

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт

Электроэнергетики  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Пантелеев  
подпись      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Анализ влияния несинусоидальности токов и напряжений на надежность  
энергосистемы Республики Хакасия

наименование темы

13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	<u>доц. каф ЭМиАТ, к.э.н.</u>	<u>Н. В. Дулесова</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>И. Н. Затынайченко</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	<u>начальник СЭР</u>	<u>И. П. Борисов</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	<u>доц. каф ЭМиАТ, к.т.н.</u>	<u>А. В. Коловский</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2022

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»  
институт

«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ А.В. Коловский  
подпись      инициалы, фамилия  
\_\_\_\_\_ «17» октября 2022 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме магистерской диссертации**

Абакан 2022

Студенту Затынайченко Ирине Николаевне

фамилия, имя, отчество

Группа ОЗХЭн 20–01 Направление (специальность) \_\_\_\_\_

номер

13.04.02.

код

«Электроэнергетика и электротехника»

полное наименование

Тема выпускной квалификационной работы Анализ влияния несинусоидальности токов и напряжений на надежность энергосистемы Республики Хакасия

Утверждена приказом по университету № 720 от 17.10.2022

Руководитель ВКР Н. В. Дулесова, к.э.н., доцент кафедры «Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: однолинейные схемы полстанции; фазные напряжения и токи; осциллограммы действующих значений гармонических составляющих

Перечень разделов ВКР:

Введение

- 1 Теоретическая часть
  - 1.1 Надежность работы энергосистемы
  - 1.2 Классификация и режим работы электроприемников
  - 1.3 Несинусоидальность напряжений и токов
  - 1.4 Современные средства компенсации реактивной мощности в узлах с нелинейной нагрузкой
  - 1.5 Показатели качества электроэнергии
- 2 Аналитическая часть
  - 2.1 Характеристика предприятия
  - 2.2 Анализ аварий по операционной зоне Хакасского РДУ
  - 2.3 Анализ исходных данных
  - 2.4 Информационные технологии обработки статистических данных
  - 2.5 Расчет несинусоидальности напряжений и токов
    - 2.5.1 Расчет несинусоидальности напряжения в нормальном режиме
    - 2.5.2 Расчет несинусоидальности тока в нормальном режиме
    - 2.5.3 Расчет несинусоидальности напряжения в аварийном режиме
    - 2.5.4 Расчет несинусоидальности напряжения в послеаварийном режиме
- 3 Практическая часть
  - 3.1 Анализ выполненных расчетов несинусоидальности тока и напряжения
  - 3.2 Выводы по работе

Заключение

Список использованных источников

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_

подпись

Н. В. Дулесова

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

подпись, инициалы и фамилия студента

И. Н. Затынайченко

«17» октября 2022 г.

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Анализ влияния несинусоидальности токов и напряжений на надежность энергосистемы Республики Хакасия» содержит 63 страницы текстового документа, 31 использованных источников.

НАДЕЖНОСТЬ, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, НЕССИНУССОИДАЛЬНОСТЬ НАПРЯЖЕНИЯ, НЕССИНУССОИДАЛЬНОСТЬ ТОКА, ПОДСТАНЦИЯ ТЯГОВОГО ТРАНЗИТА.

Объект исследования – ПС 220 кВ Означенная-районная, ПС 220 кВ Степная, ПС 220 кВ Туим и ПС 500 кВ Означенное.

Предмет исследования – показатели качества электроэнергии.

Методы исследования – обработка статистической информации с помощью методов компьютерного моделирования, математической статистики и информационных технологий с визуализацией.

Цель данной работы является исследование влияния несинусоидальности напряжений и токов на надежность функционирования энергосистем.

Научная новизна работы заключается в выполнении анализа влияния несинусоидальности напряжений и токов на качество электроэнергии в зависимости от вида нагрузки на объектах энергосистемы Республики Хакасия относительно ГОСТов.

Практическая значимость исследований – работы позволят провести анализ влияния несинусоидальности и разработать рекомендации по улучшению состояния проблемных мест в энергосистеме.

## **THE ABSTRACT**

The final qualifying work on the topic "Analysis of the influence of non-sinusoidal currents and voltages on the reliability of the power system of the Republic of Khakassia" contains 63 pages of a text document, 31 sources used.

**RELIABILITY, POWER QUALITY INDICATORS, NON-SINUSOIDAL VOLTAGE, NON-SINUSOIDAL CURRENT, TRACTION TRANSIT SUBSTATION.**

The object of research is the PS 220 kV Designated-district, PS 220 kV Steppe, PS 220 kV Tuim and PS 500 kV Designated PS.

The subject of the study is electricity quality indicators.

Research methods – processing of statistical information using computer modeling methods, mathematical statistics and information technologies with visualization.

The purpose of this work is to study the effect of non-sinusoidal voltage and current reliability on the functioning of power systems.

The scientific novelty of the work consists in analyzing the effect of non-sinusoidal voltages and currents on the quality of electricity, depending on the type of load on the objects of the power system of the Republic of Khakassia relative to GOST standards.

The practical significance of the research work will allow us to analyze the impact of non-sinusoidality and develop recommendations for improving the condition of problem areas in the power system.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Теоретическая часть.....	10
1.1 Надежность работы энергосистемы.....	10
1.2 Классификация и режим работы электроприемников .....	11
1.3 Несинусоидальность напряжений и токов .....	13
1.4 Современные средства компенсации реактивной мощности в узлах с нелинейной нагрузкой .....	14
1.5 Показатели качества электроэнергии .....	17
2 Аналитическая часть.....	20
2.1 Характеристика предприятия .....	20
2.2 Анализ аварий по операционной зоне Хакасского РДУ .....	23
2.3 Анализ исходных данных.....	26
2.4 Информационные технологии обработки статистических данных.....	31
2.5 Расчет несинусоидальности напряжений и токов .....	33
2.5.1 Расчет несинусоидальности напряжения в нормальном режиме .....	34
2.5.2 Расчет несинусоидальности тока в нормальном режиме .....	42
2.5.3 Расчет несинусоидальности напряжения в аварийном режиме.....	45
2.5.4 Расчет несинусоидальности напряжения в послеаварийном режиме.....	48
3 Практическая часть .....	51
3.1 Анализ выполненных расчетов несинусоидальности тока и напряжения .....	51
3.2 Выводы по работе .....	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	58
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	59
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	60

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день современная энергетика в промышленно-развитых странах характеризуется следующими тенденциями:

- ростом нагрузок, определяемым развитием экономики этих стран;
- повышением экологического требования к объектам электроэнергетики, что вызывает определенные сложности в сооружении новых линий электропередач;
- объединением электрических сетей различных компаний в единые национальные энергосистемы;
- внедрением рыночных отношений в электроэнергетике, что вызывает сложности в обмене мощностью и энергией между отдельными энергетическими компаниями и электроэнергетическими системами;
- стремлением использовать наиболее дешевые источники электроэнергии, расположенные, как правило, в отдаленных районах;
- крупными авариями, возникающими обычно из-за слабости отдельных межсистемных связей.

К числу наиболее острых проблем настоящего времени можно отнести уменьшение аварийности в распределительных сетях крупных промышленных регионов. Последствиями аварий являются большие убытки, а их ликвидация занимает значительное время. Для уменьшения аварийности на объектах электроэнергетики необходимо рассмотреть вопрос повышения надежности и устойчивости работы распределительных сетей высокого напряжения.

Надежность работы распределительных сетей связана с необходимостью поддерживать в установленных значениях показатели качества электроэнергии требованиям ГОСТа.

В данной работе проведен анализ влияния одного из показателей качества электроэнергии на объектах энергетики Республики Хакасия.

**Актуальность работы.** С ростом нагрузки потребителей и распределительной сети особое внимание нужно уделять показателям качества

электроэнергии. Из всех показателей для изучения выделим несинусоидальность напряжений и токов на объекты энергетики с линейной и нелинейной вольтамперной характеристикой.

**Степень разработанности проблемы.** Проблемой надежности и качества электрической энергии в системах электроснабжения и распределительных сетях занимались многие отечественные и зарубежные ученые, и научные деятели, так как В. В. Романов [1], М. Е. Волгин [2], А. А. Аббакумов [3] и другие. Так же были изучены работы ученых, касающиеся электромагнитной совместимости в энергетике, таких как Г. Н. Цицикян [4], А. Е. Усачев [5], И. П. Кужекин [6].

Работы ученых, которые упомянуты выше, позволили изучить, обобщить и сделать выводы о степени важности проблемы, которую они поднимают в своих научных работах. О возможных последствиях и причинах аварий, возникающих на объектах энергетики.

**Целью работы** является исследование влияния несинусоидальности напряжений и токов на надежность функционирования энергосистем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить поиск и изучить литературные источники по теме исследования;
- оценить механизмы влияния несинусоидальности напряжений и токов на надежность функционирования энергосистемы;
- выполнить анализ и структурирование отказов в энергосистеме Республики Хакасия;
- рассчитать коэффициенты несинусоидальности в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме для подстанций с разным видом нагрузки;
- оценить коэффициенты несинусоидальности относительно установленных нормативов.

**Объект исследования** – ПС 220 кВ Означенная-районная, ПС 220 кВ Степная, ПС 220 кВ Туим и ПС 500 кВ Означенное.

**Предметом исследования** являются показатели качества электроэнергии.

**Гипотеза исследования** – несинусоидальность токов и напряжений оказывает неблагоприятное влияние на надежность функционирования энергосистемы.

**Методология и методы исследования.** Обработка статистической информации с помощью методов компьютерного моделирования, математической статистики и информационных технологий с визуализацией.

**Научная новизна работы** заключается в выполнении анализа влияния несинусоидальности напряжений и токов на качество электроэнергии в зависимости от вида нагрузки на объектах энергосистемы Республики Хакасия относительно ГОСТов.

**Практическая значимость** работы позволит провести анализ влияния несинусоидальности и разработать рекомендации по улучшению состояния проблемных мест в энергосистеме.

**На обсуждение и защиту выносятся** результаты исследования влияния несинусоидальности напряжений на надежность работы энергосистемы Республики Хакасия в нормальном, аварийном и послеаварийном режиме.

**Апробация работы.** Основные результаты были представлены в 2021 на XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны свободны – 2021», посвященной Году науки и технологии. Докладчик награжден сертификатом заочного участия. В 2022 году на XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны свободны – 2022», посвященной Международному году фундаментальных наук в интересах устойчивого развития. Докладчик награжден сертификатом заочного участия.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из трех разделов: теоретическая, аналитическая и практическая часть. Объем работы составляет 63 страницы.

# 1 Теоретическая часть

## 1.1 Надежность работы энергосистемы

Работы энергосистемы характеризуется двумя параметрами безаварийностью и надежностью [7]. Причины возникновения аварий в энергосистеме могут быть разные, такие как:

- погодные явления (дождь, гроза, шквалистый ветер, гололедоизморозевые отложения на проводах и т. д.) приводящие к обрыву и замыканию проводов, разрушению опор и линий электропередач;

- понижение частоты из-за дефицита генерирующей мощности вследствие отключения генераторов или неспрогнозированного повышения потребления;

- повышение частоты из-за перегрузки внутрисистемных, а также межсистемных связей вследствие нарушения режима работы;

- повышения уровня напряжения в контрольных пунктах по напряжению, регламентированного Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии (далее – ПТЭЭ) [8], вследствие недогруза по реактивной мощности генераторов и синхронных компенсаторов;

- повышения уровня напряжения на энергетическом оборудовании из-за отключения линий электропередач;

- разделение единой энергетической системы на параллельную работу, асинхронный режим работы отдельных частей энергосистемы, перегрузка межсистемных связей и многие другие.

Если перейти к надежности, то это технико-экономическое понятие, связанное с дополнительными затратами на применение материалов и деталей повышенного качества, создание дополнительных резервных элементов в распределительной сети [9]. Снижение надежности приводит к большему увеличению расходов в аварийных ситуациях и приносит значительный ущерб потребителям. Поэтому необходимо поддерживать в установленных пределах

значение определенных параметров, которые связаны с надежностью работы энергосистемы. Для контроля качества электроэнергии установлены требования к следующим показателям:

- установившееся отклонение напряжения;
- коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения.

Поддержание в установленных пределах значений показателей, перечисленных выше, определяют государственные стандарты:

- ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [10];
- ГОСТ 30804.4.30–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии [11].

## **1.2 Классификация и режим работы электроприемников**

Структурировать виды электроприемников можно по следующим критериям [12]:

- по роду тока;
- по номинальному напряжению;
- по режиму работы;
- по надежности электроснабжения.

*По роду тока* электроприемники можно разделить на группы, работающие на постоянном, переменном и импульсном токе.

*По номинальному напряжению* на потребителей малой мощности, получающих питание от сети до 1 кВ. И на потребителей большой мощности, получающих питание от сети свыше 1 кВ.

*По режиму работы* электроприемники делятся три группы:

- электроприемники, работающие с неизменной или мало изменяющейся нагрузкой;
- электроприемники, работающие в кратковременном режиме;
- электроприемники, работающие в повторно-кратковременном режиме.

*По надежности электроснабжения* потребители делятся на три категории [13]:

– потребители I (особой) категории, для которых перерыв в электроснабжении не допустим, так как это может повлечь за собой угрозу для государства, жизни и здоровья людей, причинить значительный материальный ущерб из-за непрерывного и сложного технологического процесса, нарушить функционирование объектов связи и телерадиовещания;

– потребители II категории, для которых перерыв в электроснабжении приводит к нарушению нормального функционирования большого количества городских и сельских жителей, а также нарушение работы крупных предприятий, повлекшее за собой большой недоотпуск продукции, массовые простои рабочих мест, механизмов и промышленного транспорта.

– потребители III категории, для которых регламентированный перерыв в электроснабжении не относится ни к I, ни к II категории электроснабжения.

Большое разнообразие видов потребителей электроэнергии приводит к снижению показателей надежности, ведь работа определенной группы электроприемников по-разному сказывается на функционировании энергосистемы.

### 1.3 Несинусоидальность напряжений и токов

Несинусоидальность напряжений и токов в электросетях создают сами потребители электрической энергии [14]. Источники электроэнергии – синхронные генераторы всегда вырабатывают симметричную систему напряжений. Однако потребители электроэнергии могут иметь линейную и нелинейную нагрузку. Если у потребителей будет линейная нагрузка, то у них будет и симметричная система напряжений. А если потребители имеют нелинейную нагрузку (разная нагрузка по фазам), то возникают перепады напряжений в сетях, вследствие чего возникает несинусоидальность напряжений и токов [15].

Широкое применение тиристорных электроприводов, выпрямительных электролизных установок, мощных электродуговых печей, прокатных станов и других потребителей электроэнергии с резкопеременной нагрузкой и несинусоидальным током сопровождается значительным потреблением реактивной мощности и искажением питающего напряжения. К таким потребителям относятся, прежде всего, металлургические заводы, химические предприятия, предприятия цветной металлургии, целлюлозно-бумажные предприятия, предприятия электрохимической обработки металлов и драгоценных камней, предприятия, имеющие электродуговую и контактную сварку, обычные предприятия, использующие для освещения газоразрядные лампы, предприятия нефтяной, газовой и угольной отраслей, ирригационные предприятия, имеющие электродвигатели различного типа, и другие предприятия [16].

Наличие высших гармоник напряжения приводит к серьезным проблемам у потребителей электроэнергии:

- снижаются сроки работы оборудования за счет его более быстрого износа;
- происходят сбои в работе производства из-за нарушений в системах управления, повреждения технологического оборудования;

- увеличиваются потери электроэнергии в сетях;
- происходит регулярное выведение из строя дугогасящих реакторов;
- чрезмерно нагреваются кабели и трансформаторы, что может привести к выходу из строя всей системы;
- неправильно работают защитные устройства;
- выходят из строя устройства компенсации реактивной мощности, перегруженные токами высших гармоник.

Все перечисленные неблагоприятные последствия, возникающие из-за наличия высших гармоник в кривой напряжения и тока приводят к увеличению числа аварий в энергосистеме, а как следствие и к увеличению затрат на эксплуатацию энергетического оборудования.

#### **1.4 Современные средства компенсации реактивной мощности в узлах с нелинейной нагрузкой**

К современной системе снабжения электричеством предъявляется все большее количество требований, причиной которых становятся:

- значительные масштабы современного производства;
- важное условие непрерывности рабочего процесса на многих производственных предприятиях;
- сложные условия для функционирования электростанций и подстанций;
- высокие требования к качеству электроэнергии и т. д.

Основное назначение:

- компенсировать реактивную мощность,
- снизить гармонические искажения напряжения.

Для компенсации реактивной мощности и повышения коэффициента мощности, фильтрации высших гармоник тока, снижения колебаний напряжения и улучшения параметров качества электроэнергии применяются статические компенсирующие устройства [17]:

– конденсаторные установки (повышение коэффициента мощности);

– фильтрокомпенсирующие установки (повышение коэффициента мощности и фильтрация высших гармоник тока);

– статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (повышение коэффициента мощности, фильтрация высших гармоник тока, снижение несимметрии напряжения и стабилизация напряжения).

Батареи статических конденсаторов (БСК) – устройства, предназначенные для компенсации реактивной мощности [18]. Цель использования конденсаторных батарей – снижение перетоков реактивной мощности, которое, в свою очередь, ведет к уменьшению загрузки ЛЭП, трансформаторов, позволяет регулировать напряжение внутри энергосистемы. Установка компенсаторных батарей позволяет увеличить напряжение на шинах до номинальных значений, предписываемых стандартами. Это позволяет отказываться от устройств регулирования напряжения со стороны потребителей. Применение батарей на подстанциях может способствовать разгрузке трансформаторов, подключать дополнительных потребителей. Базой для изготовления батарей статических конденсаторов служат косинусные однофазные конденсаторы, соединенные, в зависимости от режима работы нейтрали, в треугольник или в звезду путем параллельно-последовательного соединения. Использование батарей статических конденсаторов позволяет увеличить напряжение на шинах СПП на 3–4%, а также снизить потери в сетях 6–110 кВ. Батареи статических конденсаторов дают возможность поддерживать напряжение на нужном уровне, выдавать реактивную мощность и корректировать перетоки энергии [19].

Фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) – предназначенные для снижения гармонических искажений напряжения и компенсации реактивной мощности нагрузок потребителей в сетях электроснабжения промышленных предприятий и в электрических сетях [20].

Установка силовых фильтров является одним из наиболее эффективных и качественных способов по снижению влияния на сеть дуговых сталеплавильных печей, сварочного производства, вентильных преобразователей, широко внедряемых в промышленном электроснабжении для технической эффективности производства [21].

Силовые фильтры высших гармоник имеют важное значение для оптимизации издержек предприятий промышленности, а также повышения стабильности их работы и снижения рисков. Использование силовых фильтров даёт возможность добиться более высоких промышленных показателей, а также использовать дополнительную нагрузку на сеть, что может оказаться достаточно важным при расширении. Силовые фильтры для предприятий в большинстве ситуаций имеют срок окупаемости менее года, что делает их использование экономически обоснованным и необходимым [22].

Фильтры высших гармоник состоят из конденсаторов, включенных последовательно с индуктивностью. Индуктивность выбирается такой величины, чтобы фильтр представлял собой низкоимпедансный последовательный резонансный контур на частоте гармоники. Таким образом, обеспечивается прохождение основной части гармонической составляющей тока через фильтр. Конденсаторы создают реактивную мощность на основной частоте [23].

Применение статических компенсирующих устройств позволяет [24]:

- существенно снизить нагрузку по реактивной мощности и высшим гармоникам тока трансформаторов, питающих потребителей, что дает возможность подключить дополнительную нагрузку;

- улучшить показатели качества напряжения и, тем самым, повысить качество выпускаемой продукции и производительность технологического процесса потребителя электроэнергии.

## 1.5 Показатели качества электроэнергии

Для снижения неблагоприятное влияние высших гармоник в кривой напряжения существуют нормативно-техническая документация, определяющая требования к качеству электроэнергии. Согласно ГОСТ 32144–2013 [10] гармонические составляющие напряжения обусловлены, как правило, нелинейными нагрузками пользователей электрических сетей, подключаемыми к электрическим сетям различного напряжения. Гармонические токи, протекающие в электрических сетях, создают падения напряжений на полных сопротивлениях электрических сетей.

Показателями качества электроэнергии, относящимися к гармоническим составляющим напряжения, являются:

– значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка  $K_{U(n)}$  в процентах напряжения основной гармонической составляющей в точке передачи электрической энергии;

– значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей)  $K_U$ , % в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

а) значения коэффициентов, гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах 1–3, в течение 95% времени интервала в одну неделю;

б) значения коэффициентов, гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах 1–3, увеличенных в 1,5 раза, в течение 100% времени каждого периода в одну неделю;

в) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих

напряжения  $K_{U(n)}$ , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 4, в течение 95% времени интервала в одну неделю;

г) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$ , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 5, в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Таблица 1 – Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения не кратных трем  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
	Напряжение электрической сети, кВ.			
	0,38	6-25	35	110-220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
>25	1,5	1	1	0,4

Таблица 2 – Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, кратных трем  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
	Напряжение электрической сети, кВ.			
	0,38	6-25	35	110-220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 3 – Значения коэффициентов напряжения четных гармонических составляющих  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
	Напряжение электрической сети, кВ.			
	0,38	6-25	35	110-220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 4 – Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица 5 – Значения суммарных предельных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Значения суммарных предельных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
12,0	8,0	6,0	3,0

## **2 Аналитическая часть**

### **2.1 Характеристика предприятия**

На территории Российской Федерации Акционерное Общество «Системный оператор Единой энергетической системы» (далее – АО «СО ЕЭС») единолично осуществляет централизованное оперативно-диспетчерское управление [25].

Системный оператор в своей деятельности решает следующие задачи:

- осуществляет в режиме реального времени технологическое управление объектами ЕЭС России;
- создает условия для качественной и целостной взаимосвязанной работы оптового и розничного рынка электрической энергии и мощности;
- обеспечивает необходимые условия для перспективного развития ЕЭС России.

Функции Системного оператора заключаются в следующем:

- осуществлять в соответствии с утвержденными, Правительством Российской Федерации, положениями и правилами функционирования оптового рынка, управление режимами работы объектов электроэнергетики;
- разрабатывать для перспективного развития энергетики необходимые программные документы на долгосрочный период;
- поддерживать в установленных пределах параметры надежности и качества электрической энергии ЕЭС России;
- обеспечивать работу системы автоматического регулирования частоты и мощности для регулирования частоты электрического тока в энергосистеме;
- участвовать в процессе прогнозирования объемов производства и потребления электрической энергии;
- выдавать разрешения на вывод в ремонт и ввод в работу объектов электроэнергетики, а также на вывод из эксплуатации;

– выдавать оперативные команды и распоряжения на изменение эксплуатационного состояния или технологического режима работы объектов энергетики;

– разрабатывать оптимальные суточные графики нагрузки;

– осуществлять должную параллельную работу национальной энергосистемы с энергосистемой смежных зарубежных государств;

– согласовывать и выдавать технологические требования при присоединении к Единой энергетической системе России;

– отслеживать техническое состояние оборудования на объектах электроэнергетики.

Системный оператор осуществляет технологическое управление на территории 81 субъекта Российской Федерации, ниже представлена его иерархическая структура:

– Исполнительный аппарат в городе Москве;

– 7 Объединенных диспетчерских управление (далее – ОДУ), созданных в результате энергообъединения;

– 49 Региональных диспетчерских управление (далее – РДУ), осуществляющих управление на территории одного или нескольких субъектов Российской Федерации.

Описание энергосистем (энергорайонов), входящих в состав ОЗ Хакасского РДУ.

Энергосистема Республики Хакасия граничит с энергосистемами Красноярского края, Кемеровской области и Республики Тыва. Системообразующая сеть состоит из ЛЭП 110 кВ, 220 кВ и 500 кВ.

*Межсистемным связям с энергосистемой Красноярского края:*

– ВЛ 500 кВ Итатская – Абаканская № 1;

– ВЛ 500 кВ Итатская – Абаканская № 2;

– ВЛ 220 кВ Абаканская – Минусинская-опорная I цепь (Д-23);

– ВЛ 220 кВ Абаканская – Минусинская-опорная II цепь (Д-24);

– КВЛ 220 кВ Шушенская-опорная – Означенное-районная I цепь с отпайкой на Майнскую ГЭС;

– КВЛ 220 кВ Шушенская-опорная – Означенное-районная II цепь с отпайкой на Майнскую ГЭС;

– ВЛ 220 кВ Ужур – Сора I цепь с отпайкой на ПС Туим (Д-63);

– ВЛ 220 кВ Ужур – Сора II цепь с отпайкой на ПС Туим (Д-64);

– ВЛ 110 кВ Копьёво – пункт учёта (С-327);

– ВЛ 110 кВ Каптыревская – Означенное-районная с отпайкой на ПС Карак (С-361).

*Межсистемные связи с энергосистемой Кемеровской области:*

– КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Новокузнецкая № 1;

– КВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Новокузнецкая № 2;

– КВЛ 220 кВ Междуреченская – Чарыш;

– ВЛ 220 кВ Бискамжа – Теба.

*Межсистемные связи с энергосистемой Республики Тыва:*

– ВЛ 220 кВ Абаза – Ак-Довурак (Д-42).

Энергосистема Республики Хакасия состоит из 4 энергорайонов:

1) Абакано-Черногорский энергорайон включает в себя следующие объекты электроэнергетики:

– электрические сети 110 кВ Филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»;

– электрические сети 220 и 500 кВ Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» Хакасское предприятие МЭС;

– Абаканскую ТЭЦ;

– Абаканскую СЭС.

2) Саяногорский энергорайон включает в себя следующие объекты электроэнергетики:

– Саяно-Шушенскую ГЭС;

– Майнскую ГЭС;

- электрические сети 220 и 500 кВ Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» Хакасское предприятие МЭС;

- электрические сети 110 кВ Филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго».

3) Аскизский энергорайон включает в себя следующие объекты электроэнергетики:

- электрические сети 220 кВ Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» Хакасское ПМЭС;

- электрические сети 220 кВ Абаканской дистанции электроснабжения Красноярской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»;

- ТЭЦ Абаза-Энерго.

4) Сорско-Туимский энергорайон включает в себя следующие объекты электроэнергетики:

- электрические сети 220 кВ Филиала ПАО «ФСК ЕЭС» Хакасское предприятие МЭС;

- электрические сети 110 кВ филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго».

## **2.2 Анализ аварий по операционной зоне Хакасского РДУ**

Для анализа влияния несинусоидальности на надежность работы энергосистемы Республики Хакасия были обработаны данные по аварийным отключениям за период с 2016–2022 года. Данные по аварийным отключениям были взяты из статистической базы Хакасского РДУ. Исходные данные представлены в файле формата Excel. Данные содержат информацию: год, дата отключения, класс напряжения, наименование объекта диспетчеризации, информацию по погодным условиям и времени простоя оборудования. Часть исходных данных по аварийным отключениям представлен на рисунке 1.

№	Дата и время начала события	Дата и время откл. оборудовани	Тип, напряжен	Объект диспетчеризации на котором произошло отключение/авария	Присоединение	Работа РЗА и ПА	Погодные условия	Причины аварий в сетях	Время включения	Общее время простоя
4	20.01.16 12:11	20.01.16 12:11	ЛЭП 110	ПС 220 кВ Означенно-районная	С-343	ЗЗ	Без замечаний	ЛЭП 110 кВ и выше	УАПВ	1:58:41
5	26.01.16 10:00	26.01.16 10:00	ПС 110	ПС 110 кВ Рассвет	2Т	ДЗТ	Без замечаний	Трансформаторы (автотрансформаторы), шунтир реакт 110 кВ и выше	27.01.16 14:47	28:47
6	01.02.16 5:30	01.02.16 5:30	ПС 500	ПС 500 кВ Аллюминиевая	В-545/550	персоналом	Без замечаний	Оборудование 110 кВ и выше	10.02.16 10:18	220:48
7	04.02.16 11:05	04.02.16 11:05	ПС 220	ПС 220 кВ Туим	В 2АТ-110	персоналом	Без замечаний	Оборудование 110 кВ и выше	06.02.16 8:10	45:05
8		04.02.16 14:25	ПС 220	ПС 220 кВ Туим	В С-336	персоналом	Без замечаний	Оборудование 110 кВ и выше	06.02.16 11:07	44:42
9		04.02.16 17:55	ПС 220	ПС 220 кВ Туим	2АТ	персоналом	Без замечаний	Оборудование 110 кВ и выше	06.02.16 9:30	39:35
10	06.02.16 1:49	06.02.16 1:49	ПС 500	ПС 500 кВ Абаканская	2АТ	КИВ-500 2АТ	Без замечаний	Трансформаторы (автотрансформаторы), шунтир реакт 110 кВ и выше	09.02.16 5:43	75:54
11	07.02.16 13:25	07.02.16 13:25	АСДУ/СДТУ	Абаканская СЭС	Связь	обесточение	Без замечаний	СДТУ	07.02.16 14:30	1:05

Рисунок 1 – Статистические данные по аварийным отключениям в операционной зоне Хакасского РДУ

В результате обработки статистических данных была произведена выборка аварийных отключений, для выполнения анализа влияния несинусоидальности на надежность работы энергосистемы, по годам и классу напряжения. Результат обработки данных по аварийным отключениям за 2016–2022 года представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Таблица по аварийным отключениям в ОЗ Хакасского РДУ за 2016–2022 года

Год	Объекты								
	ПС 110 кВ	ПС 220 кВ	ПС 500 кВ	ЛЭП 110 кВ	ЛЭП 220 кВ	ЛЭП 500 кВ	ГЭС	ТЭЦ	Итого
2016	23	49	7	70	22	10	10	9	200
2017	20	39	4	67	33	5	9	18	195
2018	19	21	4	67	26	5	9	24	175
2019	6	20	2	57	14	6	7	12	124
2020	14	16	3	65	23	8	11	7	147
2021	6	43	1	61	13	6	9	10	149
2022 (10 месяце)	9	16	2	54	9	1	6	16	113
Итого	1103								

Результаты обработки статистических данных по аварийным отключениям в энергосистеме Республики Хакасия представим в виде графика, содержащего года и количество отключений. График аварийных отключений представлен на рисунке 2.

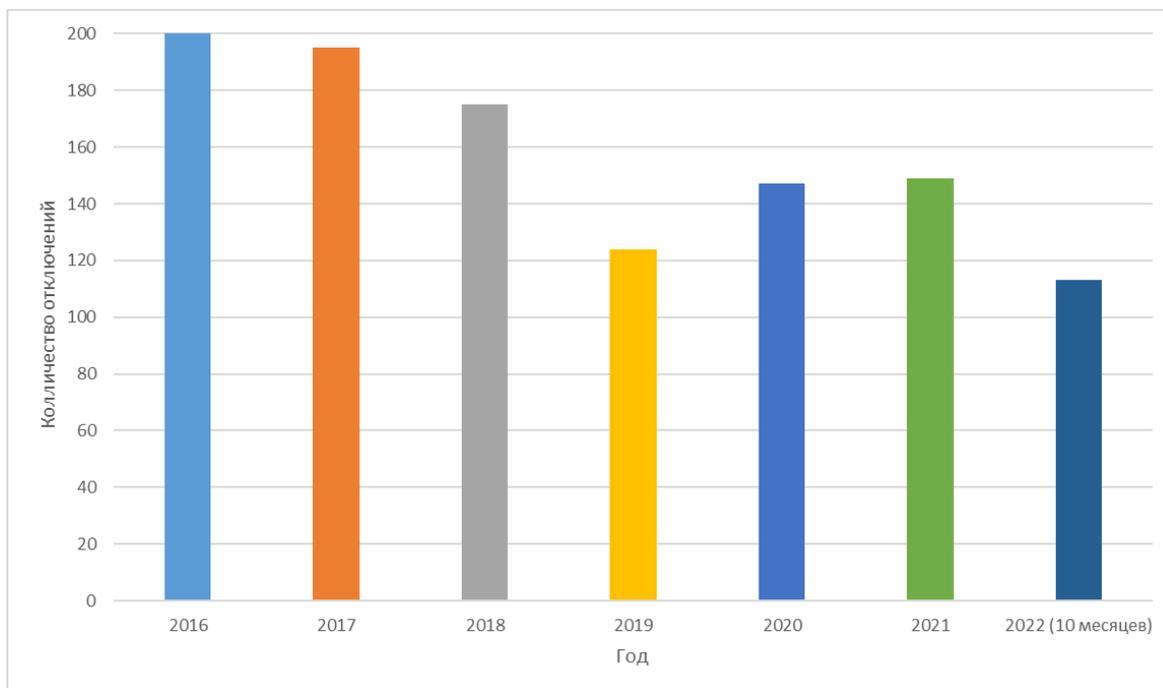


Рисунок 2 – График аварийных отключений за 2016–2022 года по ОЗ Хакасского РДУ

Результатами обработки статистических данных является сравнение аварийных отключений за 2019–2022 года, к более ранним годам 2016–2018. Среднее количество отключений за 2016–2018 года составляет 170 отключений в год. За 2019–2022 года среднее количество отключений составляет 110 отключений в год. Из обработанных данных по аварийным отключениям можно сделать выводы, что аварийность в энергосистеме за последние три года снизилась в среднем почти в 1,5 раза. Снижение аварийности в энергосистеме говорит о том, что ежегодно предпринимаются меры по повышению ее надежности. Такие как резервирование генерирующих мощностей и пропускных способностей линий электропередач, оптимизация электрических режимов, совершенствование автоматизации диспетчерского управления, повышение квалификации эксплуатационного персонала.

### 2.3 Анализ исходных данных

Для исследования несинусоидальности напряжений и токов, а так же для вычислений коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  и коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  взяты фазные напряжения и токи на подстанциях ПС 220 кВ Означенная-районная, ПС 220 кВ Степная, ПС 220 кВ Туим и ПС 500 кВ Означенное. Несинусоидальность напряжений и токов зависит от вида нагрузки на подстанции. Именно поэтому исследование проводилось для ПС 220 кВ Означенная-районная и ПС 220 кВ Туим питающих в основном бытовую нагрузку с постоянной вольтамперной характеристикой. ПС 220 кВ Степная была выбрана так как является подстанцией тягового железнодорожного транзита, где возможна несимметрия напряжения. От ПС 500 кВ Означенное запитан ОАО «Саяногорский алюминиевый завод», алюминиевые заводы, по своей технологии производства, имеют нелинейную вольтамперную характеристику. Схемы подстанций представлены на рисунках 3–6.

Исходные схемно-режимные условия:

– на ПС 220 кВ Означенная-районная отключение ВЛ 220 кВ Шушенская-опорная – Означенное-районная II цепь с отпайкой на Майнскую ГЭС. Исходная схема: Параллельная работа 1 и 2 секции шин 220 кВ, ближайший трансформатор напряжения ТН-220 2 секции.

– на ПС 220 кВ Туим отключение 1 АТ. Исходная схема: Раздельная работа 1 и 2 секции шин 220 кВ, ближайший трансформатор напряжения ТН-110 1 секции.

– на ПС 220 кВ Степная отключение ВЛ 220 кВ Степная – Югачи. Исходная схема: Параллельная работа 1 и 2 системы шин 220 кВ, ближайший трансформатор напряжения ТН-220 2 системы шин.

– на ПС 500 кВ Означенное отключение ВЛ 220 кВ Означенное – ГПП-2 СА3 II цепь (Д-72). Исходная схема: Параллельная работа 1 и 2 системы шин 220 кВ, ближайший трансформатор напряжения ТН-220 2 системы шин.

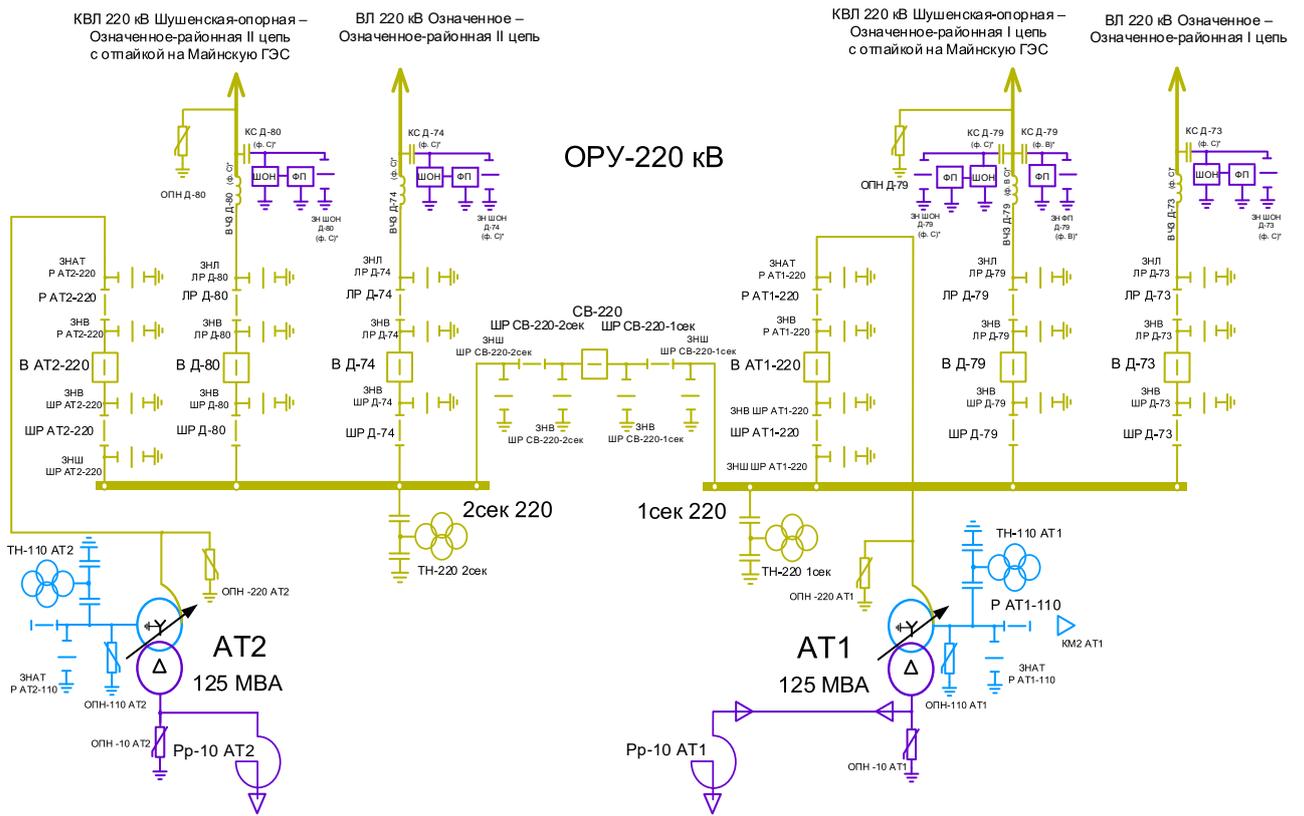


Рисунок 3 – Схема подстанции 220 кВ Означенное-районная

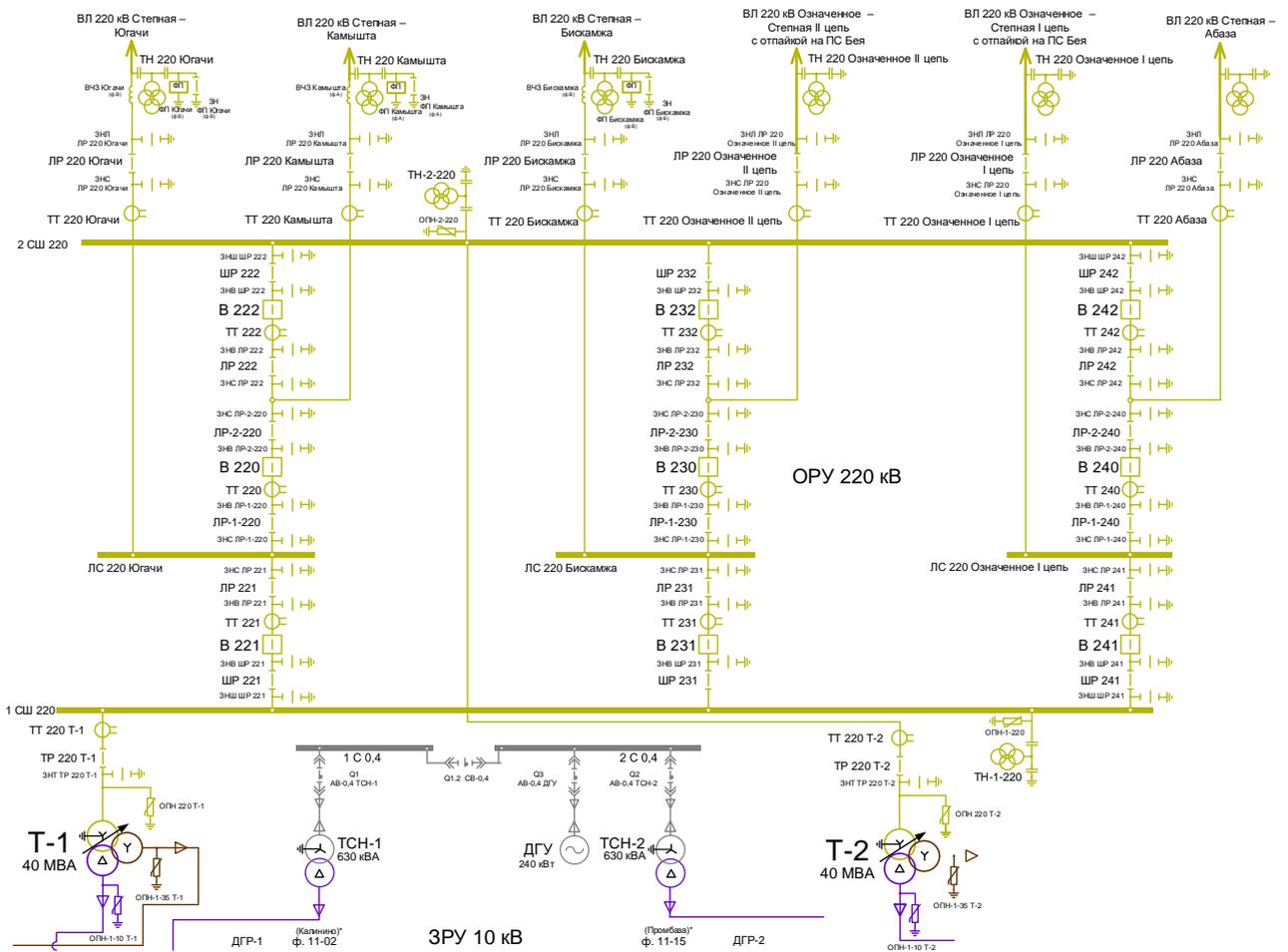


Рисунок 4 – Схема подстанции 220 кВ Степная

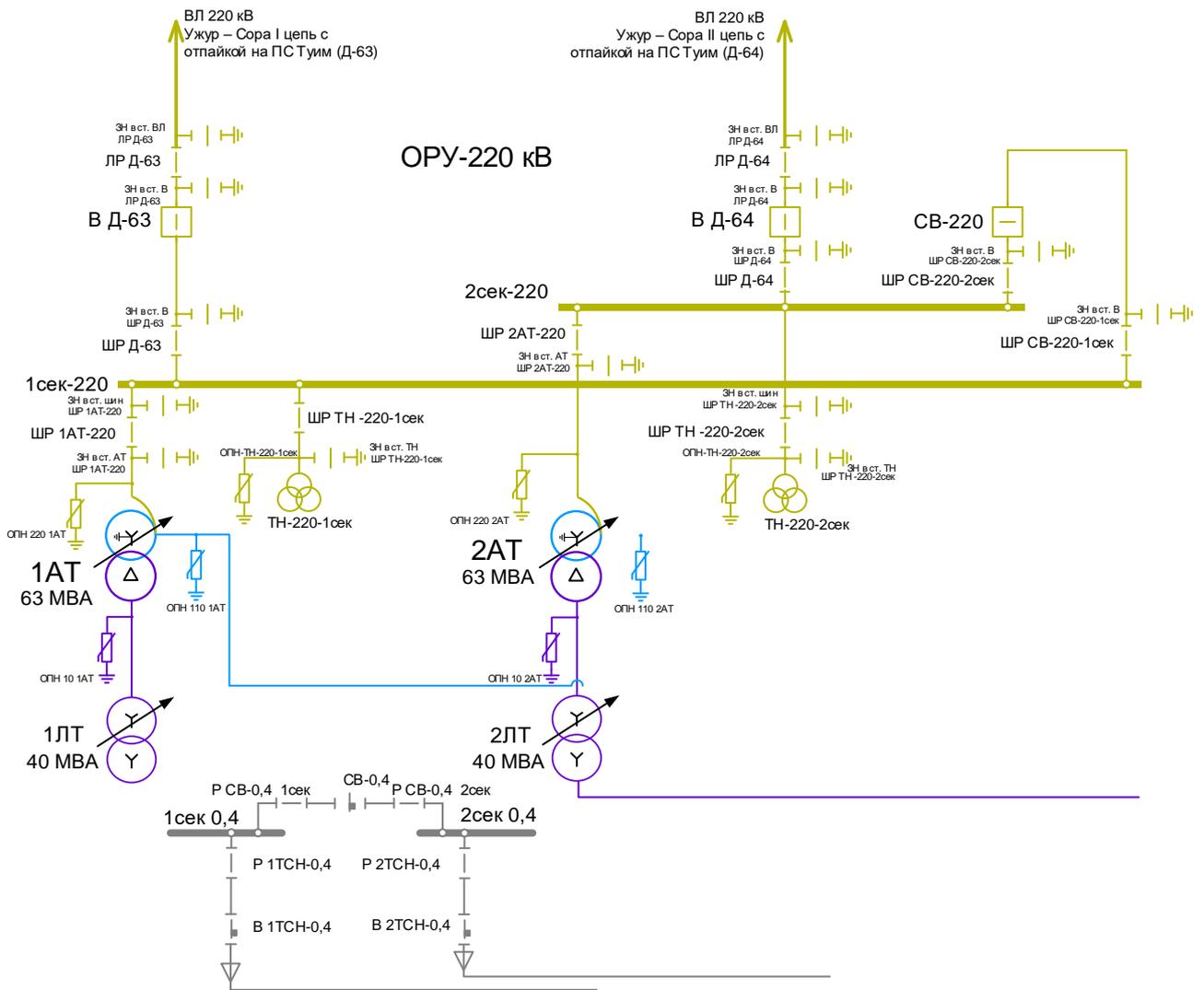


Рисунок 5 – Схема подстанции 220 кВ Туим

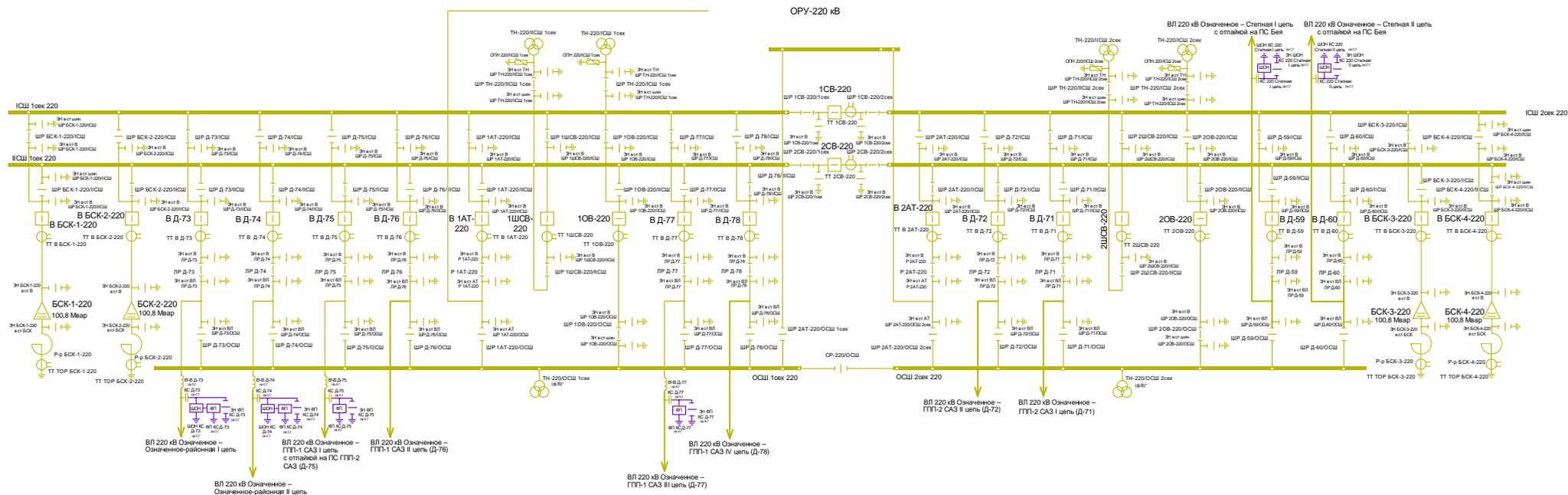


Рисунок 6 – Схема подстанции ОРУ 220 кВ Означенное

## **2.4 Информационные технологии обработки статистических данных**

Информационные технологии обработки статистических данных представляют собой систематизированную последовательность выполняемых действий, которые заключаются в получении и обработке большого объема различной информации и проводятся до тех пор, пока не будут получены ожидаемые результаты. Информационные технологии нужны не только для обработки данных. В первую очередь информационные технологии производят поиск и сбор информации, затем происходит тщательная сортировка и накопление данных, а после уже сам анализ. При необходимости в обработку статистических данных можно включить передачу, хранение и распространение данных. В обработку статистических данных входят различные современные методики, организационно-технологические приемы, а также машинные и программные механизмы, с помощью которых происходит обработка статистических данных для исследования.

Программа – это заданная последовательность выполнения определенных алгоритмов, написанная на различных языках программирования и выполняемая компьютером. Свойства программного продукта зависят от программы и среды, в которой она работает [26]. Для измерения и обработки конкретных данных, существуют различные программы, в которых реализован алгоритм для выполнения необходимых задач. Применение программных продуктов при обработке данных позволяет снизить человеческий фактор, уменьшить время необходимое на обработку статистических данных, снизить вероятность возникновения математических ошибок, при обработке большого объема информации. Для исследования влияния несинусоидальности напряжений и токов в работе применялись программные продукты Microsoft Office Excel и Программно технический комплекс «Черный ящик».

Microsoft Office Excel – это программа позволяющая работать с различными форматами данных. Программа Excel входит в состав пакета

программ Microsoft Office. В Excel можно проводить вычисления с помощью различных формул, создавать таблицы на базе шаблонов, строить графики и диаграммы. Так же можно использовать различные варианты форматирования данных, создавать прогнозы и тенденции. Недостатком данной программы является то, что программа платная [27]. В Excel так же невозможно обрабатывать большие массивы данных.

Программно технический комплекс «Черный ящик» – это набор технических и программных средств. «Черный ящик» предназначен для сбора и передачи телеметрической информации на объектах электроэнергетики. Разработчиком программного комплекса является ООО НТЦ «ГОСАН» [28]. В состав программного обеспечения входят программы:

- для регистрации аварийных событий (BBSERVER). Программа предназначена для считывания аварийных событий (записывает осциллограммы) и хранения их в виде файлов.

- для учета и контроля качества электроэнергии (BBVIEW). Программа является одним из основных программных компонентов. Позволяет производить наблюдения за текущим режимом работы, а также анализировать осциллограммы аварийных событий и переходных процессов.

- для релейной защиты и автоматики (AFVIEW). Программа для измерения электрических величин и дискретных событий.

- для телемеханики, телеизмерений, телесигнализации и телеуправления (BBMETR). Программа для просмотра и хранения телеизмерений и телесигнализации.

В работе будет использоваться программа BBVIEW для анализа нормального режима работы и осциллограмм, при регистрации аварийных событий [29].

Достоинствами данной программы является большой функционал, возможность просмотра осциллограмм аварийных отключений и формирование архива данных за глубокий период времени.

## 2.5 Расчет несинусоидальности напряжений и токов

Программа BVVIEW регистрирует осциллограммы с помощью комплекса «Черный ящик». Осциллограмма записывает одновременно набор сигналов (аналоговых и дискретных). Их количество, а также длительность записи и дискретность могут быть различными, в зависимости от настройки комплекса «Черный ящик». Осциллограмма имеет заголовок и время регистрации. Каждый сигнал осциллограммы представлен на отдельном графике с разверткой по времени. Первыми на осциллограмме идут аналоговые сигнала, далее следуют дискретные. Окно спектра сигналов открывается поверх основного окна осциллограмм. В окне спектра сигналов представлены действующие значения гармонических составляющих. Действующие значения гармонических составляющих вычисляются с помощью дискретного преобразования ряда Фурье [30]. Выборка сигнала происходит объемом в 1 период основной частоты. Спектр сигналов, в виде гистограммы, отображает 12 гармонических составляющих. Из них 11 гармоник кратных основной и одна постоянная составляющая. Гистограмма, в окне спектра сигналов, строится в логарифмическом масштабе.

Коэффициент несинусоидальности напряжения определяется как отношение суммы действующих гармоник к фазному напряжению и рассчитывается по формуле (1):

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_n^2}}{U_\phi} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $U_n$  – действующее значение гармоники;

$U_\phi$  – фазное значение напряжения.

Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения определяется как отношение действующей n-ой гармоники к фазному напряжению и рассчитывается по формуле (2):

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_\phi} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $U_n$  – действующее значение n-ой гармоники;

$U_\phi$  – фазное значение напряжения.

Коэффициент несинусоидальности тока определяется как отношение суммы всех гармоник, кроме основной, к сумме включающую основную гармонику и рассчитывается по формуле (3):

$$K_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{11} I_i^2}{\sum_{i=1}^{11} I_i^2}} \cdot 100\% \quad (3)$$

где  $I_i$  – действующее значение гармоники;

### 2.5.1 Расчет несинусоидальности напряжения в нормальном режиме

Рассчитаем коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  для нормального режима работы на ПС 220 кВ Означенная-районная. Осциллограмма представлена на рисунке 7. На осциллограмме представлены действующие значения гармонических составляющих. Выборка сигнала происходит объемом в 1 период основной частоты. Спектр сигналов, в виде гистограммы, отображает 12 гармонических составляющих. Из них 11 гармоник кратных основной и одна постоянная составляющая. Гистограмма, в окне спектра сигналов, строится в логарифмическом масштабе, шкала представлена в децибелах. Значения взята по стороне 220 кВ второй системы шин.

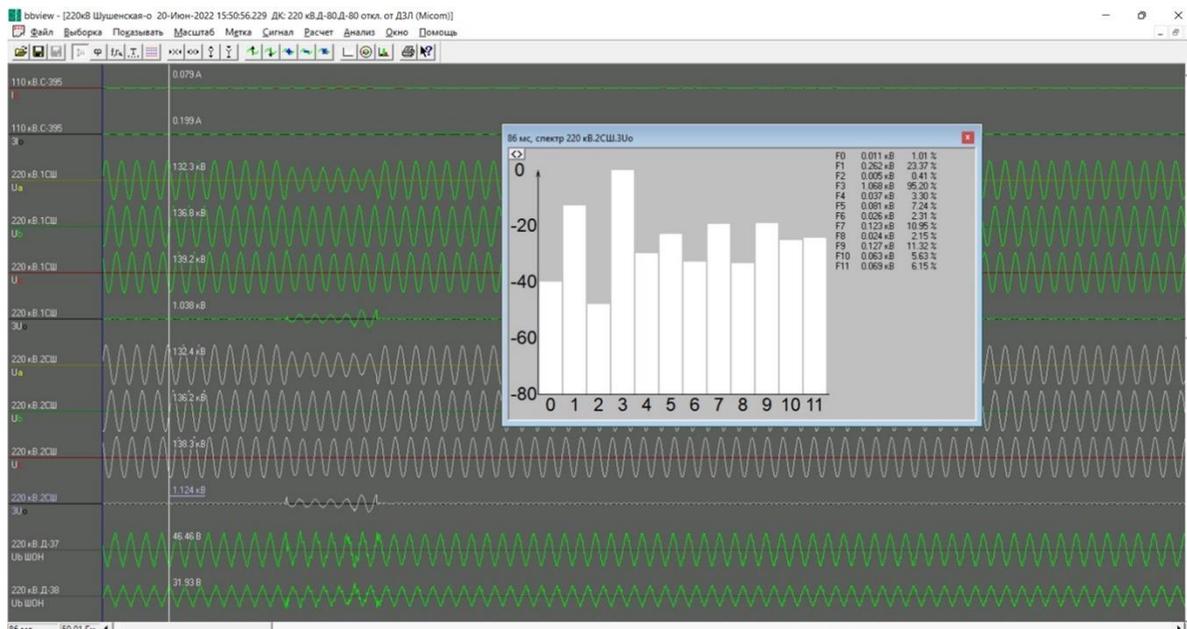


Рисунок 7 – Осциллограмма ПС 220 кВ Означенная-районная

Коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  рассчитаем по формуле (1):

$$K_U = \frac{\sqrt{0,011^2 + 0,262^2 + 0,005^2 + 1,068^2 + 0,037^2 + 0,081^2 + 0,026^2 + 0,123^2 + 0,024^2 + 0,127^2 + 0,063^2 + 0,069^2}}{220} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

Рассчитаем коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  для нормального режима работы на ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное. Осциллограммы представлены на рисунках 8–10.

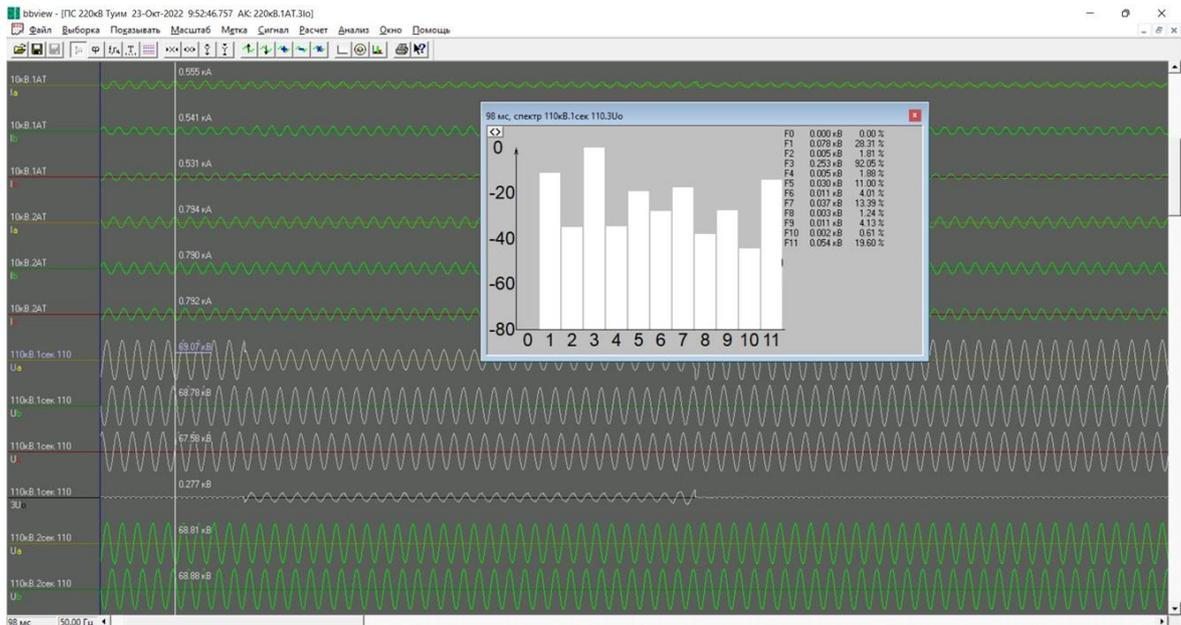


Рисунок 8 – Осциллограмма ПС 220 кВ Туим

На осциллограмме рисунка 8 представлены действующие значения гармонических составляющих. Выборка сигнала происходит объемом в 1 период основной частоты. Спектр сигналов, в виде гистограммы, отображает 12 гармонических составляющих. Из них 11 гармоник кратных основной и одна постоянная составляющая. Гистограмма, в окне спектра сигналов, строится в логарифмическом масштабе, шкала представлена в децибелах. Значения взята по стороне 110 кВ первой секции шин.

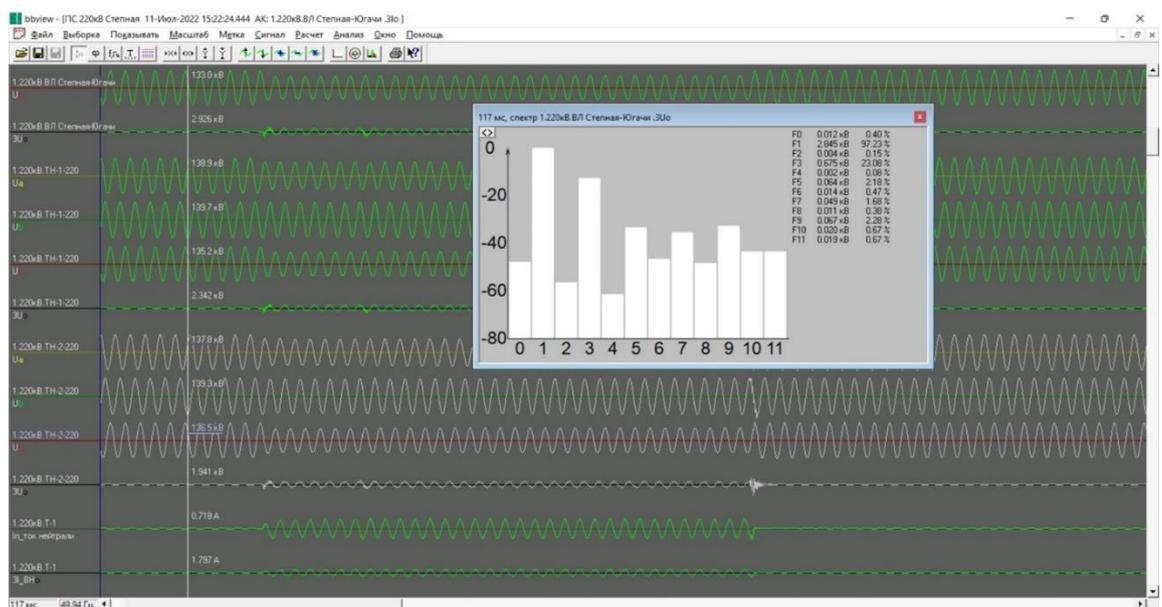


Рисунок 9 – Осциллограмма ПС 220 кВ Степная

На осциллограмме рисунка 9 представлены действующие значения гармонических составляющих. Выборка сигнала происходит объемом в 1 период основной частоты. Спектр сигналов, в виде гистограммы, отображает 12 гармонических составляющих. Из них 11 гармоник кратных основной и одна постоянная составляющая. Гистограмма, в окне спектра сигналов, строится в логарифмическом масштабе, шкала представлена в децибелах. Значения взята по стороне 110 кВ первой секции шин.

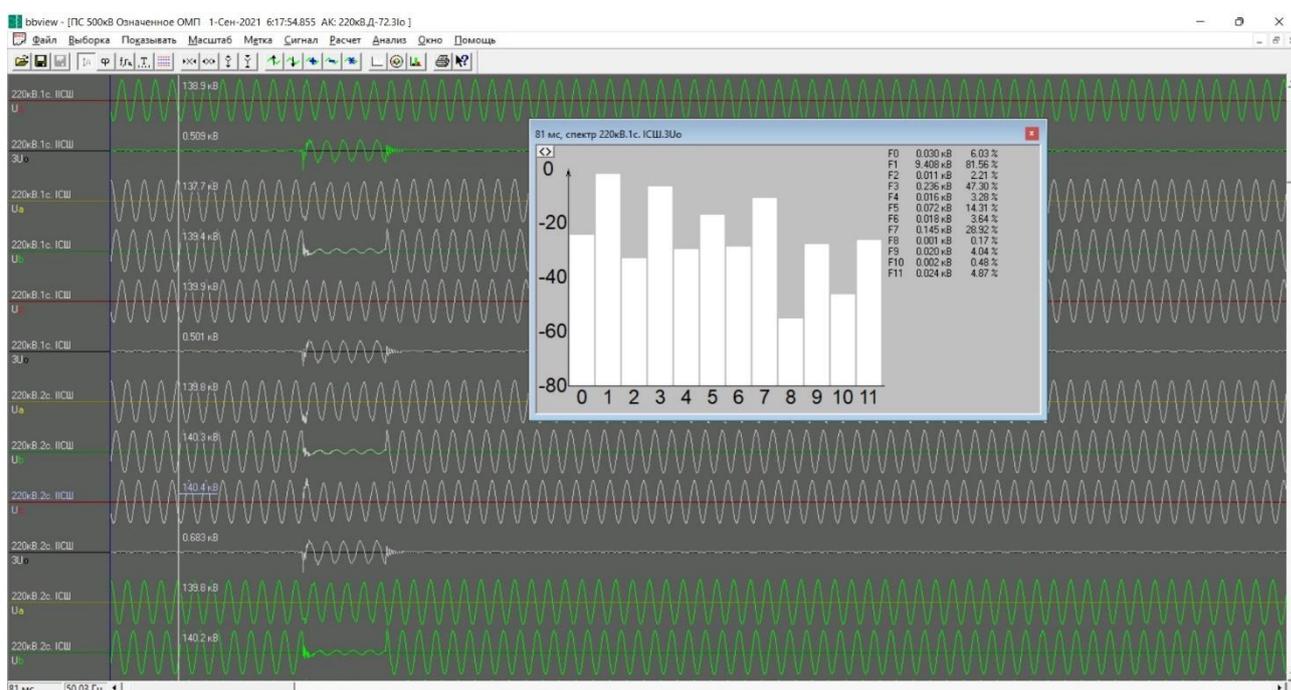


Рисунок 10 – Осциллограмма ПС 500 кВ Означенное

На осциллограмме рисунка 10 представлены действующие значения гармонических составляющих. Выборка сигнала происходит объемом в 1 период основной частоты. Спектр сигналов, в виде гистограммы, отображает 12 гармонических составляющих. Из них 11 гармоник кратных основной и одна постоянная составляющая. Гистограмма, в окне спектра сигналов, строится в логарифмическом масштабе, шкала представлена в децибелах. Значения взята по стороне 220 кВ второй секции II системы шин.

Все исходные данные для расчета коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  для нормального режима представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Значения гармонических составляющих напряжения для нормального режима работы

Номер гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ
ПС 220 кВ Туим	
F0	0
F1	0,078
F2	0,005
F3	0,253
F4	0,005
F5	0,03
F6	0,011
F7	0,037
F8	0,003
F9	0,011
F10	0,002
F11	0,054
ПС 220 кВ Степная	
F0	0,012
F1	2,845
F2	0,004
F3	0,675
F4	0,002
F5	0,064
F6	0,014
F7	0,049
F8	0,011
F9	0,067
F10	0,02
F11	0,019
ПС 500 кВ Означенное	
F0	0,03
F1	9,408
F2	0,011
F3	0,236
F4	0,016
F5	0,072
F6	0,018
F7	0,145
F8	0,001
F9	0,02
F10	0,002
F11	0,024

Коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$ , для нормального режима работы, рассчитанный по формуле (1) составляет:

- для ПС 220 кВ Туим 0,1 %;
- для ПС 220 кВ Степная 1,3%;
- для ПС 500 кВ Означенное 4,27%.

Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения будем рассчитывать для наиболее выраженных гармоник по формуле (2). Как видно из рисунков 11–14, наибольшему увеличению подвержены нечетные гармоники 1, 3, 5, 7, 9 и 11 порядка.

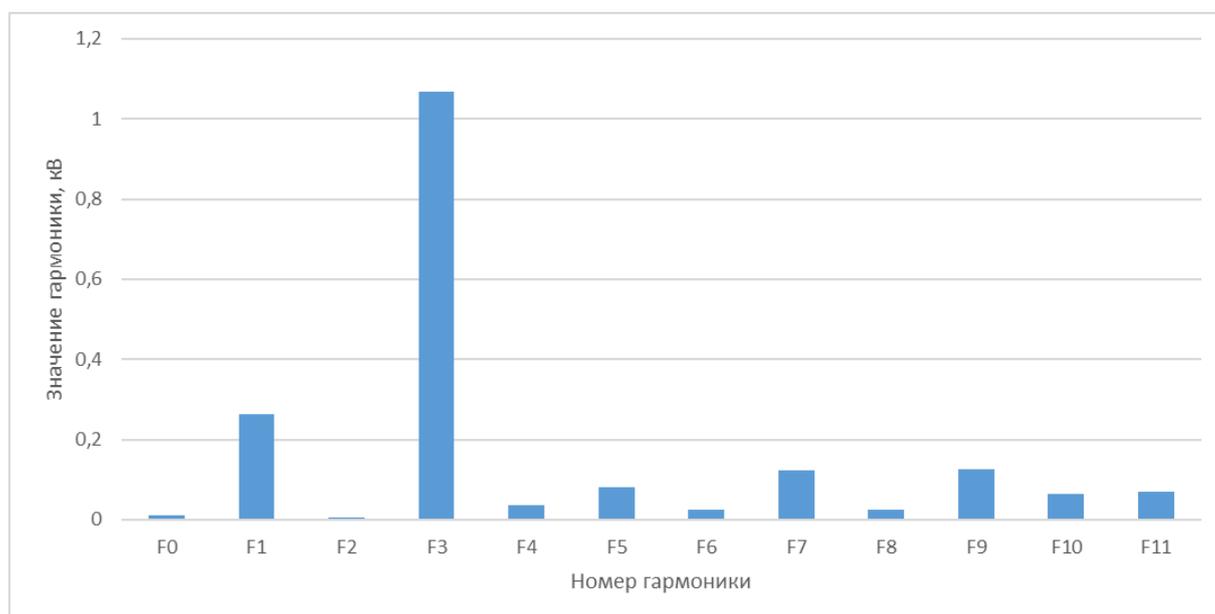


Рисунок 11 – Гармонические составляющие на ПС 220 кВ Означенная-районная

Из рисунка 11 видно, что наибольшему увеличению подвержены нечетные гармоники под номером 1, 3, 7, 9.

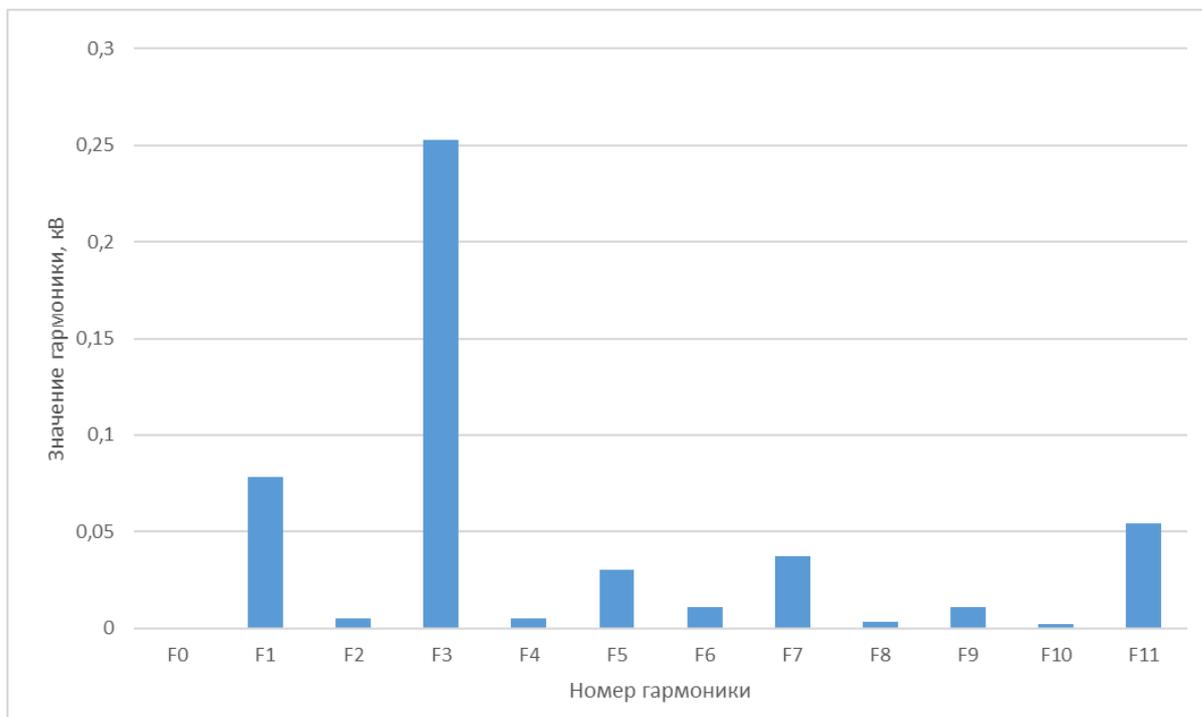


Рисунок 12 – Гармонические составляющие на ПС 220 кВ Туим

Из рисунка 12 видно, что наибольшему увеличению подвержены нечетные гармоники под номером 1, 3, 5, 7, 11.

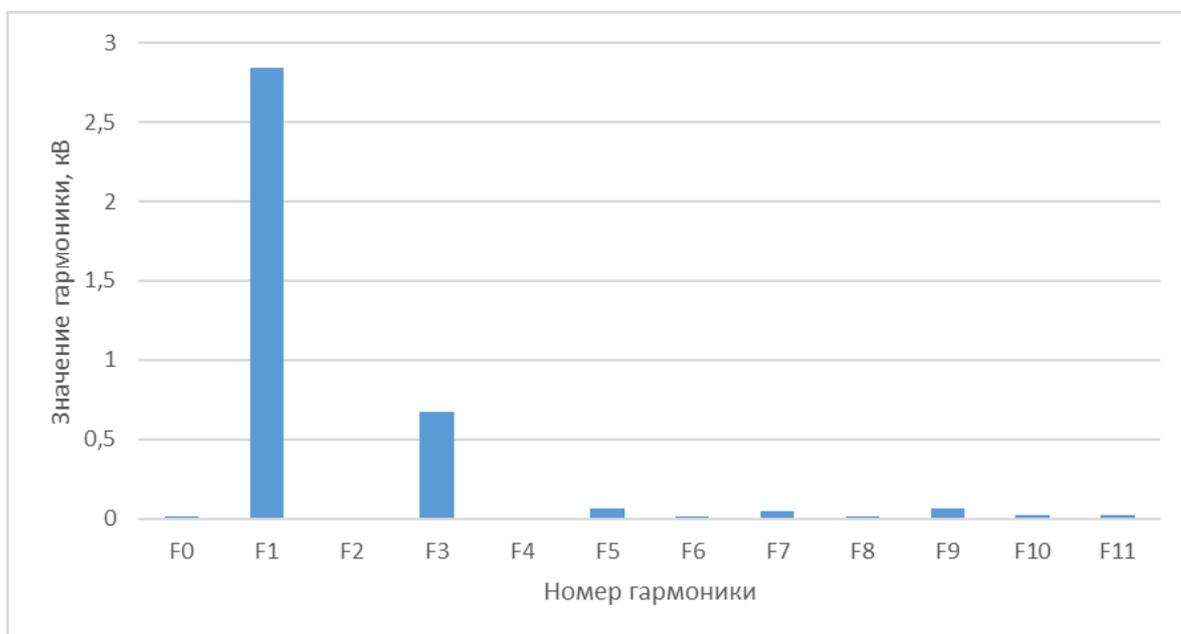


Рисунок 13 – Гармонические составляющие на ПС 220 кВ Степная

Из рисунка 13 видно, что наибольшему увеличению подвержены нечетные гармоники под номером 1, 3.

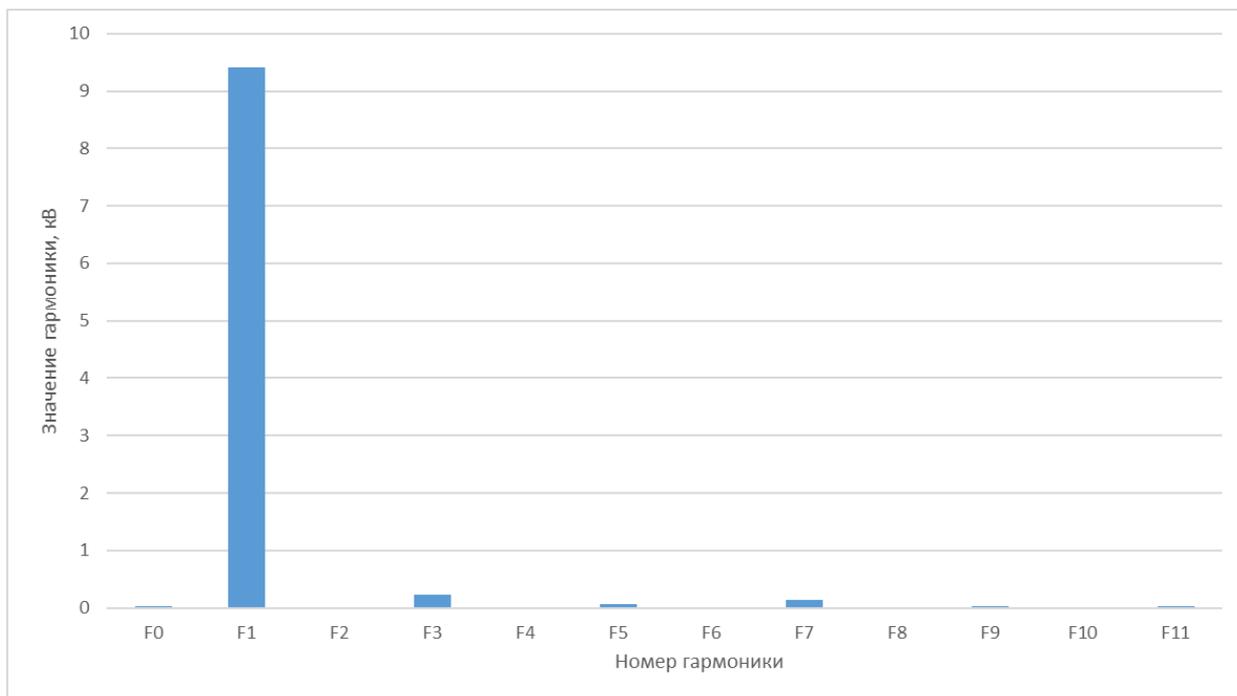


Рисунок 14 – Гармонические составляющие на ПС 500 кВ Означенное

Из рисунка 14 видно, что наибольшему увеличению подвержены нечетные гармоники под номером 1, 3, 7.

Коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения рассчитаем по формуле (2) для наиболее выраженных гармоник 1, 3, 5, 7, 9 и 11 порядка.

В таблице 8 представлены значения расчета коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения для ПС 220 кВ Означенное-районная, ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное.

Таблица 8 – Значения коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей для нормального режима работы

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ	Коэффициент $n$ -ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$ , %
ПС 220 кВ Означенное-районная		
F1	0,262	0,12
F3	1,068	0,49
F5	0,081	0,04
F7	0,123	0,06
F9	0,127	0,06
F11	0,069	0,03

Окончание таблицы 8

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ	Коэффициент n-ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$ , %
ПС 220 кВ Туим		
F1	0,078	0,04
F3	0,253	0,12
F5	0,03	0,01
F7	0,037	0,02
F9	0,011	0,01
F11	0,054	0,02
ПС 220 кВ Степная		
F1	2,845	1,29
F3	0,675	0,31
F5	0,064	0,03
F7	0,049	0,02
F9	0,067	0,03
F11	0,019	0,01
ПС 500 кВ Означенное		
F1	9,408	4,28
F3	0,236	0,11
F5	0,072	0,03
F7	0,145	0,07
F9	0,02	0,01
F11	0,024	0,01

### 2.5.2 Расчет несинусоидальности тока в нормальном режиме

Рассчитаем коэффициент несинусоидальности тока  $K_i$  фазы А для нормального режима работы на ПС 220 кВ Означенная-районная. Исходные данные представлены на рисунке 15.

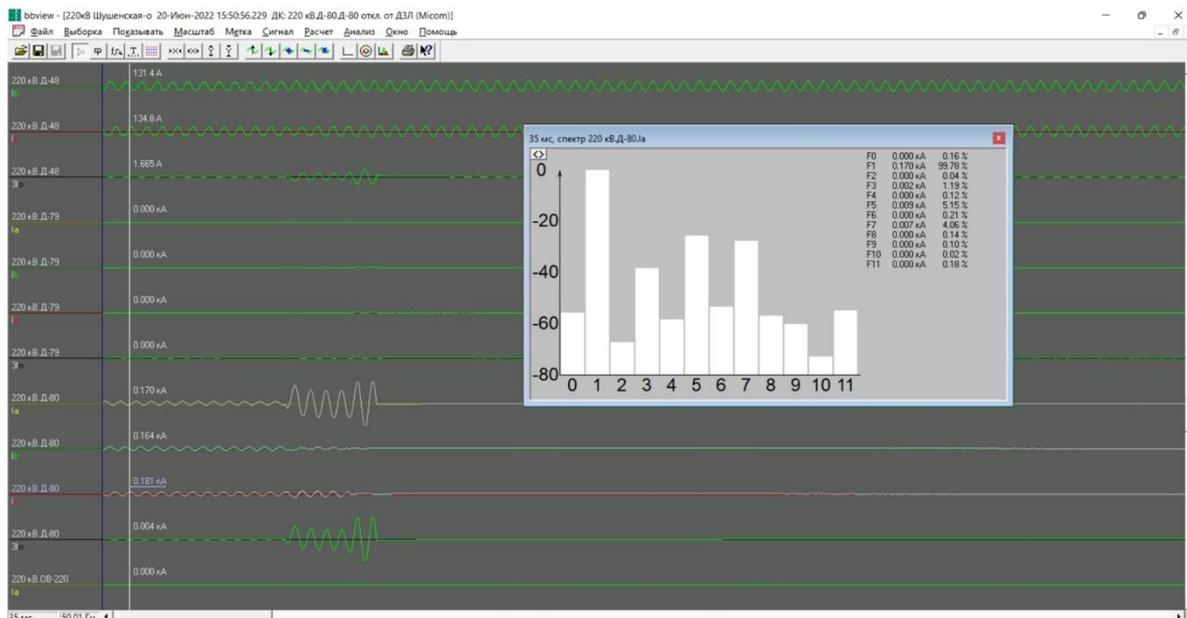


Рисунок 15 – Осциллограмма ПС 220 кВ Означенная-районная

На осциллограмме рисунка 15 представлены действующие значения гармонических составляющих. Выборка сигнала происходит объемом в 1 период основной частоты. Спектр сигналов, в виде гистограммы, отображает 12 гармонических составляющих. Из них 11 гармоник кратных основной и одна постоянная составляющая. Гистограмма, в окне спектра сигналов, строится в логарифмическом масштабе, шкала представлена в децибелах. Значения взята по стороне 220 кВ.

Коэффициент несинусоидальности тока  $K_i$  фазы А рассчитаем по формуле (3):

$$K_i = \sqrt{\frac{0,002^2 + 0,009^2 + 0,007^2}{0,17^2 + 0,002^2 + 0,009^2 + 0,007^2}} \cdot 100\% = 6,7\%.$$

Рассчитаем коэффициент несинусоидальности тока  $K_i$  фазы А для нормального режима работы на ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное. Исходные данные представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Значения гармонических составляющих тока для нормального режима работы

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кА
ПС 220 кВ Означенное-районная	
F0	0
F1	0,17
F2	0
F3	0,002
F4	0
F5	0,009
F6	0
F7	0,007
F8	0
F9	0
F10	0
F11	0
ПС 220 кВ Туим	
F0	0,063
F1	56,09
F2	0,131
F3	0,313
F4	0,049
F5	0,115
F6	0,044
F7	0,208
F8	0,019
F9	0,133
F10	0,012
F11	0,0629
ПС 220 кВ Степная	
F0	0
F1	0,129
F2	0
F3	0,003
F4	0
F5	0,002
F6	0
F7	0
F8	0
F9	0
F10	0
F11	0,002
ПС 500 кВ Означенное	
F0	0,001
F1	0,58
F2	0

Окончание таблицы 9

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кА
ПС 500 кВ Означенное	
F3	0,001
F4	0
F5	0,005
F6	0
F7	0,003
F8	0
F9	0,001
F10	0
F11	0,018

Коэффициент несинусоидальности тока  $K_i$  фазы А, для нормального режима работы, рассчитанный по формуле (3) составляет:

- для ПС 220 кВ Туим 0,8 %;
- для ПС 220 кВ Степная 3,2%;
- для ПС 500 кВ Означенное 3,3%.

### 2.5.3 Расчет несинусоидальности напряжения в аварийном режиме

Рассчитаем коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  по формуле (1) и коэффициента n-ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  по формуле (2) для аварийного режима работы. Коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  будем рассчитывать для наиболее выраженных гармоник 1, 3, 5, 7, 9 и 11 порядка.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Значения гармонических составляющих напряжения для аварийного режима работы

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ
ПС 220 кВ Означенное-районная	
F0	1,015
F1	26,53
F2	0,249
F3	1,751
F4	0,286
F5	0,623

## Окончание таблицы 10

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ
ПС 220 кВ Означенное-районная	
F6	0,18
F7	0,101
F8	0,015
F9	0,159
F10	0,075
F11	0,114
ПС 220 кВ Туим	
F0	0,079
F1	15,25
F2	0,033
F3	0,253
F4	0,033
F5	0,175
F6	0,002
F7	0,061
F8	0,012
F9	0,076
F10	0,007
F11	0,365
ПС 220 кВ Степная	
F0	0,039
F1	23,56
F2	0,106
F3	0,425
F4	0,049
F5	1,027
F6	0,055
F7	0,095
F8	0,125
F9	1,103
F10	0,1
F11	0,115
ПС 500 кВ Означенное	
F0	2,514
F1	71,4
F2	0,344
F3	4,312
F4	1,187
F5	2,049
F6	2,384
F7	3,637
F8	1,281
F9	0,777
F10	0,438
F11	0,49

Коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$ , для аварийного режима работы, рассчитанный по формуле (1) составляет:

- для ПС 220 Означенное-районная 12,1 %;
- для ПС 220 кВ Туим 6,9 %;
- для ПС 220 кВ Степная 10,7%;
- для ПС 500 кВ Означенное 32,6%.

В таблице 11 представлены значения расчета коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения для ПС 220 кВ Означенное-районная, ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное.

Таблица 11 – Значения коэффициента n-ой гармонической составляющей для аварийного режима работы

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ	Коэффициент n-ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$ , %
ПС 220 кВ Означенное-районная		
F1	26,53	12,06
F3	1,751	0,80
F5	0,623	0,28
F7	0,101	0,05
F9	0,159	0,07
F11	0,114	0,05
ПС 220 кВ Туим		
F1	15,25	6,93
F3	0,253	0,12
F5	0,175	0,08
F7	0,061	0,03
F9	0,076	0,03
F11	0,365	0,17
ПС 220 кВ Степная		
F1	23,56	10,71
F3	0,425	0,19
F5	1,027	0,47
F7	0,095	0,04
F9	1,103	0,50
F11	0,115	0,05
ПС 500 кВ Означенное		
F1	71,4	32,45

Окончание таблицы 11

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ	Коэффициент n-ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$ , %
ПС 500 кВ Означенное		
F3	4,312	1,96
F5	2,049	0,93
F7	3,637	1,65
F9	0,777	0,35
F11	0,49	0,22

### 2.5.4 Расчет несинусоидальности напряжения в послеаварийном режиме

Рассчитаем коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  по формуле (1) и коэффициента n-ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  по формуле (2) для послеаварийного режима работы. Коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)}$  будем рассчитывать для наиболее выраженных гармоник 1, 3, 5, 7, 9 и 11 порядка.

Исходные данные для расчета по ПС 220 кВ Означенное-районная, ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Значения гармонических составляющих напряжения для послеаварийного режима работы

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ
ПС 220 кВ Означенное-районная	
F0	0,072
F1	0,363
F2	0,314
F3	1,058
F4	0,065
F5	0,094
F6	0,024
F7	0,228
F8	0,159
F9	0,157
F10	0,109

Окончание таблицы 12

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ
ПС 220 кВ Означенное-районная	
F11	0,11
ПС 220 кВ Туим	
F0	0,002
F1	0,098
F2	0,012
F3	0,272
F4	0,004
F5	0,041
F6	0,004
F7	0,043
F8	0,003
F9	0,016
F10	0,002
F11	0,049
ПС 220 кВ Степная	
F0	0,299
F1	2,99
F2	0,034
F3	0,826
F4	0,005
F5	0,071
F6	0,04
F7	0,05
F8	0,052
F9	0,055
F10	0,067
F11	0,079
ПС 500 кВ Означенное	
F0	0,041
F1	9,584
F2	0,065
F3	0,41
F4	0,034
F5	0,08
F6	0,087
F7	0,156
F8	0,025
F9	0,039
F10	0,013
F11	0,063

Коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$ , для послеаварийного режима работы, рассчитанный по формуле (1) составляет:

- для ПС 220 Означенное-районная 0,6 %;
- для ПС 220 кВ Туим 0,2 %;
- для ПС 220 кВ Степная 1,4%;
- для ПС 500 кВ Означенное 4,4%.

В таблице 13 представлены значения расчета коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения для ПС 220 кВ Означенное-районная, ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное.

Таблица 13 – Значения коэффициента n-ой гармонической составляющей для послеаварийного режима работы

№ гармонической составляющей	Значение гармонической составляющей, кВ	Коэффициент n-ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$ , %
ПС 220 кВ Означенное-районная		
F1	0,363	0,17
F3	1,058	0,48
F5	0,094	0,04
F7	0,228	0,10
F9	0,157	0,07
F11	0,11	0,05
ПС 220 кВ Туим		
F1	0,098	0,04
F3	0,272	0,12
F5	0,041	0,02
F7	0,043	0,02
F9	0,016	0,01
F11	0,049	0,02
ПС 220 кВ Степная		
F1	2,99	1,36
F3	0,826	0,38
F5	0,071	0,03
F7	0,05	0,02
F9	0,055	0,03
F11	0,079	0,04
ПС 500 кВ Означенное		
F1	9,584	4,36
F3	0,41	0,19
F5	0,08	0,04
F7	0,156	0,07
F9	0,039	0,02
F11	0,063	0,03

### 3 Практическая часть

#### 3.1 Анализ выполненных расчетов несинусоидальности тока и напряжения

В работе была проанализирована несинусоидальность токов и напряжений на ПС 220 кВ Означенное-районная, ПС 220 кВ Туим, ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы. Для большей наглядности результаты расчетов в виде графиков представлены на рисунках 15–20.

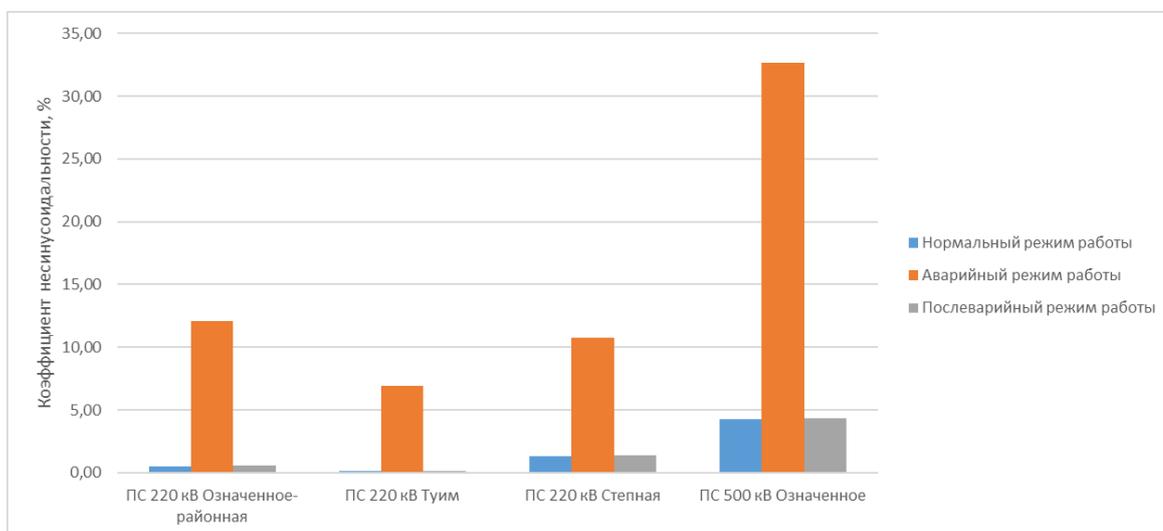


Рисунок 15 – График коэффициентов несинусоидальности напряжения  $K_U$ , для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы

Из результатов расчета, представленных на рисунке 15, можно сделать выводы что для ПС 220 кВ Означенное-районная и ПС 220 кВ Туим коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$ , для нормального режима работы, находится в допустимых пределах. Для ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$ , для нормального режима работы, находится в допустимых пределах, но приближен к верхней границе.

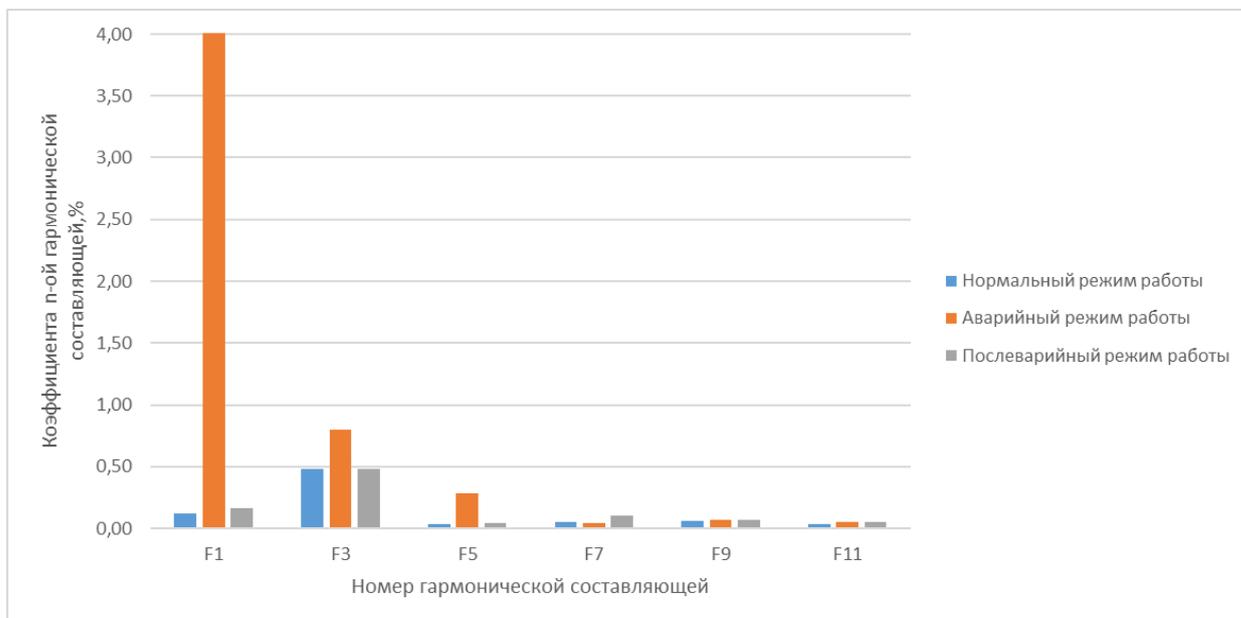


Рисунок 16 – График коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы ПС 220 кВ  
Означенное – районная

Из результатов расчета, представленных на рисунках 16, можно сделать выводы что для ПС 220 кВ Означенное-районная, питающая в основном бытовую нагрузку с постоянной вольтамперной характеристикой, коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального режима работы находится в допустимых пределах. В аварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возрастает примерно в 20–50 раз и выходит за пределы допустимых значений. В послеаварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возвращается к своим допустимым значениям.

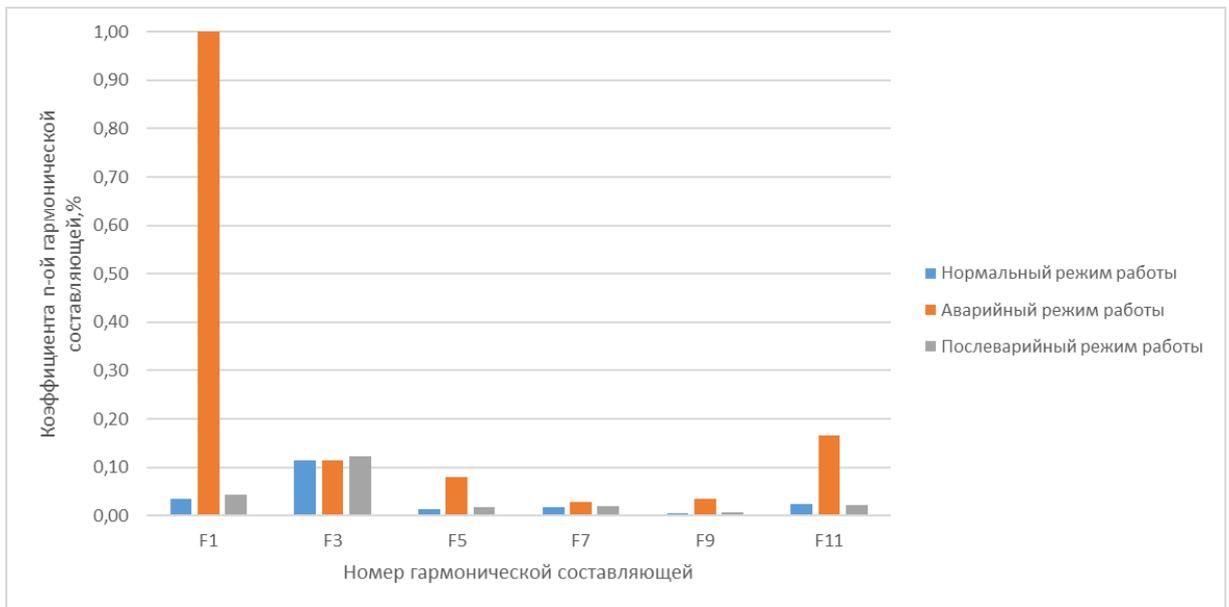


Рисунок 17 – График коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы ПС 220 кВ Туим

Из результатов расчета, представленных на рисунках 17, можно сделать выводы что для ПС 220 кВ Туим, питающая в основном бытовую нагрузку с постоянной вольтамперной характеристикой, коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального режима работы находится в допустимых пределах. В аварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возрастает примерно в 20–50 раз и выходит за пределы допустимых значений. В послеаварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возвращается к своим допустимым значениям.

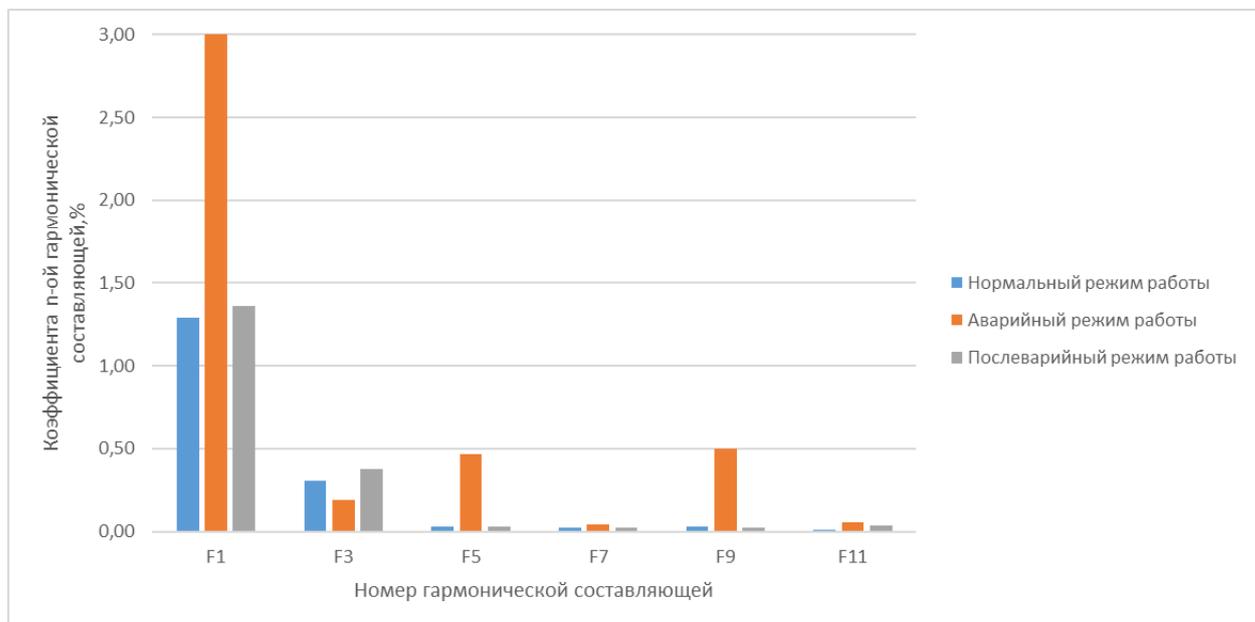


Рисунок 18 – График коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы ПС 220 кВ  
Степная

Из результатов расчета, представленных на рисунках 18, можно сделать выводы что для ПС 220 кВ Степная, являющейся подстанцией тягового железнодорожного транзита, где возможна несимметрия напряжения, коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального режима работы находится в допустимых пределах, но приближен к верхней границе допустимого предела. В аварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возрастает примерно в 20–50 раз и выходит за пределы допустимых значений. В послеаварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возвращается к своим допустимым значениям.

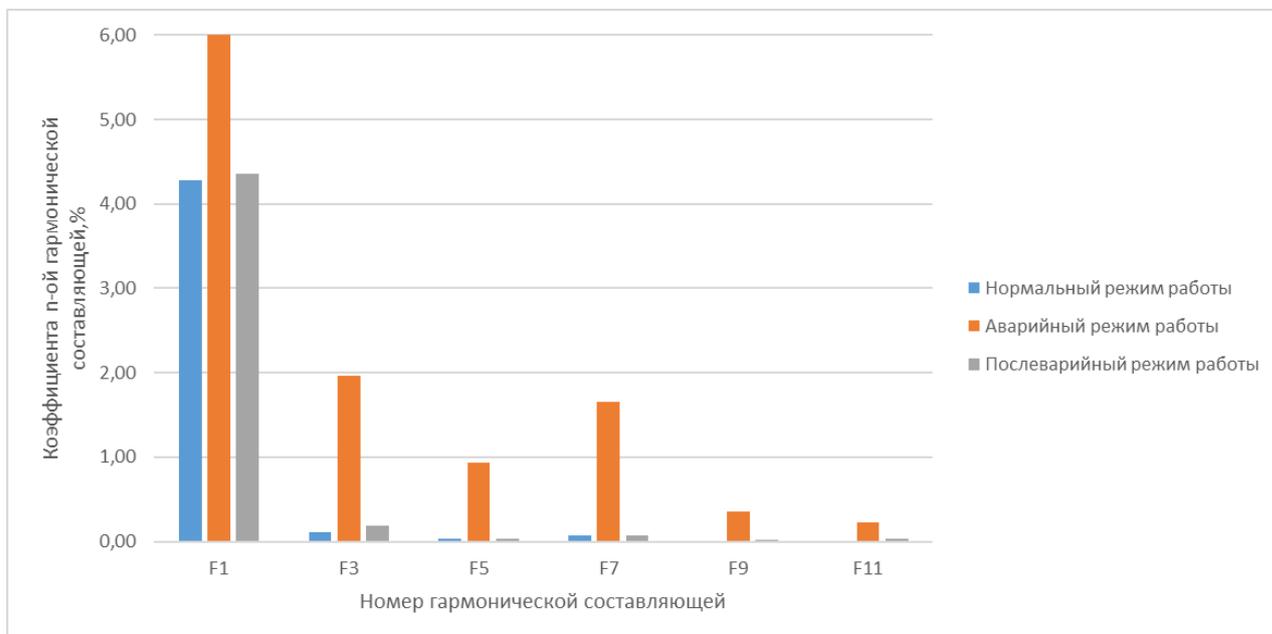


Рисунок 19 – График коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы ПС 500 кВ  
Означенное

Из результатов расчета, представленных на рисунках 19, можно сделать выводы что для ПС 500 кВ Означенное, от которой запитан ОАО «Саяногорский алюминиевый завод» имеющий нелинейную вольтамперную характеристику по своей технологии производства, коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального режима работы находится в допустимых пределах, но приближен к верхней границе допустимого предела. В аварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возрастает примерно в 20–50 раз и выходит за пределы допустимых значений. В послеаварийном режиме коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возвращается к своим допустимым значениям.

### 3.2 Выводы по работе

Исходя из проделанного анализа несинусоидальности токов и напряжений можно сделать выводы что для ПС 220 кВ Означенное-районная и ПС 220 кВ Туим, питающих в основном бытовую нагрузку с постоянной вольтамперной характеристикой, коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  и

коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального режима работы находится в допустимых пределах. Для ПС 220 кВ Степная и ПС 500 кВ Означенное коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  для нормального режима работы находится в допустимых пределах, но приближен к верхней границе. Данные расчеты подтверждают, что коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  и коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  зависят от вида нагрузки подстанции, так как ПС 220 кВ Степная является подстанцией тягового железнодорожного транзита, где возможна несимметрия напряжения, а от ПС 500 кВ Означенное запитан ОАО «Саяногорский алюминиевый завод» имеющий нелинейную вольтамперную характеристику по своей технологии производства.

В аварийном режиме коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  и коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возрастают примерно в 20–50 раз и выходят за пределы допустимых значений, но не установившийся аварийный режим длится приблизительно от 0,1 до 0,5 секунды. Такое время слишком мало для серьезных последствий у потребителей электрической энергии.

В послеаварийном режиме коэффициент несинусоидальности напряжения  $K_U$  и коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  возвращаются к своим допустимым значениям, но все же незначительный период времени имеет повышенное значение относительно нормального режима работы.

Коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$ , рассчитанный для гармоник нечетного порядка, имеет наибольшее значение для гармоник под номером 1 и 3. С увеличением порядкового номера гармоники коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  уменьшается.

Проведенный анализ несинусоидальности не выявил отклонений от допустимых пределов, значит показатели качества энергосистемы соответствуют установленным нормативам. Однако вид нагрузки на подстанциях влияет на коэффициенты несинусоидальности.

Но согласно Распоряжение Правительства РФ от 30 сентября 2018 г. № 2101-р [31] в границах энергосистемы Республики Хакасия для обеспечения надежности электроснабжения потребителей на юге Кузбасской энергосистемы планируется строительство второй цепи тягового транзита от ПС 220 кВ Междуреченская до ПС 220 кВ Степная, срок выполнения до 2024 года. На сегодняшний день выполнены следующие работы:

- заход ВЛ 220 кВ Означенное – Бея I цепь (Д-59) на ПС 220 кВ Степная с образованием новой ВЛ 220 кВ Означенное – Степная I цепь с отпайкой на ПС Бея;
- заход ВЛ 220 кВ Означенное – Бея II цепь (Д-60) на ПС 220 кВ Степная с образованием новой ВЛ 220 кВ Означенное – Степная II цепь с отпайкой на ПС Бея;
- заход ВЛ 220 кВ Камышта – Аскиз (Д-52) на ПС 220 кВ Степная с образованием новой ВЛ 220 кВ Степная – Камышта;
- строительство второй цепи тягового транзита 220 кВ от ПС 220 кВ Междуреченская до вновь сооружаемой ПС 220 кВ Степная.

В дальнейшем планируется:

- строительство ПС 220 кВ Нанчхул;
- реконструкция ВЛ 220 кВ Степная – Бискамжа со строительством двух ВЛ 220 кВ до ПС 220 кВ Нанчхул с образованием ВЛ 220 кВ Бискамжа – Нанчхул и ВЛ 220 кВ Степная – Нанчхул.

В настоящий момент анализ несинусоидальности не выявил отклонений от допустимых пределов, но запланированная реконструкция тягового железнодорожного транзита, в границах энергосистемы Республики Хакасия, может привести к увеличению коэффициент несинусоидальности напряжения и коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы по теме «Анализ влияние несинусоидальности токов и напряжений на надежность энергосистемы Республики Хакасия» были изучены показатели качества электроэнергии. Особое внимание было отведено одному из показателей – несинусоидальность напряжения. В работе были определены требования, согласно нормативным документам, предъявляемые к показателям качества электроэнергии. Было определено, что в результате превышения коэффициента несинусоидальности напряжения, относительно его нормативного значения, возникают неблагоприятные последствия для электроэнергетического оборудования и для работы энергосистемы в целом.

В результате выполнения работы были обработаны статистические данные, зафиксированные с помощью программно технического комплекса «Черный ящик» на четырех подстанциях энергосистемы Республики Хакасия. Обработка данных осуществлялась с помощью программного компонента для учета и контроля качества электроэнергии (BVVIEW). Программа позволяет производить наблюдения за текущим режимом работы, а также анализировать осциллограммы аварийных событий и переходных процессов. Обработка данных заключалась в расчете коэффициентов несинусоидальности напряжения  $K_U$  и коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей  $K_{U(n)}$  для нормального, аварийного и послеаварийного режима работы на соответствие ГОСТов.

По полученным результатам обработанных статистических данных были построены графики изменения коэффициентов несинусоидальности напряжения. Сделаны выводы, что коэффициенты несинусоидальности в энергосистеме Республики Хакасия не имеют значительных отклонений от допустимых пределов, а на коэффициент несинусоидальности влияет вид нагрузки на подстанции. В аварийном режиме коэффициенты несинусоидальности возрастают и выходят за пределы допустимых значений, но время не установившего аварийного режима слишком мало для серьезных последствий у потребителей электрической энергии.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГОСТ – государственный стандарт.

ПТЭЭ – правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии.

БСК – батареи статических конденсаторов.

ФКУ – фильтрокомпенсирующие устройства.

ЕЭС – единая энергетическая система.

АО «СО ЕЭС» – Акционерное Общество «Системный оператор Единой энергетической системы».

ОДУ – объединенное диспетчерское управление.

РДУ – региональное диспетчерское управление.

ЛЭП – линии электропередач.

ПС – подстанция.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романов, В. В. Электроснабжение : учебное пособие / В. В. Романов; Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2006. – 54 с.
2. Волгин, М. Е. Электроэнергетика : учебное пособие для студентов электротехнических специальностей / М. Е. Волгин ; Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова, 2008. – 81 с. – ISBN 9965-583-49-8.
3. Аббакумов, А. А. Разработка методики и алгоритмов идентификации отклонений от нормативов параметров качества электроэнергии в системах электроснабжения : специальность 05.13.18 "Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аббакумов Андрей Александрович ; Мордовский государственный университет им. И.П Огарева. – Саранск, 2005. – 180 с.
4. Цицикян, Г. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / Г. Н. Цицикян ; Северо-Западный государственный заочный технический университет. – Санкт-Петербург : СЗТУ, 2006. – 59 с.
5. Усачев, А. Е. Электромагнитная совместимость : учебное пособие / А. Е. Усачев ; Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 44 с.
6. Кужекин И. П. Основы электромагнитной совместимости современного энергетического оборудования : учебное пособие для вузов / И. П. Кужекин ; Московский энергетический институт. – Москва : МЭИ, 2008. – 144 с.
7. Волков, Н. Г. Надежность электроснабжения : учебное пособие / Н. Г. Волков, А. А. Сивков, А. С. Сайгаш ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск : ТПУ, 2011. – 160 с.

8. Российская Федерация. Приказы. Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии : Приказ Министерства энергетики № 811 : [утвержден приказом Минэнерго России от 12 августа 2022 года]. – Москва : Минюст России : Приказ, 2022. – 32 с. – ISBN 979-5-303080-04-0.

9. Иванов, С. Н. Надежность электроснабжения : учебное пособие / С. Н. Иванов, А. А. Скрипилев.– Москва: Инфра-Инженерия, 2022. – 164 с. – ISBN 978-5-9729-0959-9.

10. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения – Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 01.07.2014. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 16 с.

11. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии – Взамен ГОСТ Р 51317.4.30-2008; введ. 01.01.2014. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 51 с.

12. Ополева, Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учебное пособие / Г. Н. Ополева.– Москва: ФОРУМ : ИНФРА-М, 2021. – 416 с. – ISBN 978-5-8199-0769-6.

13. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. и доп., с изм. – Екатеринбург: Модуль, 2013. – 672 с.

14. Васильева, Т. Н. Определение несинусоидальности тока при работе распределительной электрической сети / Т. Н. Васильева, Л. В. Аронов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2014. – № 6 (65). – С. 148-151. – URL: <https://moluch.ru/archive/65/10726/> (дата обращения: 30.07.2022).

15. Дейс, Д. А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / Д. А. Дейс ; Читинский государственный университет. – Чита: ЧитГУ, 2008. – 171 с.

16. Нейман В. Ю. Теоретические основы электротехники в примерах и задачах. Часть 4. Линейные электрические цепи несинусоидального тока :

учебное пособие / В. Ю. Нейман ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 182 с. – ISBN 978-5-7782-1821-5.

17. Вахнина В. В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий : учебное пособие / В. В. Вахнина ; Тольяттинский государственный университет. – Тольятти: ТГУ, 2006. – 69 с.

18. Коваленко, Д. В. Неисправности батарей статических конденсаторов, возникающих при наличии высших гармоник в системах электроснабжения / Д. В. Коваленко. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 19 (123). – С. 69-72. – URL: <https://moluch.ru/archive/123/34022/> (дата обращения: 02.08.2022).

19. Кабышев, А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий : учебное пособие / А. В. Кабышев ; Томский политехнический университет. – Томск: ТПУ, 2012. – 234 с.

20. Рогозина, Д. А. Специальные фильтрокомпенсирующие устройства как метод борьбы с несинусоидальностью напряжения / Д. А. Рогозина, Т. С. Хворова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 24 (128). – С. 108-111. – URL: <https://moluch.ru/archive/128/35506/> (дата обращения: 02.08.2022).

21. Шульга, К. С. Сравнение основных типов компенсирующих устройств / К. С. Шульга, Ю. О. Астапова, А. Е. Астапов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 12 (116). – С. 449-453. – URL: <https://moluch.ru/archive/116/31791/> (дата обращения: 05.08.2022).

22. Коваленко, Д. В. Применение пассивных фильтров для компенсации высших гармоник тока в системах электроснабжения промышленных предприятий / Д. В. Коваленко. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 19 (123). – С. 72-76. – URL: <https://moluch.ru/archive/123/34071/> (дата обращения: 05.08.2022).

23. Руди, Д. Ю. Анализ использования активных фильтров гармоник в электроэнергетических системах / Д. Ю. Руди, С. В. Горелов, А. А. Руппель. –

Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 15 (305). – С. 124-128.  
– URL: <https://moluch.ru/archive/305/68648/> (дата обращения: 10.08.2022).

24. Байниязов, Б. А. Снижение потерь электроэнергии за счет регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности / Б. А. Байниязов, Г. З. Гауанов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2021. – № 23 (365). – С. 9-12. – URL: <https://moluch.ru/archive/365/82075/> (дата обращения: 11.08.2022).

25. Системный оператор Единой энергетической системы : официальный сайт. – Москва, 2005–. – URL : <https://www.so-ups.ru> (дата обращения: 15.08.2022).

26. Просветов, Г. И. Математические методы: задачи и решения : учебно-практическое пособие / Г. И. Просветов ; - Москва : Альфа-Пресс, 2008. –304 с.

27. Microsoft Office : официальный сайт. – Москва, 2022–. – URL : <https://www.microsoft.com/ru-ru/> (дата обращения 29.08.2022).

28. Производственное объединение ГОСАН : официальный сайт. – Москва, 2022–. – URL : <https://gosan.ru/> (дата обращения 05.09.2022).

29. Программно-технический комплекс «Черный ящик», базовое программное обеспечение : руководство пользователя. – Москва: ООО НТЦ «ГОСАН», 2017. –93 с.

30. Долгополов, И. Н. Ряды Фурье : учебное пособие / И. Н. Долгополов, И. Н. Родионова, Э. Н. Рыкова ; Самарский государственный университет. – Самара : СГУ, 2011. –91 с.

31. Распоряжение Правительства РФ от 30.09.2018 № 2101-р «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71975292/> (дата обращения: 10.09.2022).

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
институт

Электроэнергетики  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 В.И. Пантелеев  
подпись      инициалы, фамилия  
« 13 »      12      2022г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Анализ влияния несинусоидальности токов и напряжений на надежность  
энергосистемы Республики Хакасия

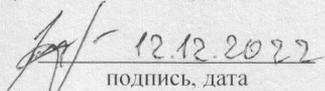
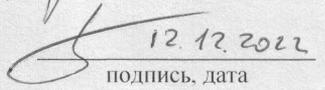
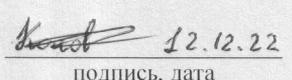
наименование темы

13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель	 12.12.2022 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.э.н. должность, ученая степень	<u>Н. В. Дулесова</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 12.12.2022 подпись, дата		<u>И. Н. Затынайченко</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 12.12.2022 подпись, дата	начальник СЭР должность, ученая степень	<u>И. П. Борисов</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 12.12.22 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.т.н. должность, ученая степень	<u>А. В. Коловский</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2022