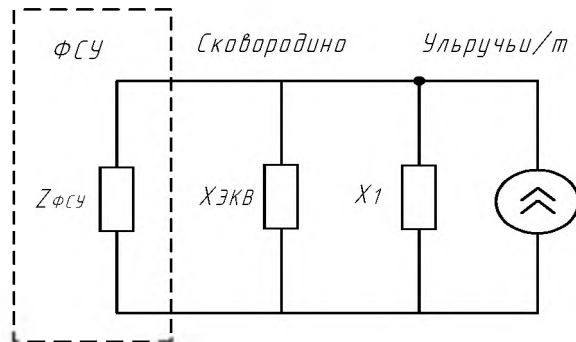
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$I_{II} := I_I = 0.013 + 0.016i \quad \text{кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 6.711 \times 10^{-3} - 1.126i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_{2\text{Аячи}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 6.804 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{2\text{Аячи}} := I_{2\text{Аячи}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.06 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 77.617$$

$$X1 := 62.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.632$$

Нагрузка на ПС Ульручы/т $S_{\text{УльручыГ}} := 11.1 + 8.6 \cdot i \quad \text{МВА}$

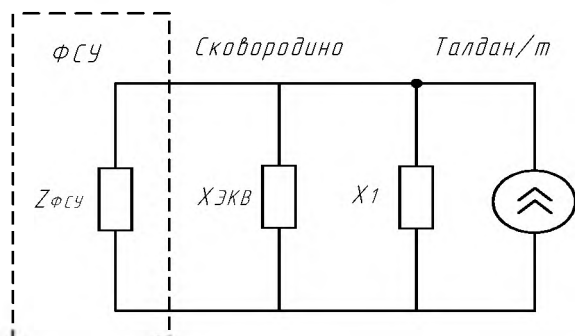
$$I_I := \frac{\frac{S_{\text{УльручыГ}}}{2}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 0.015 + 0.011i \quad \text{кА}$$

$$I_{II} := I_I = 0.015 + 0.011i \quad \text{кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 5.685 \times 10^{-3} - 2.324i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_{2\text{Ульручы}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 6.142 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{2\text{Ульручы}} := I_{2\text{Ульручы}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.477 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 160.117$$

$$X1 := 165$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -11.655$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{\text{Талдан}} := 4.8 + 8.2 \cdot i$ МВА

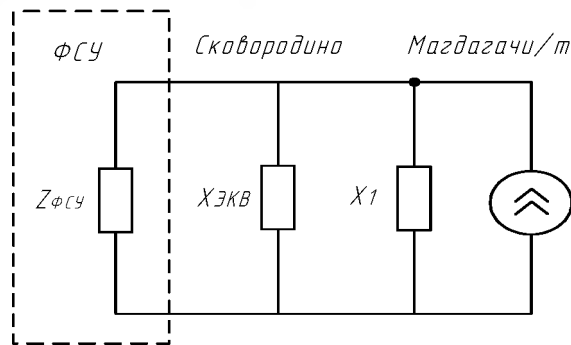
$$I_{\text{I}} := \frac{S_{\text{Талдан}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{\text{2}} := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 2.078 \times 10^{-3} - 1.245i \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$I_{\text{2Талдан}} := \sqrt{(\text{Re}(I_{\text{2}}))^2 + (\text{Im}(I_{\text{2}}))^2} = 2.078 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{2Талдан}} := I_{\text{2Талдан}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.333 \text{ кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 58.738$$

$$X1 := 62.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -13.33$$

Нагрузка на ПС Магдагачи $S_{\text{Магдагачи27.5}} := (3.67 + 3.63) + (5.38 + 5.48) \cdot i$ МВА

$$I_{\text{I}} := \frac{S_{\text{Магдагачи27.5}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

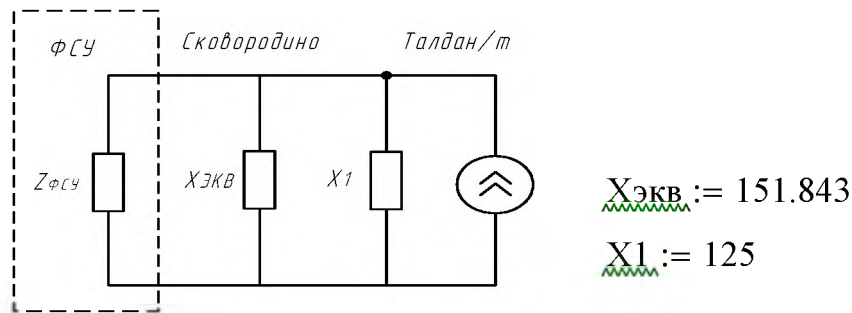
$$I_{\text{II}} := I_{\text{I}} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{\text{2}} := \frac{1}{3} \cdot (I_{\text{I}} + a^2 \cdot I_{\text{II}}) = 2.855 \times 10^{-3} - 1.95i \times 10^{-4} \text{ кА}$$

$$I_{\text{2Магдагачи}} := \sqrt{(\text{Re}(I_{\text{2}}))^2 + (\text{Im}(I_{\text{2}}))^2} = 2.862 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{\text{2Магдагачи}} := I_{\text{2Магдагачи}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.168 \text{ кВ}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства



$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -11.701$$

Нагрузка на ПС Талдан/т $S_{Талдан} := 4.8 + 8.2 \cdot i$ МВА

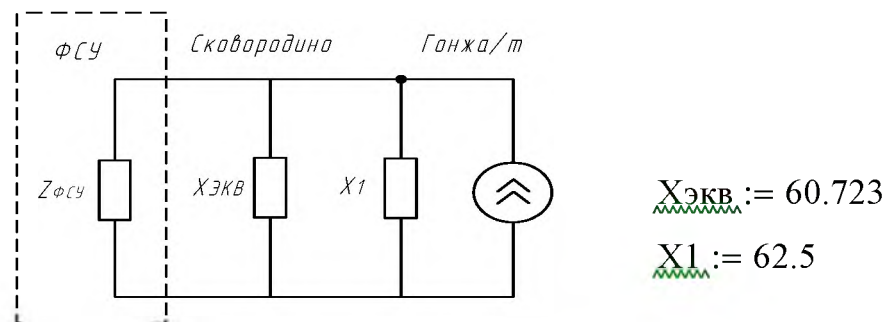
$$I_{II} := \frac{S_{Талдан}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_{II} := I_I = 3.149 \times 10^{-3} + 5.38i \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$I_2 := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 2.078 \times 10^{-3} - 1.245i \times 10^{-5} \text{ кА}$$

$$I_{2Талдан2} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 2.078 \times 10^{-3} \text{ кА}$$

$$U_{2Талдан2} := I_{2Талдан2} \cdot X_{ЭКВ} = 0.316 \text{ кВ}$$



$$X_{ЭКВФСУ} := \frac{X_{ЭКВ} \cdot Z_{ФСУ}}{X_{ЭКВ} + Z_{ФСУ}} = -13.231$$

Нагрузка на ПС Гонжа/т $S_{ГонжаТ} := 4.9 + 8.2 \cdot i$ МВА

$$I_{II} := \frac{S_{ГонжаТ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ}} = 6.43 \times 10^{-3} + 0.011i \text{ кА}$$

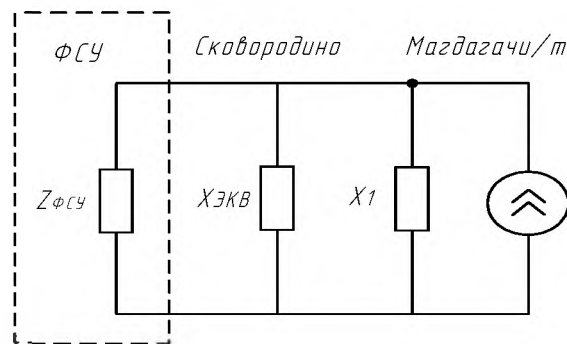
Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$I_{II} := I_I = 6.43 \times 10^{-3} + 0.011i \quad \text{кА}$$

$$I_{2v} := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 4.178 \times 10^{-3} - 6.278i \times 10^{-5} \quad \text{кА}$$

$$I_{2\text{Гонжа}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 4.178 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{2\text{Гонжа}} := I_{2\text{Гонжа}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.254 \quad \text{кВ}$$



$$X_{\text{ЭКВ}} := 75.704$$

$$X_1 := 62.5$$

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \frac{X_{\text{ЭКВ}} \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{X_{\text{ЭКВ}} + Z_{\text{ФСУ}}} = -12.685$$

Нагрузка на ПС Магдагачи $S_{\text{Магдагачи27.5}} := (3.67 + 3.63) + (5.38 + 5.48) \cdot i \quad \text{МВ}$

$$I_{II} := \frac{S_{\text{Магдагачи27.5}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}} = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_{II} := I_I = 4.789 \times 10^{-3} + 7.125i \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$I_{2v} := \frac{1}{3} \cdot (I_I + a^2 \cdot I_{II}) = 2.855 \times 10^{-3} - 1.951i \times 10^{-4} \quad \text{кА}$$

$$I_{2\text{Магдагачи2}} := \sqrt{(\text{Re}(I_2))^2 + (\text{Im}(I_2))^2} = 2.862 \times 10^{-3} \quad \text{кА}$$

$$U_{2\text{Магдагачи2}} := I_{2\text{Магдагачи2}} \cdot X_{\text{ЭКВ}} = 0.217 \quad \text{кВ}$$

Ток обратной последовательности на ПС Сковородино, кА:

$$I_{2\Sigma} := \sqrt{I_{2\text{СковородиноГ}}^2 + (I_{2\text{БАМ}}^2) + (I_{2\text{БОмутная}}^2) + (I_{2\text{ЕрофейПавлович}}^2) \dots = 0.025$$

$$\sqrt{+ I_{2\text{Уруша}}^2 + I_{2\text{ЕрофейПавлович2}}^2 + I_{2\text{Аячи}}^2 + I_{2\text{Ульручы}}^2 \dots}$$

$$\sqrt{+ I_{2\text{Талдан}}^2 + I_{2\text{Магдагачи}}^2 + I_{2\text{Талдан2}}^2 + I_{2\text{Гонжа}}^2 + I_{2\text{Магдагачи2}}^2}$$

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В
Расчет показателей качества электрической энергии после установки
фильтросимметрирующего устройства

$$X_{\text{ЭКВФСУ}} := \left| \frac{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) \cdot Z_{\text{ФСУ}}}{(X_{\text{ВСковород}} + X_{\text{НСковород}}) + Z_{\text{ФСУ}}} \right| = 127.401$$

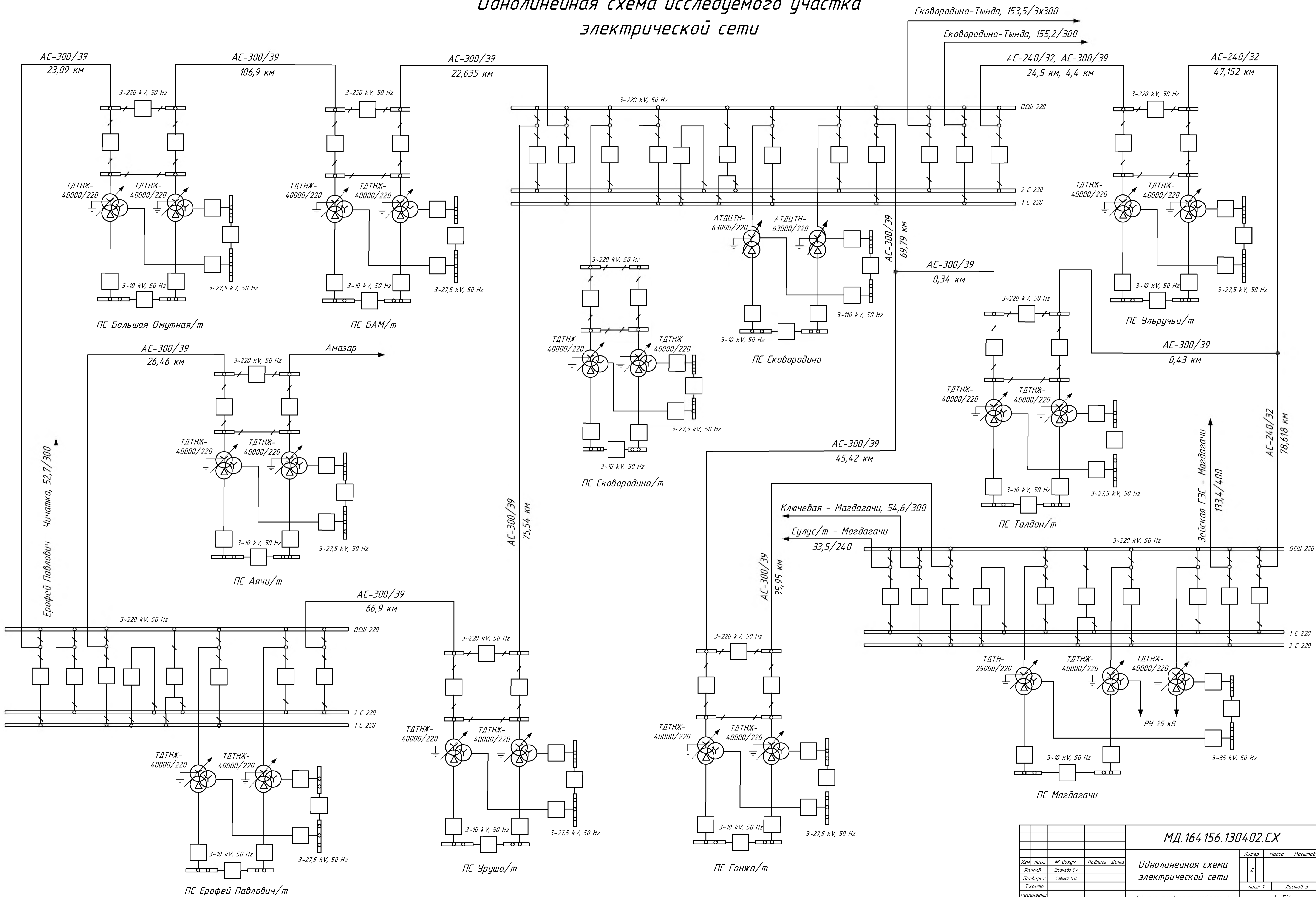
Напряжение обратной последовательности на ПС Сковородино, кВ:

$$U_{2\Sigma} := I_{2\Sigma} \cdot (X_{\text{ЭКВФСУ}}) = 3.184$$

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности :

$$K_{2U} := \frac{U_{2\Sigma}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = 1.447 \quad \%$$

Однолинейная схема исследуемого участка электрической сети

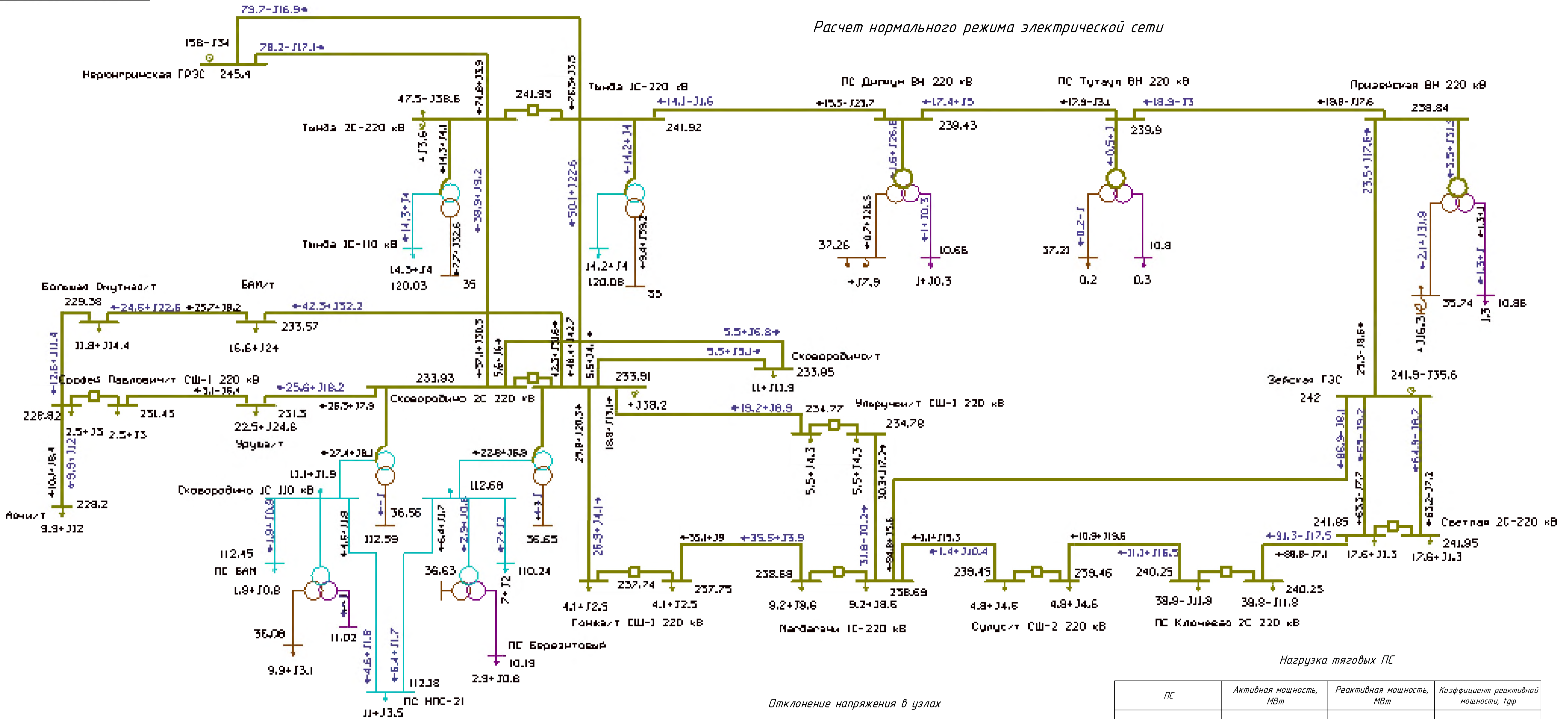


				МД. 164.156.1304.02.СХ		
Изм.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	Литер	Масса
Разраб.			Иванова Е.А.		д	
Проверил			Сабина Н.В.			
Т.контр.					Лист 1	Листов 3
Рецензент					АМГУ	
Н.контр.			Козлов А.И.		Кафедра энергетики	
Утв.			Сабина Н.В.			

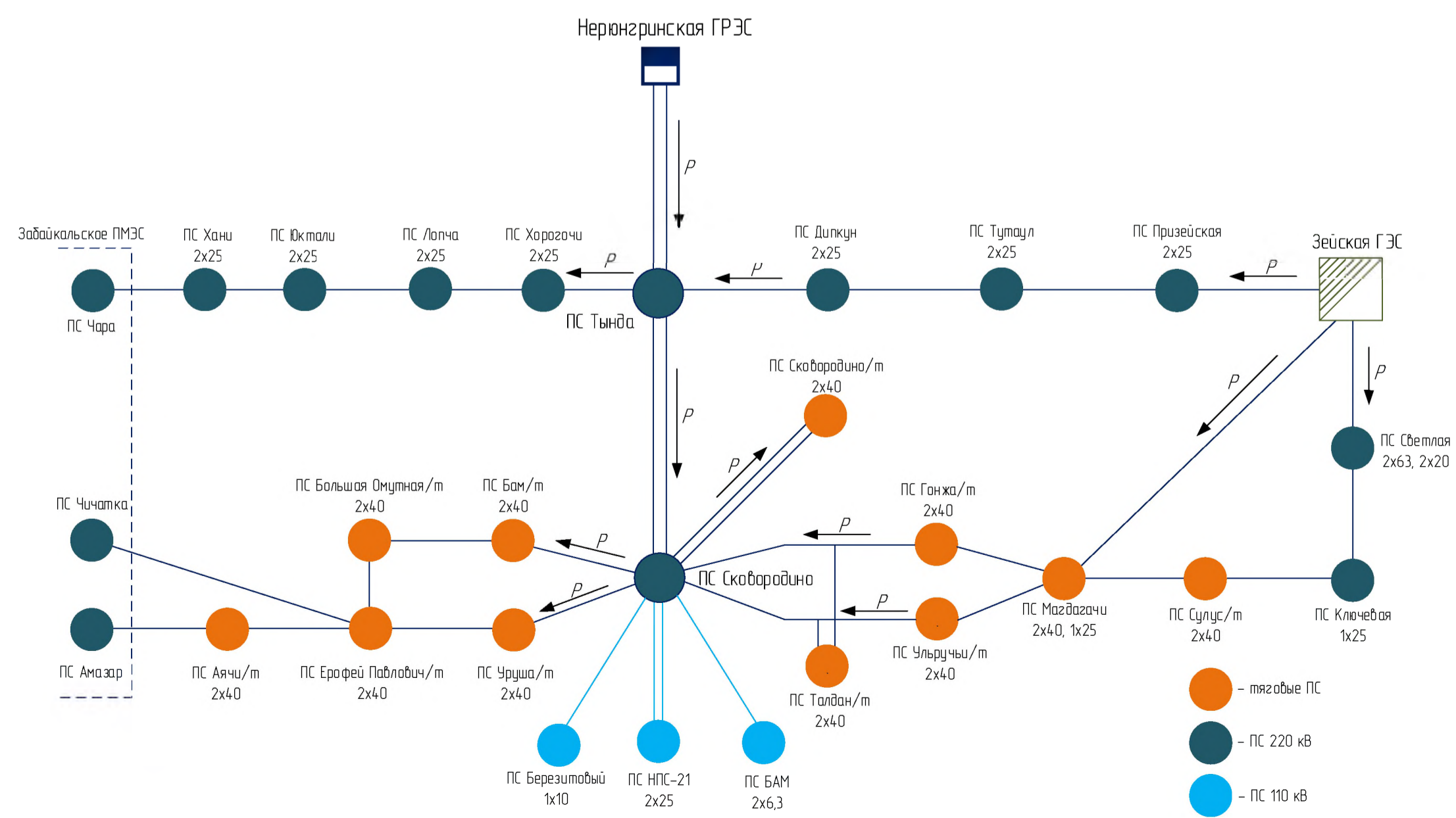
Однолинейная схема
электрической сети

Повышение качества электрической энергии в
электрических сетях с тяжелой нагрузкой в
районе подстанции Сковородино Амурской области

Расчет нормального режима электрической сети



Граф электрической сети



Отклонение напряжения в узлах

ПС	Номинальное напряжение, кВ	Фактическое напряжение, кВ	Отклонение напряжения, %
Сковородино/т	220	233,9	6,3
Сковородино/т	220	233,9	6,3
Ульручи/т	220	234,8	6,7
Гонжа/т	220	237,8	8,1
Сулус/т	220	239,5	8,9
Бам/т	220	233,6	6,2
Большая Омутная/т	220	229,4	4,3
Чруша/т	220	231,3	5,1
Еррофей Павлович/т	220	231,4	5,2
Магдагачи	220	238,7	8,5

Нагрузка тяговых ПС

ПС	Активная мощность, МВт	Реактивная мощность, МВт	Коэффициент реактивной мощности, tgφ
Сковородино/т	11,0	11,9	1,1
Ульручи/т	11,2	8,6	0,8
Гонжа/т	8,2	4,9	0,6
Сулус/т	9,5	9,2	1,0
Бам/т	16,6	24,0	1,4
Большая Омутная/т	11,8	14,4	1,2
Чруша/т	22,5	24,6	1,1
Еррофей Павлович/т	5,0	6,1	1,2
Аячи/т	9,9	12,0	1,2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Литер.	Масса	Масштаб
Разраб.	Швабева Е.А.				д		
Проверил	Сабина Н.В.						
Т.контр.							
Рецензент							
Н.контр.	Козлов А.И.						
Утв.	Сабина Н.В.						

Расчет нормального режима работы электрической сети

Повышение качества электрической энергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой в районе подстанции Сковородино Амурской области

Лист 2 из 3

АМГУ
Кафедра энергетики

Преобразование схемы замещения для расчета показателей качества электрической энергии

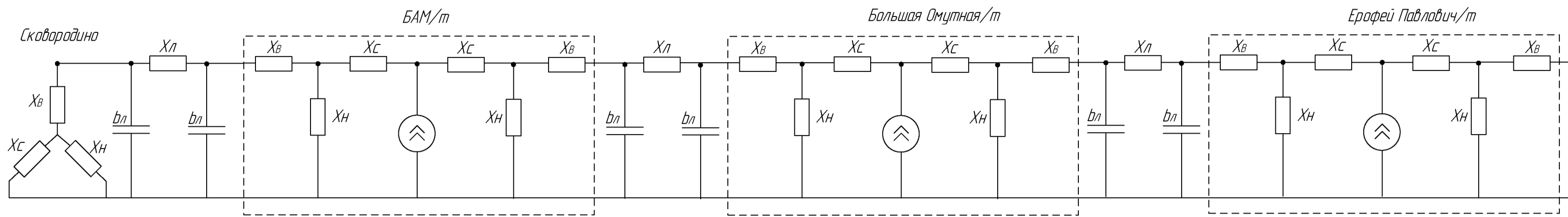
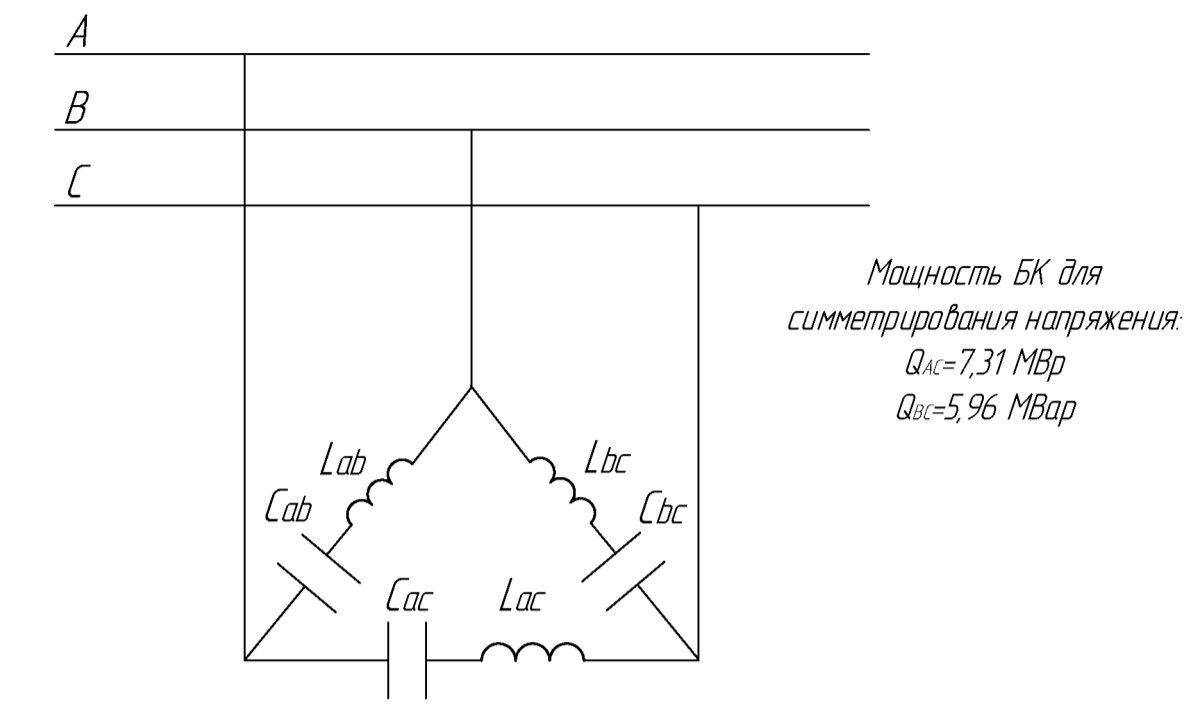
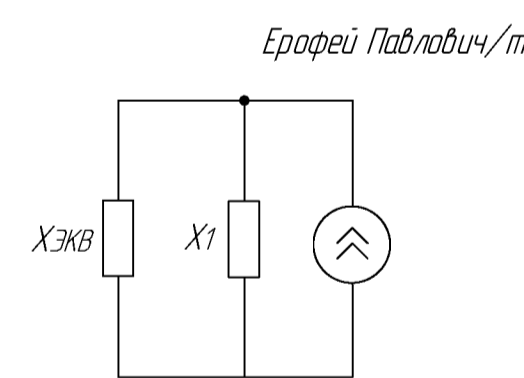
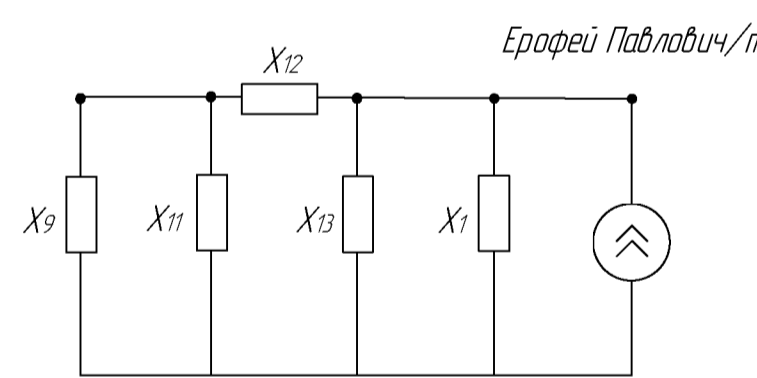
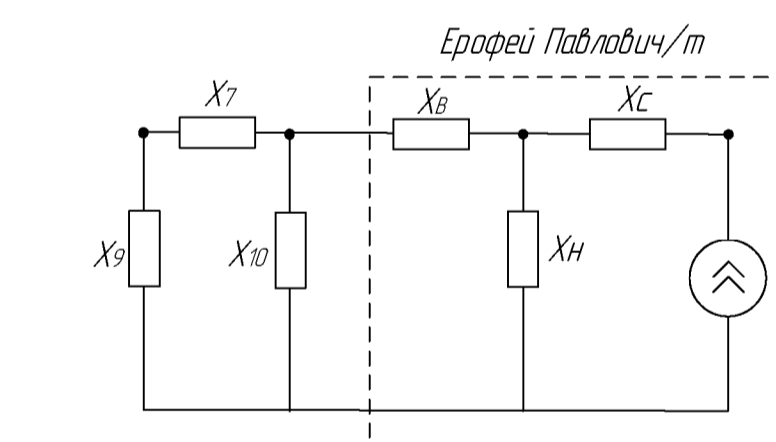
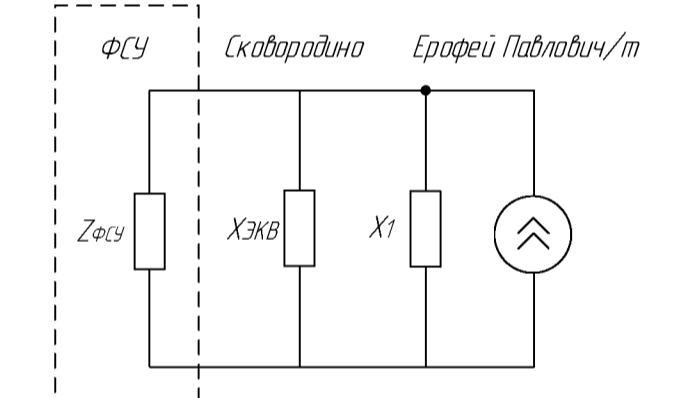
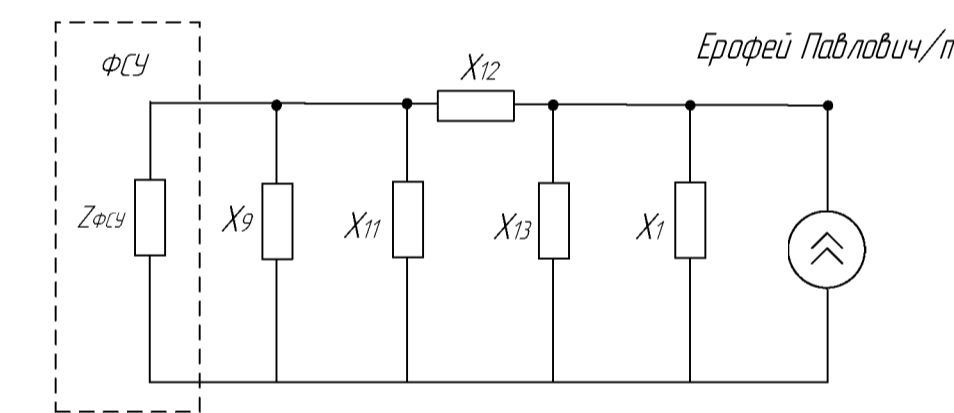
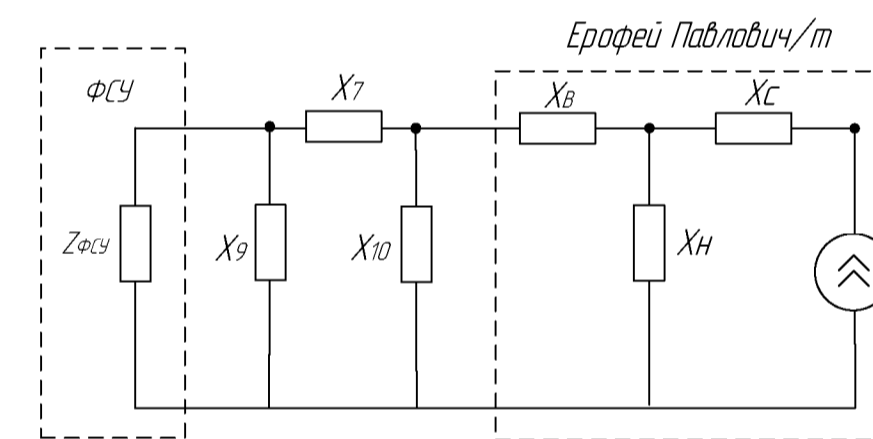
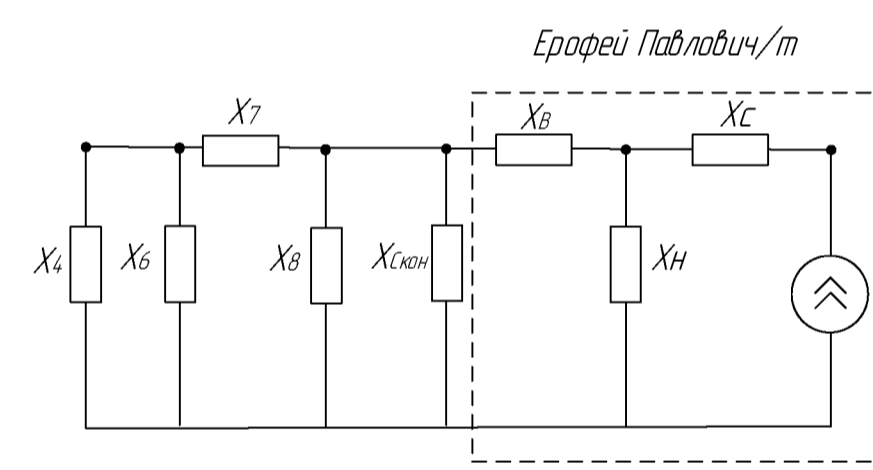
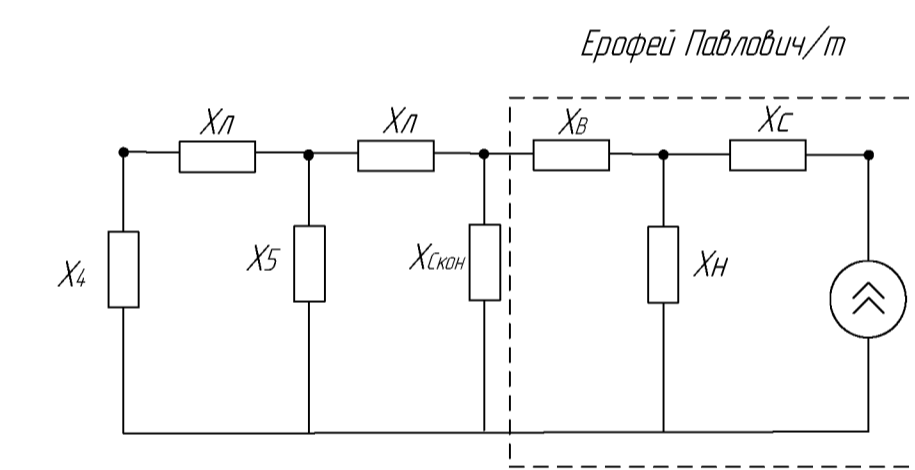
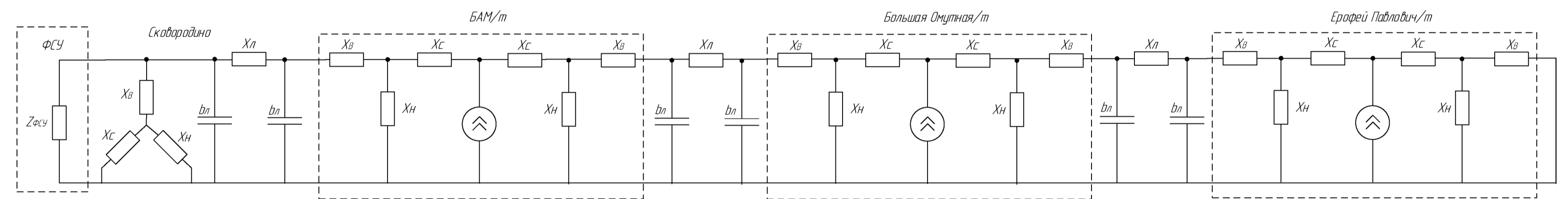
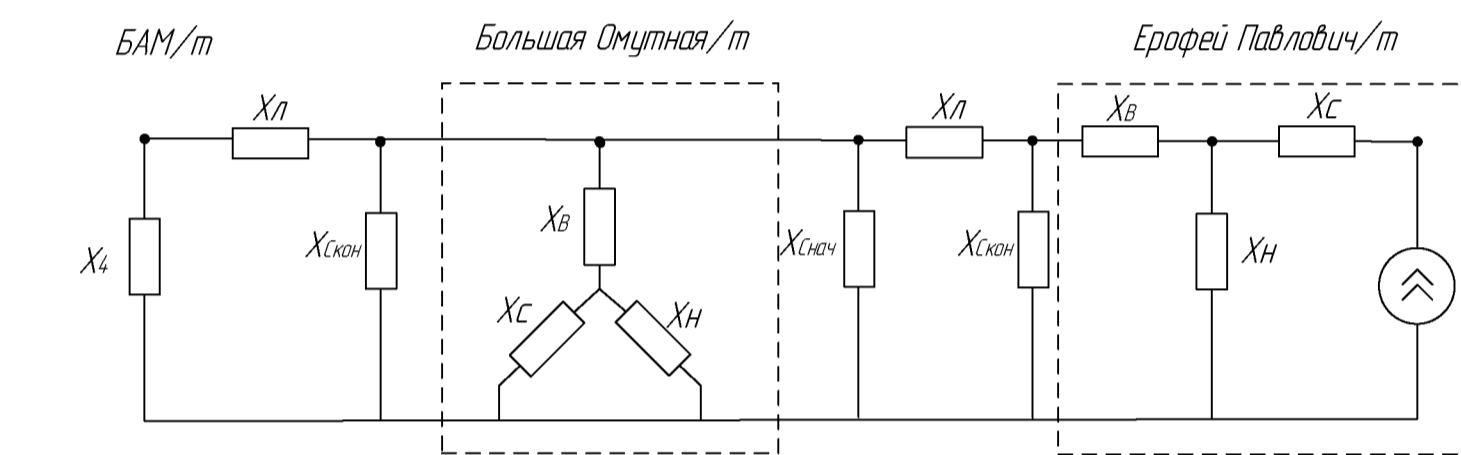
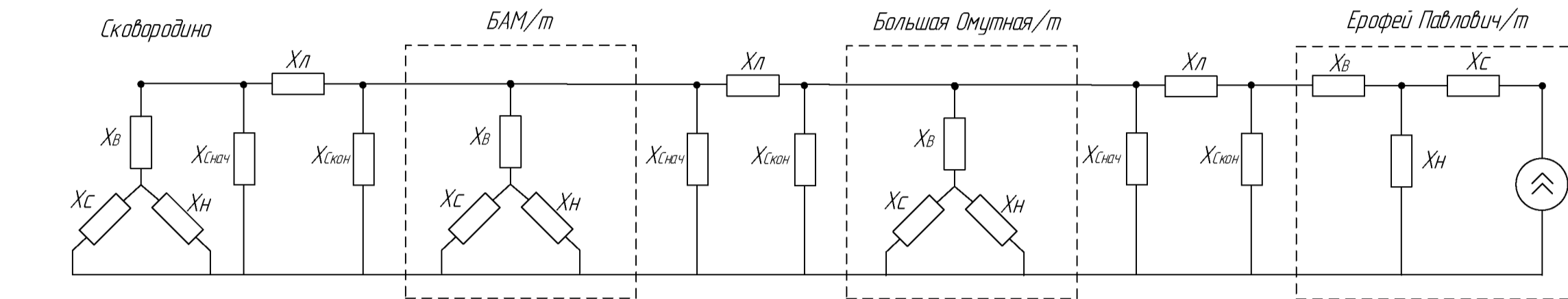


Схема фильтросимметрирующего устройства



Преобразование схемы замещения для расчета показателей качества электрической энергии после установки фильтросимметрирующего устройства



Сравнение расчетных показателей качества электрической энергии со значениями ГОСТ 32144-2013 после установки фильтросимметрирующего устройства

Сравнение расчетных показателей качества электрической энергии со значениями ГОСТ 32144-2013 до установки фильтросимметрирующего устройства

Показатели электрической энергии	Расчетное значение, %	Нормируемое значение, %
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_u , %	6,9	3,0
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_u(n)$, %	3	1,5
	5	1,5
	7	1,0
Коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %	3,4	2,0

Показатели электрической энергии	Расчетное значение, %	Нормируемое значение, %
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_u , %	1,064	3,0
Коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения $K_u(n)$, %	3	1,014
	5	0,274
	7	0,172
Коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %	1,45	2,0

МД. 164.156.1304.02.СХ					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Схема замещения для расчета показателей качества электрической энергии Повышение качества электрической энергии в электрических сетях с тяжелой нагрузкой в районе подстанции Сковадино Амурской области
Разраб.	Иванова Е.А.				
Проверил	Сабина Н.В.				
Т.контр.					
Рецензент					
Н.контр.	Козлов А.И.				Лист 3
Утв.	Сабина Н.В.				Листов 3