

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Уральский энергетический институт

Кафедра «Электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой «Электротехника»

_____ В.Э. Фризен
(подпись) (Ф.И.О.)

« _____ » _____ 2024 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ
ОПТИМИЗИРОВАННОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Научный руководитель: П.В. Матренин

канд. техн. наук

Нормоконтролер: А.И. Хальясмаа

доц., канд. техн. наук

Студент группы ЭНМ-221201 А.С. Ефимов

Екатеринбург
2024

6. Выпускная квалификационная работа закончена «__» _____ 2024 г. считаю возможным допустить _____ к защите выпускной квалификационной работы закончена в Государственной экзаменационной комиссии.

Руководитель _____
(подпись)

П.В. Матренин
Ф.И.О.

7. Допустить Ефимова Александра Сергеевича к защите магистерской диссертации в Государственной экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры №__ от «__» _____ 2024г.).

Зав. кафедрой _____
(подпись)

В.Э. Фризен
Ф.И.О.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 78 с., 22 рис., 1 табл., 40 источников, 1 прил.

**ЦИФРОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ, ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ,
ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ, МОНИТОРИНГ
ОБОРУДОВАНИЯ, АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ.**

Целью настоящей работы является разработка алгоритмов анализа временных рядов, получаемых в составе цифровых потоков шины процесса цифровой подстанции.

В работе рассматриваются вопросы повышения наблюдаемости оборудования цифровой подстанции и определения неисправностей посредством методов неразрушающего контроля.

В ходе работы созданы модели для симуляции характерных неисправностей. На основании полученных данных, выбраны и сформированы наиболее информативные параметры, которые служат исходными данными для разработанных алгоритмов.

Разработанные алгоритмы анализа параметров работы протестированы на данных, полученных в ходе моделирования.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	4
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	7
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ	8
ВВЕДЕНИЕ.....	10
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭО ЦПС	14
1.1 Краткий обзор ЦПС	14
1.2 Существующие методы мониторинга и анализа параметров работы оборудования.....	20
1.3 Применение существующих методов мониторинга и анализа параметров работы электрооборудования в цифровой подстанции .	26
1.4 Выводы.....	28
2 ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ.....	29
2.1 Применяемые методы анализа временных рядов.....	29
2.2 Основные положения вейвлет-преобразования.....	33
2.3 Выбор типа ВП для анализа временных рядов с шины процесса ЦПС	37
2.4 Выводы.....	45
3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	46
3.1 Определение группы оборудования подстанции и условий для разработки алгоритма.....	46
3.2 Разработка алгоритма определения межвитковых замыканий	48

3.2.1 Создание математической модели для симуляции МКЗ	48
3.2.2 Получение и обработка результатов эмуляции	49
3.2.3 Составление алгоритма определения МКЗ	54
3.3 Разработка алгоритма определения внутренних неисправностей трансформатора.....	57
3.3.1 Создание математической модели	57
3.3.2 Получение и обработка результатов моделирования	58
3.3.3 Составление алгоритма получения и передачи сигнала для анализа внутренних неисправностей трансформатора	66
3.4 Выводы.....	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	71
Приложение А.	78
ЦПС I, II и III архитектуры	78

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей работе применяют следующие термины с соответствующими определениями.

- Базис** – совокупность функций или векторов, которые используются для представления сигнала в виде линейной комбинации этих функций или векторов; если базис является ортонормированным, то все функции или векторы этого базиса ортогональны друг другу и имеют единичную норму
- Вейвлет-преобразование** – математическое преобразование, которое разлагает сигнал на компоненты с разными частотами и временными разрешениями, используя набор функций, называемых вейвлетами; вейвлеты являются колебательными функциями, которые локализованы как во времени, так и в частоте, что позволяет эффективно анализировать сигналы с временными изменениями их частотных характеристик
- Кратномасштабный анализ** – метод анализа сигналов, который позволяет рассматривать данные на разных уровнях разрешения
- Цифровая подстанция** – современная электрическая подстанция, которая использует цифровые технологии для управления, мониторинга и защиты электрической инфраструктуры согласно стандарту МЭК-61850

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ

В настоящем ВКР применяют следующие сокращения и обозначения.

АСУ ТП	–	Автоматизированная система управления технологическим процессом
БВП	–	Быстрое вейвлет-преобразование
ВН	–	Высшее напряжение
ВП	–	Вейвлет-преобразование
ИЭУ	–	Интеллектуальное электронное устройство
КМА	–	Кратномасштабный анализ
КП	–	Контроллер присоединения
ЛВС	–	Локальная вычислительная сеть
МКЗ	–	Межвитковое замыкание
МЭК	–	Международная электротехническая комиссия
НН	–	Низшее напряжение
ОПФ	–	Оконное преобразование Фурье
ПАС	–	Преобразователь аналоговых сигналов
ПДС	–	Преобразователь дискретных сигналов
РЗиА	–	Релейная защита и автоматика
ТН	–	Трансформатор напряжения
ТТ	–	Трансформатор тока
ФСК ЕЭС	–	Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы
ЦПС	–	Цифровая подстанция

ЦТН	–	Цифровой трансформатор напряжения
ЦТТ	–	Цифровой трансформатор тока
GOOSE	–	Generic Object-Oriented Substation Event
MMS	–	Manufacturing Message Specification
SV	–	SampledValues

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. На сегодняшний день тренды в развитии электроэнергетики [1] можно свести к следующим:

- декарбонизация,
- децентрализация,
- цифровизация.

Энергетический сектор одним из первых начал внедрять цифровые технологии. Начиная с 1970-х годов энергокомпании используют их для оптимизации режимов работы и эксплуатации объектов энергетики [2].

На сегодняшний день, данная тенденция сохраняется. Количество подключённых интеллектуальных счётчиков электроэнергии в 2022 году превысило 1 миллиард, что в десять раз больше, чем в 2010 году [3].

Применение цифровых технологий может дать ощутимые результаты, даже в краткосрочной перспективе. Например, в системах электроснабжения внедрение алгоритмов машинного обучения, использование интеллектуальных счётчиков и других цифровых технологий могут помочь в интеграции более весомой доли возобновляемых источников энергии, лучше согласовывать спрос и предложение со стороны все более разнородных децентрализованных потребителей.

В области производства и распределения электрической энергии, применение передовых технологий позволит повысить показатели надёжности, наблюдаемости и устойчивости энергосистем, а также даст возможность для использования методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

В секторах конечного потребления цифровые технологии могут повысить эффективность зданий и транспорта, а также обеспечить переход к вариантам, обеспечивающим меньший выброс парниковых газов [3].

В Российской Федерации приоритет цифровизации всех сфер деятельности, в том числе и электроэнергетики, закреплён на законодательном уровне [4,5].

Согласно концепции «Цифровая трансформация-2030», принятой ПАО «Россети», цифровизация осуществляется постепенно, сохраняя стабильность работы энергосистемы и минимизацию затрат на адаптацию существующих систем [6]. Динамика цифровизации каналов связи электросетевых объектов в направлении Диспетчерского центра АО «СО ЕЭС» по сравнению с 2020 годом показала существенный рост с 92,8% до 96,4% [7].

Одним из основных понятий, воплощающих процесс цифровизации электроэнергетики, является «цифровая подстанция» (ЦПС). Ключевым аспектом, отличающим ЦПС от традиционной является перевод процессов обмена информацией, используемой для мониторинга, анализа и управления в цифровой вид [8]. Следствием этого является генерация большого объёма данных, доступных для разработки методов мониторинга текущего состояния оборудования, предиктивного анализа, адаптивной защиты.

Переход от традиционных подстанций к ЦПС, на текущий момент, преимущественно затрагивает вторичные цепи защит и автоматики [6].

Одной из серьёзных проблем на сегодняшний день является тот факт, что значительное количество единиц первичного оборудования эксплуатируется за пределами нормативного срока службы [9]:

- трансформаторы – 74,1% от общего числа;
- ЛЭП – 57,3% от общей протяжённости.

В соответствии с этим, есть явная необходимость разработки и введения систем мониторинга состояния, режимов работы и оценки остаточного ресурса первичного оборудования подстанции, в первую очередь трансформаторов.

Высокие темпы цифровизации, рост объёма данных, получаемых с разных уровней подстанции, в совокупности с отсутствием возможности оснастить оборудование, работающее за пределами нормативного срока, современными датчиками, обуславливают целесообразность и необходимость разработки алгоритмов анализа параметров работы электрооборудования (ЭО) ЦПС основываясь на основных параметрах сети таких как ток и напряжение.

Объектом исследования является цифровая подстанция III архитектуры с имеющимися оцифрованными значениями токов и напряжений с ТТ и ТН.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы анализа параметров работы электрооборудования цифровой подстанции на основе оптимизированного вейвлет преобразования.

Цель работы – разработка алгоритма обработки данных цифровой подстанции с помощью оптимизированного вейвлет преобразования

Задачи, поставленные для достижения цели:

- анализ существующих методов диагностики состояния, режимных параметров работы электрооборудования подстанции с целью выявления основных трендов;
- выбор математического аппарата для анализа временных рядов, обзор существующих методов;
- построение математической модели имитации неисправностей трансформаторного оборудования;
- анализ, преобразование и выбор наиболее показательных параметров;
- оптимизация использования вейвлет-преобразования;
- разработка алгоритма и апробация на данных с реального объекта.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика определения параметров работы электрооборудования подстанции;
- обосновано применение вейвлет-преобразования, определены оптимальные параметры для анализа временных рядов;
- предложены обобщённые алгоритмы анализа параметров работы электрооборудования подстанции в реальном времени.

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭО ЦПС

1.1 Краткий обзор ЦПС

Цифровая подстанция – это интеллектуальная электроэнергетическая система, оснащённая передовыми цифровыми технологиями и устройствами, которые обеспечивают сбор, обработку, анализ данных о производстве, передаче и распределении электроэнергии, выдачу управляющих воздействий.

Параметры информационного взаимодействия, описания модели и требования к ЦПС устанавливаются положениями стандарта МЭК-61850. Информационная модель описывается с помощью файла конфигурации, составленного на языке SCL.

Уровни описания масштабируются, начиная от заводских конфигураций интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) до полного описания ЦПС, включающее в себя файлы конфигураций, настроенных на взаимодействие с оборудованием подстанции, устройств, в том числе межсистемные коммуникации [10]. Ниже приведены типы файлов, описывающих информационную модель ЦПС:

1) Файл описания базовой конфигурации устройства ICD (IED Capability Description), описывающий все логические устройства, логические узлы, объекты и атрибуты данных, предустановленные наборы данных (Dataset), блоки управления отправкой GOOSE-сообщений (GOOSE Control Block), блоки управления отправкой отчётов (Report Control Block), блоки управления отправкой выборок мгновенных значений (SV Control Block), которые входят в состав физического устройства;

2) Файл описания предварительно сконфигурированного устройства IID (Instantiated IED Description), предусмотренный для передачи из конфигуратора ИЭУ в конфигуратор проекта предварительно описанной

информационной модели устройства. Используется для устройств с изменяемой информационной моделью. Неиспользуемый функционал может быть скрыт или исключен из информационной модели;

3) Файл описания спецификации системы SSD (System Specification Description), предназначенный для описания первичного оборудования подстанции и его соединений, всех функций вторичных систем, имеющих отношение к первичному оборудованию, но без привязки к конкретному ИЭУ, если необходимо, данную связь можно указать;

4) Файл описания конфигурации подстанции SCD (Substation Configuration Description) содержит полное описание всего первичного оборудования в составе ПС, функционала первичного и вторичного оборудования, определяя устройства, реализующие данный функционал, их конфигурации и коммуникационных связей, а также всех коммуникаций ЦПС;

5) Файл описания конфигурации устройства CID (Configured IED Description), описывающий конфигурацию устройства, на котором завершено параметрирование в части функционала и протоколов обмена информацией для последующей загрузки файла на само ИЭУ;

6) Файл описания межсистемного обмена SED (System Exchange Description), описывающий межсистемные взаимодействия отдельных проектов, описанными в виде SCD-файлов, главный, при этом, используется в полном виде, а от смежного импортируется часть, имеющая коммуникационные связи с основным проектом.

Для организации каналов связи в цифровой подстанции используется локальная вычислительная сеть (ЛВС) на базе технологии Ethernet, а в качестве протоколов передачи применяются протоколы, описанные стандартом МЭК 61850 [11].

Важным плюсом цифровой подстанции является расположение устройств для сбора дискретных и аналоговых сигналов, осуществления управления в непосредственной близости к оборудованию с дальнейшей

передачей всех данных, необходимых для устройств РЗА и АСУ ТП ПС, в цифровом виде. Это позволяет уменьшить общую длину электрических кабелей и вторичных цепей, что приводит к снижению вероятности их повреждения и увеличению наблюдаемости вторичных систем.

В рамках вторичной системы подстанции, для различных задач, стандартом МЭК-61850 определено использование следующих протоколов передачи данных:

1) SV (Sampled Values) – установленный разделом МЭК 61850-9-2 протокол применяется для оцифрованных значений токов, напряжений от электронных измерительных ТТ, ТН и преобразователей аналоговых сигналов (ПАС);

2) GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) – определяемый главой стандарта МЭК 61850-8-1 протокол, применяется для передачи дискретных сигналов между преобразователями дискретных сигналов (ПДС) и устройствами РЗА, контроллерами присоединения, а также для быстрого обмена информацией между различными устройствами;

3) MMS – определяемый главой стандарта МЭК 61850-8-1 протокол, в рамках которого реализованы коммуникационные сервисы (в том числе удаленное управление устройствами и передача файлов), которые применяются для передачи данных между устройствами и системой АСУ ТП, посредством так называемых отчётов.

В зависимости от того, насколько широко внедрены цифровые технологии передачи данных на подстанции, можно выделить три архитектуры, главным отличием которых будет наличие отдельного уровня ЛВС подстанции так называемой *шины процесса*, а также присутствием в ней оцифрованных мгновенных значений токов и напряжений. Пример реализации ЦПС с применением продуктов ГК «Прософт-Системы» приведён в Приложении 1.

Архитектура I предполагает применение протокола MMS для интеграции устройств РЗА и контроллеров присоединений (КП) в единую систему АСУ ТП без использования протоколов GOOSE и SV. Таким образом, первая архитектура не предполагает использование ПДС, ПАС.

Архитектура II предусматривает использование протокола MMS, для интеграции устройств РЗА и КП в единую систему АСУ ТП. В дополнение, для быстрой передачи информации между устройствами уровня присоединения (РЗА и КП), а также для передачи сигналов между ними и ПДС, применяется протокол GOOSE. Использование цифровых трансформаторов тока (ЦТТ), цифровых трансформаторов напряжения (ЦТН), ПАС в данной архитектуре не предусматривается.

Применение протокола GOOSE обуславливает дополнительные требования к организации ЛВС подстанции, именно – наличие шины процесса, с соответствующей сетевой инфраструктурой и предъявляемым к ней требованиям.

Архитектура III предполагает использование протокола MMS для обмена между устройствами на уровне присоединения, а также с устройствами/системами на уровне АСУ ТП подстанции, использование протокола GOOSE, для быстрой передачи информации между устройствами уровня присоединения (РЗА и КП) и передачи информации между устройствами защиты и автоматики и ПДС, а также применение протокола Sampled Values для передачи данных измерений токов и напряжений от ЦТТ и ЦТН, и, на переходном этапе, от ПАС, на уровне шины процесса. Особое положение, при этом имеет использование протоколов синхронизации устройств повышенной точности (PTP, IRIG-B). При использовании протокола Sampled Values, на ЦПС, действующих в энергосистеме Российской Федерации, следует также руководствоваться положениями Корпоративного профиля ФСК, в части параметров цифровых потоков.

Основные особенности реализации Архитектур I, II и III в части применяемых технических средств и протоколов стандарта МЭК 61850 приведены в таблице 1

Таблица 1 – Особенности реализации архитектур ЦПС

	Архитектура I	Архитектура II	Архитектура III
Использование протокола MMS	Да	Да	Да
Использование протокола GOOSE	Нет	Да	Да
Использование протокола Sampled Values	Нет	Нет	Да
Применение оборудования с поддержкой МЭК 61850 на подстанционном уровне	Да	Да	Да
Применение оборудования с поддержкой МЭК 61850 на уровне присоединения	Да	Да	Да
Применение оборудования с поддержкой МЭК 61850 на полевом уровне	Нет	Да	Да
Использование ПДС	Нет	Да	Да
Использование ПАС	Нет	Нет	Да
Использование ЦТТ, ЦТН, работающих по протоколу Sampled Values	Нет	Нет	Да

Устройства ПАС используются для преобразования аналоговых сигналов от электромагнитных измерительных трансформаторов тока и напряжения, с помощью встроенных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), в цифровой формат в соответствии с протоколом МЭК 61850-9-2.

ПАС предусматриваются при реализации объектов по архитектуре III типа на переходном этапе (до повсеместного внедрения ЦТТ и ЦТН).

В данной работе, для разработки алгоритмов анализа параметров работы электрооборудования и последующей апробации, рассматривается ЦПС III архитектуры.

Ключевой особенностью цифровых потоков является их непрерывность и высокая степень дискретизации, что позволяет использовать данные для различных областей применения:

- 1) анализ показателей качества электроэнергии;
- 2) использование в регистраторах аварийных событий (РАС) для фиксации параметров энергосистемы в момент аварии, а также в период ей предшествующий;
- 3) использование цифровых значений токов и напряжений в цифровых устройствах РЗА;
- 4) использование данных SV-потоков в системах учета электроэнергии.

Корпоративным профилем МЭК-61850 ФСК ЕЭС определены следующие параметры дискретизации измерений:

- 96 выборок за период промышленной частоты;
- 288 выборок за период промышленной частоты.

Перечень получаемых данных в составе SV-потока от ПАС, примем, руководствуясь функционалом современных устройств. В качестве исходного возьмём ПАС ENMU производства ООО «Энергосервис» г. Архангельск. Частоту дискретизации цифрового потока примем равной 288 отсчётов за период промышленной частоты.

В составе цифрового потока отдаются следующие параметры:

- значения фазных токов и напряжений;
- значения токов нулевой последовательности;
- значения напряжения нулевой последовательности.

1.2 Существующие методы мониторинга и анализа параметров работы оборудования

Методы диагностики электрооборудования можно разделить на:

1) Методы разрушающего контроля, при использовании которых оборудование не разбирается и не выводится из строя;

2) Методы неразрушающего контроля, оборудование не выводится из строя после применения методов данной категории, также использование методов неразрушающего контроля не требует разборки наблюдаемого оборудования.

Основной интерес для диагностики электрооборудования цифровой подстанции представляют методы неразрушающего контроля. Методы первой категории используются для проверки одного экземпляра выпущенной партии (в случае невысокой стоимости), а также на стадии конструкторско-испытательных работ.

Виды неразрушающего контроля разделяются по базовым физическим принципам, общими для этой группы. Методы для каждого вида классифицируют по признакам обусловленным характером взаимодействия контролируемого явления с объектом наблюдения, по информативным параметрам, полученным в ходе применения метода и способам получения данных параметров. Перечисление видов и групп методов неразрушающего контроля приведено в [12].

Большая часть методик проведения диагностики, применимо к объектам электроэнергетики требует вывода оборудования из работы, что ведёт к дополнительным издержкам.

Ввиду этого наиболее перспективными, для исследований, являются те, что позволяют определить состояние оборудования в рабочем режиме, не вмешиваясь в его работу.

Анализ разрабатываемых методов показывает, что наибольший научный интерес вызывают, основанные на обработке сигналов тех или иных физических возмущений (электромагнитное и электростатические поля, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, акустические и низкочастотные механические вибрации).

Например, в статьях [13,14] описывается разработка метода анализа электромагнитного поля вблизи с работающим силовым оборудованием подстанции, в частности автотрансформатором. Рассмотрен большой объём временных рядов, методами статистики выявлены основные резонансные спектры частот, характерные для рабочего режима автотрансформатора. Выявлены закономерности между геометрией составных частей трансформатора и спектром излучаемых частот. Выявлена корреляция между содержанием определённых газов в масле автотрансформатора. Дальнейшим продолжением работы в данном направлении является [15], где более подробно рассматриваются, характерные для данного типа оборудования, неисправности, определяется классификация и даётся оценка технического состояния ряда частных случаев рассмотренных автотрансформаторов.

Другой физический принцип и методика представлены в статье [16], где рассмотрен вопрос распознавания переходных перенапряжений и дальнейшего определения состояния изоляции высоковольтных линий передач. Основывается данный метод на измерении электрических величин, в первую очередь ёмкости. Рассмотрено использование трёх различных типов регистрирующих устройств и методика дальнейшей аналитической обработки полученных результатов для каждого из вариантов.

В работе [17] представлен метод анализа вибрационных характеристик газового хозяйства элегазовых выключателей. В ходе разработки метода была сформирована и обработана выборка сигналов с нормально работающего и неисправного однотипного оборудования, которая была снята с датчиков,

расположенных в различных позициях относительно наблюдаемого объекта. Полученные сигналы проанализированы в частотной и временной областях, посредством методов обработки временных рядов на основе анализа Фурье. Для характерных неисправностей были определены коррелирующие для различных опытов спектры.

В разрабатываемых решениях, для получения наилучших результатов, применяемые методы могут комбинироваться и, после обработки и дальнейшей интерпретации, дополнять результаты друг друга.

Подход, использующий регистрацию электромагнитного возмущения, для определения параметров частичных разрядов (ЧР) в оборудовании и их акустической эмиссии представлен в работе [18]. Определены наиболее информативные частотные электромагнитные и акустические спектры для регистрации ЧР. Результатом данной работы является действующий прототип устройства определения повреждённых и близких к выходу высоковольтных изоляторов.

Другой метод, который можно отнести к акустическому виду неразрушающего контроля описан в [19]. В данной работе акцент сделан на технологиях обработки звукового сигнала. Суть метода заключается в локализации источников акустической эмиссии трансформатора и более детальному анализу данных, полученных от них. Приведены математические выкладки преобразования исходного акустического сигнала в массив данных, содержащих необходимую для анализа информацию. Результатом является программно-аппаратный комплекс для диагностики.

В работе [20] также описан метод акустического контроля шумовой обстановки подстанции, с главным акцентом направленным на предобработку акустического сигнала посредством схемотехнических и программных решений. Результатом является прототип системы мониторинга акустического фона отдельно стоящего оборудования подстанции.

В статье [21] описан метод на основе анализа полученных параметров вихревых токов в электромагнитных механизмах (ЭММ), полученных при облучении их в СВЧ диапазоне. Приведены аналитические выкладки, для обработки полученных значений. Рассмотрены закономерности работы ЭММ, предложена методика интерпретации рассчитанных параметров применимо для режимов работы и соответствию их нормальным.

Использование различных средств статистической, аналитической обработки полученных данных позволяют автоматизировать и усовершенствовать, устоявшиеся на текущий момент методы диагностики.

В работе [22] совершенствуется методика обработки полученных изображений в ИК спектре, которую можно отнести к оптическим методам диагностики. Предложенный метод описывает использование алгоритма сегментации, полученных с устройств тепловизионного контроля изображений, для определения наиболее информативных частей и их последующей обработки. Сравнительный анализ программных средств для осуществления сегментации изображений, полученных с тепловизора приведён в [23].

Использование роботизированных комплексов существенно расширяет область применения и степень автоматизации процесса диагностики.

В статье [24] освещён практический аспект использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для определения состояния линий электропередач, посредством анализа ультрафиолетового спектра излучаемого коронными разрядами работающего оборудования.

В публикации [25] рассматривается анализ, полученных с роботизированных комплексов, изображений и видеоданных, на основе методов каскадной модели глубокого обучения.

Большинство рассмотренных выше методик носят сессионный характер и требуют непосредственного участия специалиста для снятия, обработки,

интерпретации результатов и, по большей части, реализованы в качестве пилотных и исследовательских проектов.

Для осуществления непрерывной диагностики, в масштабе решений для энергосистемы, они должны быть должным образом апробированы и введены на уровне государственных или корпоративных стандартов. Существующие, на сегодняшний день, не покрывают все категории оборудования.

На текущий момент, стандартами организации ФСК ЕЭС [26, 27, 28], как одного из главных системообразующих предприятий РФ, в области электроэнергетики, предусмотрены и перечислены требования к системам для мониторинга:

- трансформаторного оборудования;
- оборудования комплектного распределительного устройства (КРУЭ);
- кабельных линий, с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 110 кВ и выше.

Описанные в данных корпоративных стандартах, требования обуславливают необходимость установки на оборудование или в непосредственной близости от него ряда диагностических датчиков реагирующие на определённые физические и химические параметры такие как:

- 1) температура окружающей среды;
- 2) процентное содержание, растворённых в трансформаторном масле элементов, являющихся результатами термического и электролизного распада;
- 3) содержание растворённой влаги в трансформаторном масле;
- 4) ряд электрических параметров (тангенс электрических потерь, кажущийся заряд, ток, напряжение, активная и реактивная мощности);

5) давление, расход, температура масла в различных частях трансформаторного оборудования;

б) наличие утечек диэлектрических жидкостей, газов.

Интерпретация данных, получаемых с датчиков определена методическими руководствами к проведению тех или иных диагностических мероприятий.

Стандартами [26, 27, 28] закреплены основные характеристики для погрешностей, рабочих диапазонов измерений, степени дискретизации (частоты опроса) параметров, а также требования к интеграции устройств, получающих и обрабатывающих информацию с датчиков в систему АСУ ТП объекта и более высоких уровней.

Развивающиеся и проявляющиеся дефекты оборудования изменяют основные электрические параметры схем замещения оборудования. Например, частным случаем являются межвитковые замыкания трансформатора, при которых изменяется коэффициент трансформации, сопротивления обмоток, следовательно – показания токов и напряжений.

Перспективность развития и текущую актуальность вопроса подтверждает продолжающееся развитие методов анализа параметров работы трансформатора, основываясь на показаниях первичных величин, в том или ином режиме. В обзорной работе [29] проведён анализ патентов в области мониторинга и диагностики трансформаторов, большую часть которых составляют способы и методики анализа первичных величин.

Ввиду вышеперечисленного можно сделать вывод об актуальности развития методов анализа параметров работы силового оборудования, основываясь на показаниях первичных величин таких как ток и напряжение.

1.3 Применение существующих методов мониторинга и анализа параметров работы электрооборудования в цифровой подстанции

Специфика применения существующих решений в части мониторинга электрооборудования цифровой подстанции, не коснулась методов снятия и интерпретации диагностических данных. Изменения коснулись, в основном, устройств сбора и обработки информации, получающих её от расположенных в непосредственной близости от наблюдаемого оборудования датчиков. А именно – соответствие информационной модели устройства серии стандартов МЭК-61850.

Работа датчиков и процесс передачи данных устройствам сбора и обработки остались практически без изменений ввиду ряда причин:

- 1) устройства, регистрирующие тот или иной физический, химический параметр, для соответствия цифровой модели МЭК-61850, потребуют существенной доработки и усложнения;
- 2) потребуются существенное усложнение структуры ЛВС объекта;
- 3) соблюдение требований по электромагнитной совместимости существенно усложнят конструкцию и повысят стоимость производства датчиков.

На текущий момент, для получения данных с регистрирующих устройств и датчиков, как правило применяются, приведённые к стандартным диапазонам, аналоговые величины или последовательные интерфейсы обмена данными такие как RS485, RS422, RS232, реализованные на различных технологиях физического уровня модели сетевого взаимодействия OSI. Используются протоколы обмена такие как: modbus, dnp3, iec101, другие символьные и проприетарные протоколы. Полученные данные уже обрабатывает контроллер, который осуществляет, интеграцию в существующую систему АСУ ТП объекта.

Результатом цифровой трансформации объекта является агрегирование данных со всех систем измерений, мониторинга и управления на разных уровнях ЛВС объекта (шине процесса, стационарной шине), что открывает широкие перспективы для анализа, в том числе используя подходы виртуализации и применения методов обработки больших данных.

Ввиду вышеперечисленного перспективными направлениями являются:

1) разработка цифровых двойников экземпляров оборудования подстанции;

2) обработка временных рядов токов и напряжений с шины процесса, которые представляют из себя высокодискретизированные измерения мгновенных значений;

3) применение статистических методов, алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей для анализа информации методами обработки больших данных (нейронные сети, алгоритмы машинного обучения).

В статье [30] обозначены особенности использования анализа оцифрованных значений токов и напряжений, для мониторинга и обнаружения аварий, в энергосистеме с большой площадью покрытия, которая представляет собой электрическую инфраструктуру путей железнодорожного сообщения.

В работе [31] предложен комплексный подход к методике составления цифровых двойников оборудования подстанции с частно рассмотренным случаем составления цифрового двойника для высоковольтного выключателя.

В статьях [32, 33] освещён практический аспект использования цифровых двойников оборудования подстанции для целей определения технического состояния и сравнения эффективности работы алгоритмов защиты и автоматики.

Комплексный подход к исследованию и разработке цифровой модели системы контроля подстанций на основе цифровых двойников описан в [34].

1.4 Выводы

Основываясь на существующих мировых трендах в электроэнергетике [1, 2, 3], закреплённой в РФ на законодательном уровне стратегией цифровой трансформации [4], в том числе и энергетического сектора экономики [5] определено, что ЦПС из стадии пилотных проектов перешли в разряд повсеместно внедряемых решений в масштабе энергосистемы и прочно закрепились в качестве стандарта.

Согласно результатам технической инспекции ФСК ЕЭС [9], существующих темпах цифровизации объектов электроэнергетики, указанных в годовом отчёте ПАО Россети [7], а также действующих стандартов ФСК ЕЭС [26, 27, 28] было определено, что существующие методы диагностики оборудования не покрывают всех категорий электрооборудования.

Дополнительной особенностью является тот факт, что подавляющее большинство наиболее капиталоемкого оборудования объектов энергетики выпущено до введения стандартов, предписывающих оснащение датчиками для мониторинга, на этапе производства. Их внедрение без вмешательства в конструкцию, не представляется возможным.

Совокупность указанных выше особенностей обуславливает необходимость развития методов анализа и мониторинга, основываясь на анализе первичных величин.

Разработка алгоритмов анализа, на основе современных математических методов с последующей перспективой применения технологий анализа больших данных и искусственного интеллекта является наиболее экономичным и эффективным способом решения проблемы мониторинга режимов и параметров работы электрооборудования подстанций.

2 ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

2.1 Применяемые методы анализа временных рядов

Основными параметрами, характеризующими режим работы объектов электроэнергетики, являются значения токов и напряжений в различных узлах сети, получаемых с измерительных приборов, подключаемых к измерительным ТТ и ТН.

Данные представляют собой временные ряды, к которым можно применить различные методы преобразования и обработки сигналов.

Основные задачи, возникающие при этом, можно свести к следующим:

- 1) достоверное определение и локализация возмущений в сигнале, характерных для детектируемого и анализируемого явления;
- 2) удаление шумов, определение информативной составляющей сигнала;
- 3) выявление корреляций и зависимостей между характером сигнала и изменениями в параметрах системы для выдачи управляющего воздействия или дальнейшего использования в алгоритмах обработки.

Спектр задач подразумевает необходимость исследования нестационарных сигналов во временной и частотной областях.

Одним из «классических» методов, применяемых для частотного анализа сигналов, является преобразование Фурье.

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-t\omega x} dx, \quad (1)$$

где $e^{-t\omega x}$ – комплексное представление тригонометрических функций, образующих ортонормированный базис.

Ввиду того, что обработка сигналов, на сегодняшний, день выполняется, главным образом посредством вычислительной техники, используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ), а именно – более усовершенствованная в части быстродействия разновидность ДПФ - быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Для примера возьмём сигнал, который можно описать системой уравнений:

$$i(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1), & 0 \leq t \leq 0,33 \\ I_{m2} \sin(4\pi ft + \varphi_2), & 0,33 \leq t \leq 0,66, \\ I_{m3} \sin(8\pi ft + \varphi_3), & 0,66 \leq t \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

где ток на участках I_{m1}, I_{m2}, I_{m3} равен 1А; f – 50 Гц.

Для дискретного сигнала длиной в 1000 отсчётов, который имеет одинаковые амплитуды токов на участках и частоты 50 Гц на первой трети сигнала, 100 Гц – на второй и 200 Гц – на третьей, разложение в ряд Фурье будет выглядеть следующим образом (рисунок 1):

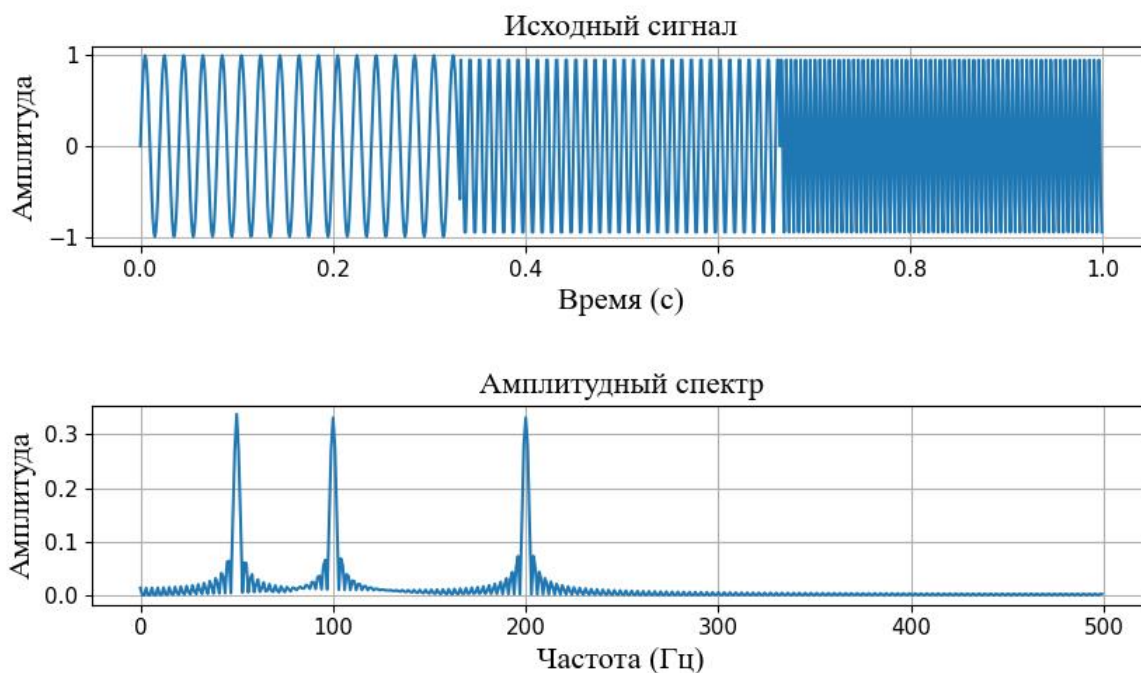


Рисунок 1 – Разложение нестационарного сигнала в ряд Фурье

Данное разложение на спектр действительно показывает наличие частот 50, 100 и 200 Гц, также можно заметить, что спектр частот распределён в некоторой области, пик которой приходится на содержащуюся в сигнале частоту. Амплитуда данного пика меньше, чем в начальном сигнале.

Наблюдаемый эффект называется «растеканием спектра». Обусловлен он применяемым в вычислительной технике методом БПФ и частотой дискретизации.

Также, при разложении сигнала отсутствует представление о том какие частоты в какой момент времени содержались в сигнале. Связано данное явление с тем, что используемые для разложения тригонометрические функции синуса и косинуса имеют бесконечную продолжительность, что не позволяет получить представление сигнала во временной области.

Для повышения осуществления локализации во временной области используется оконное преобразование Фурье (ОПФ):

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x - x_0)e^{-tx\omega} dx, \quad (3)$$

где $g(x - x_0)$ – локализованная во времени оконная функция.

Существует множество различных оконных функций (Блэкмена, Барлетта-Хэнна, Хэннинга, Бохмана и др.), где главные отличия определяются, в основном, видом задаваемой функции и уровнем искажений, вносимых применением окон.

Рассмотрим нестационарный сигнал, который описали в прошлом примере. Спектр дискретного временного ряда из 1000 отсчётов, получаемый при ОПФ, с использованием окна Блэкмена, ширина которого составляет 50 точек, а параметр перекрытия – 20 точек, будет выглядеть следующим образом (рисунок 2):

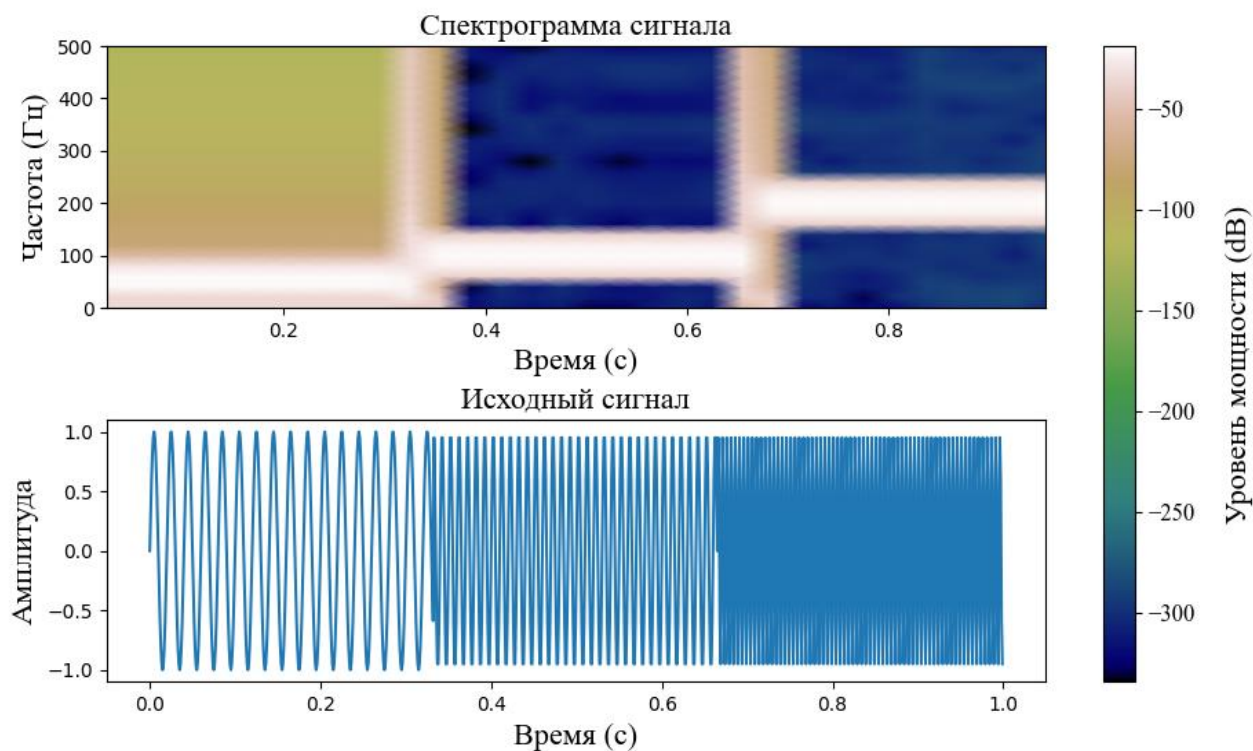


Рисунок 2 – Спектрограмма сигнала после ОПФ

Как можно заметить, области спектра, показывающие наличие частот и локализацию изменений во времени определены нечётко. Данный эффект обусловлен выбором окна, заданием его ширины и используемыми для перекрывающихся окон методов.

Выбор оконной функции, ширины окна и параметров перекрытия имеет определяющее значение для реализации ОПФ. Чем окно шире, тем выше частотное разрешение сигнала, но тем хуже представление сигнала во временной области.

Получить хорошее разрешение одновременно во временной и частотной областях невозможно ввиду принципа неопределённости Гейзенберга [35].

Одним из главных недостатков оконного преобразования Фурье является тот факт, что параметры окна фиксированы и не могут быть изменены в соответствии локальным особенностям рассматриваемого сигнала. Данный момент затрудняет анализ динамически изменяющихся по спектру частот временных рядов.

2.2 Основные положения вейвлет-преобразования

Решить описанные выше проблемы ОПФ поможет вейвлет-преобразование (ВП). Основным отличием ВП от преобразования Фурье является выбор анализирующей функции. В их качестве используются так называемые *вейвлеты*, которые представляют собой короткие функции, ограниченные во времени и частоте и сформированы из исходного (материнского) вейвлета:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (4)$$

где $\psi_{ab}(t)$ – результирующий вейвлет; a – масштабирующий коэффициент; ψ – материнский вейвлет; b – коэффициент сдвига.

Данные функции, за счёт изменений коэффициентов a и b , обладают свойствами масштабирования и сдвига во времени.

Существует множество вейвлет-функций различающимися типами преобразования, способами определения и свойств сформированного базиса:

- 1) функции, осуществляющие дискретное или непрерывное вейвлет преобразование;
- 2) функции, имеющие ортогональный, полуортогональный или биортогональный базис;
- 3) функции, обладающие свойствами симметричности, асимметричности или несимметричности;
- 4) функции, которые задаются аналитически или итерационным способом.

Требования к функциям, которые могут использоваться в качестве вейвлетов для разложения сигнала, можно свести к следующим:

1) ограниченность – квадрат нормы функции, используемой для преобразования, должен быть конечным:

$$\|\psi\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = 0, \quad (5)$$

2) локализация – вейвлет-функция должна быть локализована во временной области:

$$\begin{cases} |\psi(t)| \leq C(1 + |t|)^{-1-\varepsilon} \\ S_\psi(\omega) \leq C(1 + |\omega|)^{-1-\varepsilon}, \end{cases} \text{ при } \varepsilon > 0 \quad (6)$$

3) нулевое среднее – функция должна быть знакопеременной, иметь, как минимум один переход через нулевую точку и иметь нулевую площадь:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (7)$$

4) автомодельность – вейвлеты различных уровней разложения получены посредством преобразования материнского вейвлета с помощью масштабирующего и сдвигающего коэффициента.

Стоит отметить, что свойственный оконному преобразованию Фурье, минус, который заключается в фиксированном размере окна, здесь успешно решён. Определяющим моментом является тот факт, что вейвлет функции масштабируются, для высокочастотных составляющих – сужаются, а для низкочастотных становятся шире. В то время как, ошибочный выбор окна при ОПФ и, полученные вследствие этого, значения, обусловленные растеканием

спектра, могут замаскировать высокочастотные искажения сигнала, что скажется на точности анализа.

Свойства масштабируемости ВП позволяют более детально анализировать сигнал на всех спектрах частот.

Вейвлет-преобразование, по характеру действий с коэффициентами для формирования базисных функций, а также способу задания анализируемого сигнала можно разделить на:

- непрерывное (интегральное),
- дискретное,
- пакетное.

Интегральное ВП подразумевает формирование базисных функций из материнского вейвлета посредством непрерывного изменения коэффициентов a и b .

Разложение $W_s(a, b)$ сигнала $S(t)$ выражается следующим образом:

$$W_s(a, b) = \left(S(t), \psi_{a,b}(t) \right) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (8)$$

где $\psi_{a,b}(t)$ – базис, полученный при масштабных преобразованиях.

Обратное преобразование (синтез) сигнала описывается данным выражением:

$$S(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_s(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{dad b}{a^2}, \quad (9)$$

где C_ψ – нормирующий коэффициент:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty,$$

где $\Psi(\omega)$ – преобразование Фурье для вейвлета $\psi(t)$. Для вейвлетов составляющих ортонормированный базис $C_\psi = 1$.

Найденный спектр разложений $W_s(b, a_0)$, в отличие от полученного посредством преобразования Фурье, представляет собой функцию от двух аргументов – частоты (масштабирующий коэффициент a) и времени (аргумент b отвечающий за смещение). Данная особенность позволяет построить трёхмерное представление сигнала в виде поверхности.

Пример скалограммы полученной посредством непрерывного вейвлет-преобразования рассмотренного выше сигнала в виде трёхмерной поверхности приведён на рисунке 3.

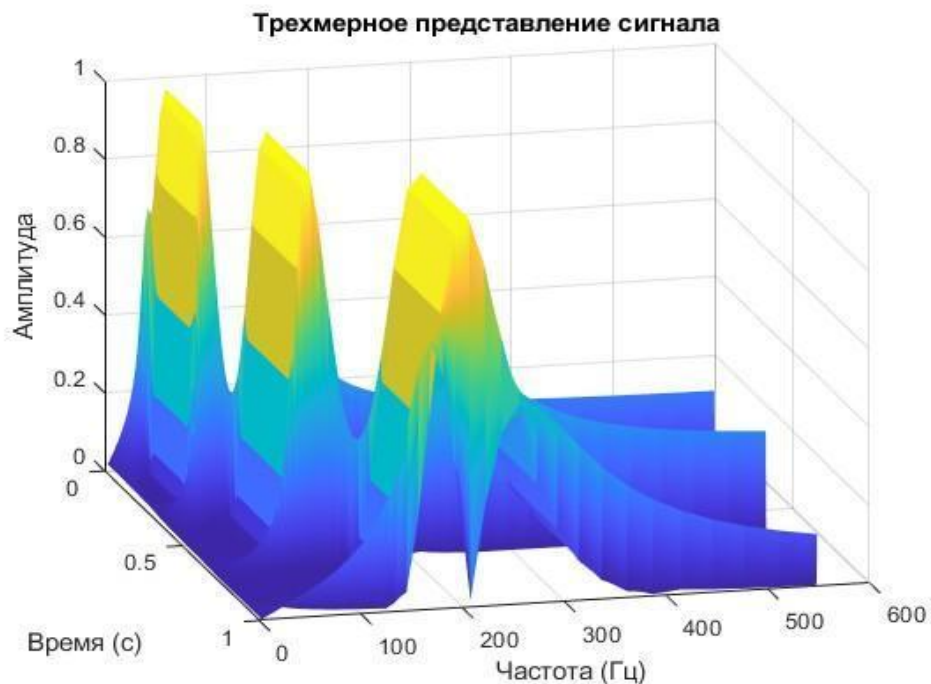


Рисунок 3 – Скалограмма непрерывного ВП

Как можно наблюдать, спектрограмма, содержит характерные пики в распределении частот. Также можно отметить, что явно определяется локализация пиков частот относительно оси времени.

2.3 Выбор типа ВП для анализа временных рядов с шины процесса ЦПС

Ввиду того, что временные ряды, полученные с шины процесса цифровой подстанции, представляют собой дискретные отсчёты, применение непрерывного вейвлет-преобразования требует больших вычислительных затрат, а потому нецелесообразно.

Требуется дискретизация базисных функций, при сохранении свойств реконструкции сигнала из коэффициентов разложения. Для данных целей применяется дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Наиболее распространённый вариант дискретизации - по степени двойки.

Формирование базиса ψ_{mk} в данном случае описывается следующим образом:

$$a = 2^m, b = k \cdot 2^m, \psi_{mk} = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi(2^{-m}t - k), \quad (11)$$

где m и k – целые числа. Параметр m , в данном случае, осуществляет масштабирование

Данным способом получаем разбиение плоскости a, b на сетку с шагом по осям m и k соответственно. Данный способ в ряде источников получил название *диадное преобразование*.

Разложение сигнала в данном случае будет иметь вид:

$$c_{mk} = (S(t), \psi_{mk}(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \psi_{mk}(t) dt, \quad (12)$$

Синтез сигнала определяется следующим образом:

$$37 \quad (13)$$

$$S_t = \sum_{m,k} c_{mk} \psi_{mk}(t).$$

где c_{mk} – коэффициенты разложения

Для анализируемого сигнала, который представляет собой ряд отсчётов, выполняются положения теоремы Котельникова [36]. Они определяют факт того, что непрерывный сигнал $S(t)$ имеющий спектр частот не выше f_{max} , может быть определён с достаточной степенью достоверности последовательностью мгновенных значений с частотой дискретизации, как минимум, в 2 раза выше.

Для цифровых потоков, имеющих формат отраслевого стандарта ФСК (288 отсчётов за период), частота дискретизации сигнала составляет 14400 Гц, соответственно – максимальная частота, информация о которой содержится в данном сигнале, составляет 7200 Гц.

Если количество дискретных значений в рассматриваемом сигнале составляет $N = 2^{n_0}$, то максимальный масштабирующий коэффициент m равен $n_0 - 1$. Максимальное значение коэффициента сдвига для текущего масштабирующего коэффициента определяется $k = 2^{n_0 - m} - 1$. В частности, для наименьшего масштаба, когда $m = 0$, число сдвигов вейвлета будет равняться $2^{n_0} - 1 = N - 1$. Увеличение коэффициента m «расширяет» вейвлет $\psi_{mk}(t)$ в два раза, а число сдвигов соответственно уменьшается.

Если рассматривать SV-поток корпоративного профиля ФСК с выборкой из 288 мгновенных значений за период, длительность которого составляет 1 секунда, то максимальный уровень разложения m_{max} , будет равняться $\log_2 14400 - 1 = 13.808 \approx 13$

Коэффициенты вейвлетов c_{mk} можно найти с помощью процедуры быстрого вейвлет-преобразования (БВП), которое является разновидностью дискретного вейвлет-преобразования. Суть метода сводится к

последовательному разложению результатов, полученных на предыдущей итерации.

Сигнал можно представить в виде двух составляющих – аппроксимирующей $A_m(t)$ и детализирующей $D_m(t)$:

$$S(t) = A_m(t) + \sum_{j=1}^m D_j(t). \quad (14)$$

Составляющие уточняются итерационным методом, Каждый шаг соответствует масштабу a^m . На практике, данный метод получил название *кратномасштабный анализ* (КМА).

На нулевом уровне разложения, начальный сигнал $S(t)$ можно представить в виде последовательности коэффициентов a_k , полученных в ходе вейвлет-преобразования, при масштабирующих функциях $\varphi_{0k}(t)$:

$$S(t) = A_0(t) = \sum_k a_{0k} \varphi_{0k}(t), \quad (15)$$

где $a_{0k} = a_k = (S(t), \varphi_{0k}(t))$ – аппроксимирующие коэффициенты на уровне $m = 0$.

Сигнал раскладывается на две составляющие $A_1(t)$ и $D_1(t)$:

$$S(t) = A_1(t) + D_1(t) = \sum_k a_{1k} \varphi_{1k}(t) + \sum_k d_{1k} \psi_{1k}(t). \quad (16)$$

Длина коэффициентов при этом уменьшается в два раза.

Далее процесс декомпозиции продолжается по $A_1(t)$, в результате которого также получим разложение сигнала на аппроксимирующую $A_2(t)$ и детализирующую $D_2(t)$ составляющую.

Согласно основным положениям КМА [37, 38], функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$, образующие базис могут быть однозначно определены коэффициентами h_l :

$$\varphi(t) = 2 \sum_l h_l \varphi(2t - l), \quad (17)$$

$$\psi(t) = 2 \sum_l (-1)^l h_{l-1} \varphi(2t - l) = 2 \sum_l g_l \varphi(2t - l), \quad (18)$$

где h_j, g_l – коэффициенты функций, образующих базис.

Данные коэффициенты определяются следующим образом:

$$h_l = (\varphi(t), \varphi(2t - l)), \quad (19)$$

$$g_l = (-1)^l h_{2n-1-l}, \quad (20)$$

где $l = 0, 1, \dots, l_0 = 2n - 1$, n – порядок вейвлета.

Поиск аппроксимирующих a_{mk} и детализирующих d_{mk} коэффициентов производится посредством следующих формул:

$$a_{mk} = (S(t), \varphi_{mk}(t)) = \sum_l h_{l-2k} a_{l,m-1}, \quad (21)$$

$$d_{mk} = (S(t), \psi_{mk}(t)) = \sum_l g_{l-2k} a_{l,m-1}. \quad (22)$$

Процесс реконструкции сигнала по его вейвлет коэффициентам описывается следующим образом:

$$a_{m-1,k} = \sum_l (h_{k-2l} a_{ml} + g_{k-2l} d_{ml}). \quad (23)$$

Алгоритмическая сложность прямого БВП сигнала длиной N , составляет $2LN$, где $L = 2n$. Аналогично и для реконструкции сигнала

Последовательность процесса разложения, можно представить в виде блок-схемы, указанной на рисунке 4:

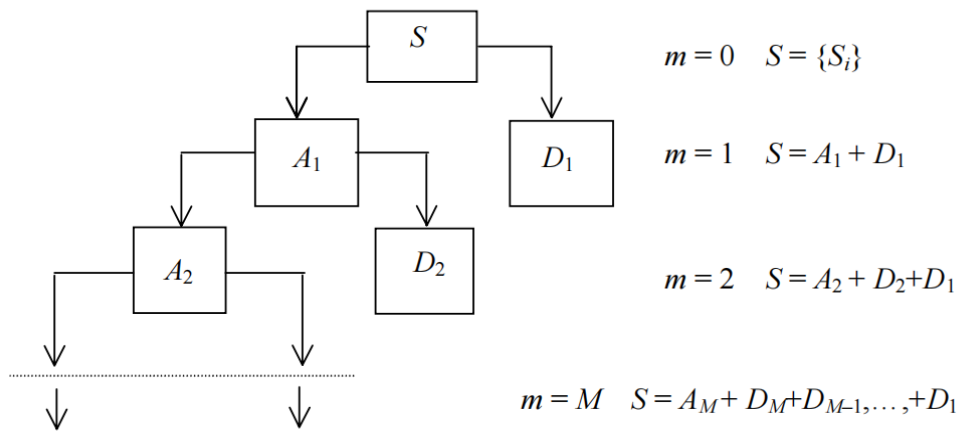


Рисунок 4 – Схема кратномасштабного анализа

Практически, аппроксимирующая ветвь разложения A_m играет роль фильтра низких частот (ФНЧ), а детализирующая D_m выступает фильтром высоких частот (ФВЧ).

Рассмотренный ранее сигнал, состоит из трёх участков синусоидального сигнала частотой 50, 100 и 200 Гц. В приближении к реализации на ЦПС, он будет представлять дискретизированный с частотой 14400 Гц сигнал. Уровни

разложения, которые, в большей мере, будут содержать целевые частоты, можно определить по эмпирической формуле:

$$level = \log_2 \left(\frac{F_s}{f} \right), \quad (24)$$

где, F_s – частота дискретизации, f – целевая частота.

Итого получили, что данный сигнал будет показывать наибольшую плотность энергии для частот 50, 100 и 200 Гц на уровнях разложения с 5 по 8. Проиллюстрируем на рисунке 5 данный тезис. Для построения уровней разложения использовался пакет Matlab с модулем WaveletToolbox

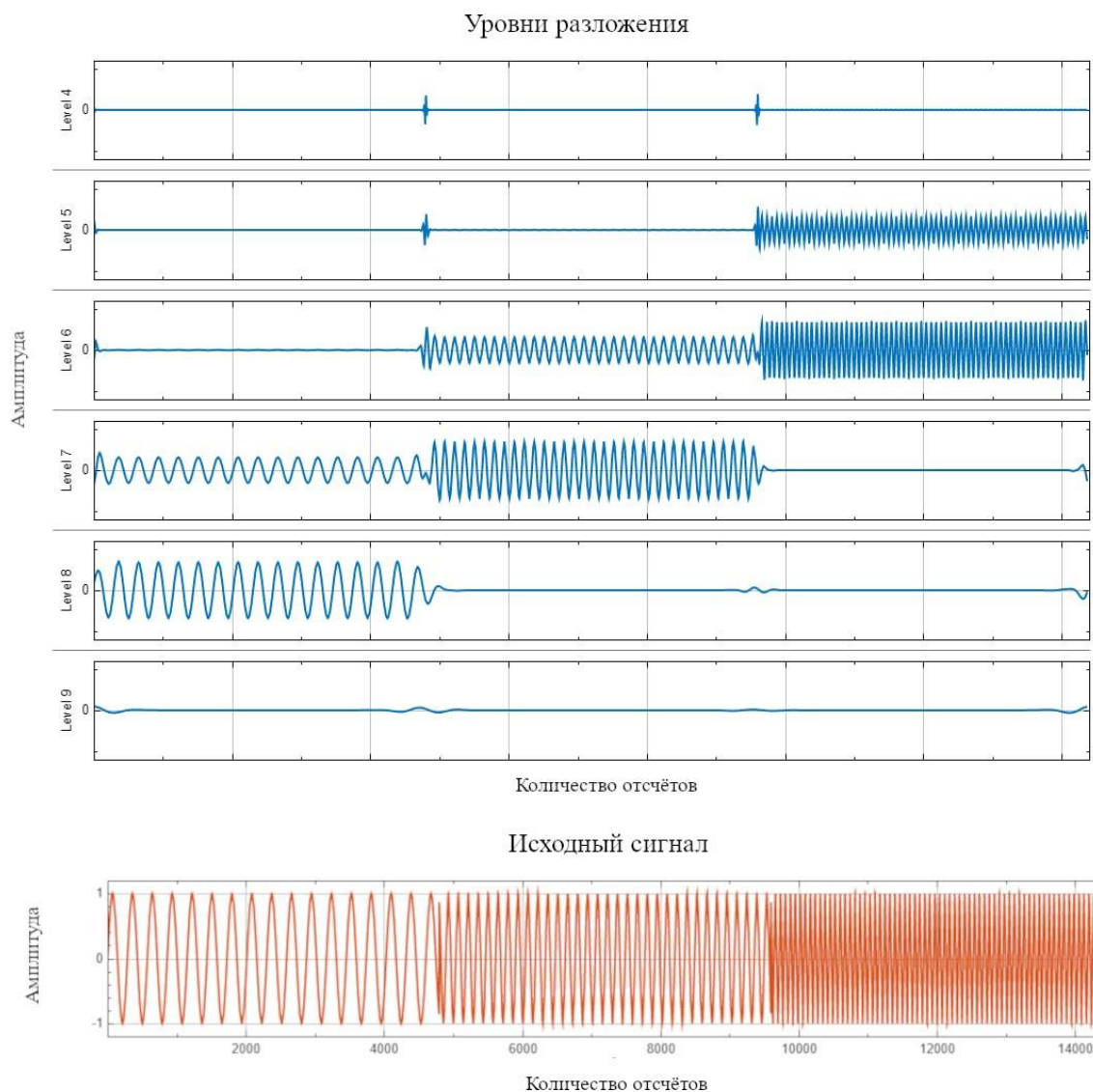


Рисунок 5 – Уровни разложения, полученные в ходе ДВП сигнала

Как можно заметить, уровни разложения выступают в качестве частотных фильтров. Также, на границе смены частоты на высокочастотных уровнях разложения, видно наличие всплесков, обусловленных характером задаваемого сигнала и используемого вейвлета. В данном случае использовался вейвлет Добеши *db4*.

Оценить степень вклада определённого уровня разложения, можно найдя отношение суммы квадратов коэффициентов уровня к сумме квадратов всех коэффициентов разложения, включая конечный уровень аппроксимации:

$$C_{\%} = \frac{\sum_{m=1}^{m_{max}} c_{mk}^2}{\sum_i c_{ik}^2} \quad (25)$$

где i – уровень разложения.

Данная функция также реализована в пакете Matlab Wavelet Toolbox. Результаты проиллюстрируем в виде гистограммы на рисунке 6

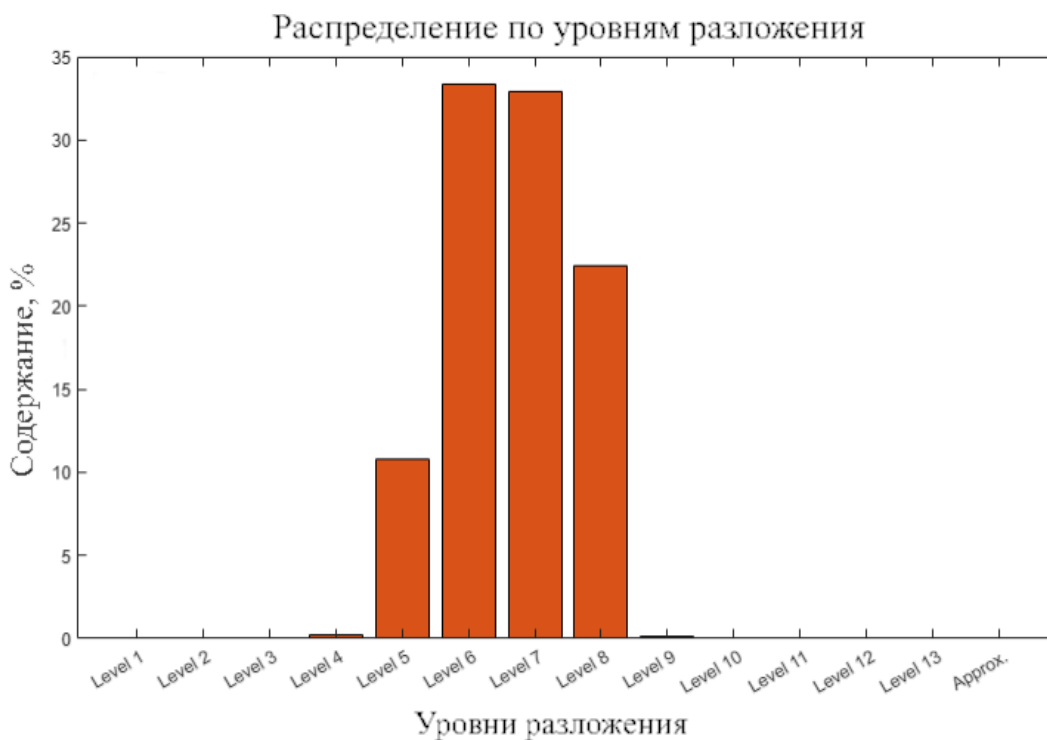


Рисунок 6 – Распределение энергии по уровням разложения

Как видно, уровни разложения с 5 по 8 содержат основную часть сигнала.

Исходя из описанного выше тезиса, можно сделать вывод, что имеется ещё одно перспективное использование ВП, а именно – в сжатии данных и более компактном представлении временных рядов, которые можно передавать в виде коэффициентов, с последующей реконструкцией.

Если анализируемый сигнал разложить на максимально возможное количество уровней, то суммарно длина коэффициентов разложения будет равняться длине исходного сигнала. Следовательно, если удалять неинформативные уровни, то длина коэффициентов для восстановления сигнала становится короче. Оценить количество коэффициентов на уровне можно из соображения, что сигнал при разложении делится пополам. Точное количество коэффициентов зависит от типа используемого вейвлета.

Пример реконструкции рассмотренного ранее сигнала по коэффициентам разложения с 5 по 8 показан на рисунке 7.

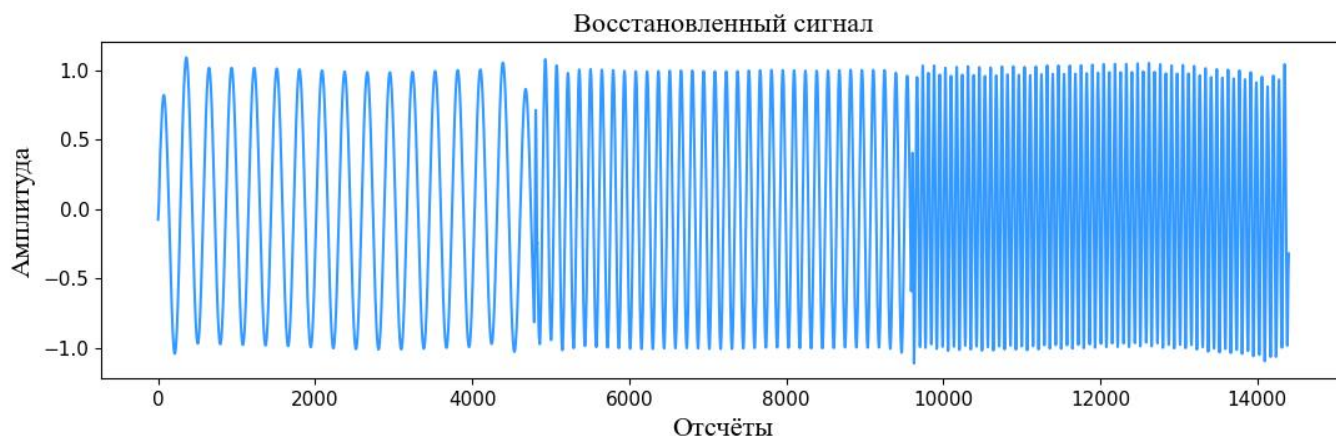


Рисунок 7 – Реконструкция сигнала по требуемым коэффициентам

Совокупная длина коэффициентов данных уровней разложения составляет 869 отсчётов, что существенно меньше изначально заданных 14400 и, как можно убедиться, сигнал воспроизведён с достаточной степенью точности. Коэффициент сжатия, в данном случае, составляет более 16.

2.4 Выводы

В данной главе описаны применяемые, в настоящее время, методы анализа временных рядов с целью получения представления сигнала в частотной и временной областях. Обозначены их особенности и слабые стороны.

Для решения задач более качественного анализа нестационарных сигналов рассмотрен аппарат вейвлет-преобразования. Для анализа временных рядов, получаемых с шины процесса ЦПС, выбран наиболее подходящий метод – БВП, реализуемый в положениях КМА.

Наглядно показаны сильные стороны этого метода и основные перспективы использования такие как:

- применение БВП для представления анализируемого сигнала в частотно-временной области;
- сжатие и фильтрации сигнала.

Таким образом можно сделать вывод, что ВП является мощным инструментом для анализа временных рядов. Данный метод можно использовать в виде полосовых фильтров отслеживаемых частот или для компрессии сигналов и удаления шумов, для последующей передачи в системы верхнего уровня и дальнейшей реконструкции.

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

3.1 Определение группы оборудования подстанции и условий для разработки алгоритма

Для разработки алгоритмов анализа параметров работы силового оборудования цифровой подстанции рассмотрим наиболее капиталоемкую и требующую пристального внимания группу высоковольтного оборудования, а именно – силовые трансформаторы.

Дополнительным фактором, который обуславливает выбор данной категории оборудования, является, то, что большая часть силового оборудования работает за пределами срока эксплуатации, как было отмечено в первой главе

Также ранее было определено, что данная категория оборудования не может быть оборудована необходимыми датчиками, так как это не предусмотрено конструкцией трансформаторов, выпущенных до введения отраслевых стандартов [26, 27, 28].

В данной работе, для моделирования и разработки алгоритмов, рассмотрена группа из трёх автотрансформаторов. Выход из строя одного влечёт за собой возникновение неполнофазного режима, что является аварийным режимом и влияет на устойчивость энергосистемы.

Экономический аспект представляет собой существенные издержки в виде больших капитальных и временных затрат на ремонт, а также недоотпуск энергии.

Наиболее частыми причинами выхода из строя трансформаторного оборудования являются отказы, связанные с неисправностью обмоток [39], которые, по характеру проявления и возникновения, условно можно разделить на:

1) быстро развивающиеся и проявляющиеся неисправности, как правило, имеющие электрическую природу возникновения (различного рода пробой и замыкания); эти неисправности, как правило, требуют немедленного обнаружения и локализации, с последующим отключением повреждённого оборудования, но зачастую, при малых проявлениях устройства РЗА к ним нечувствительны;

2) неисправности, развитие и проявление которых растянуто по времени; указанные неисправности носят преимущественно механический и тепловой характер; они, как правило, являются причинами аварийного выхода из строя;

Распространёнными примерами данных категорий отказов являются межвитковые замыкания (МКЗ) [39] и, как предпосылка данной неисправности – изменение геометрических параметров обмоток трансформатора вследствие возникающих в них электродинамических сил.

Данные виды неисправностей рассмотрены в текущей работе для составления математических моделей и разработки алгоритма анализа параметров работы электрооборудования подстанции на коротких и длинных временных интервалах.

Разработку моделей для эмуляции данных режимов проводится в пакете Matlab Simulink с использованием библиотеки SimScape Electrical, которая содержит необходимые для симуляции модули.

В перспективе, реализация и проверка алгоритма, для условий приближенным к системам реального времени, на начальном этапе, будет выполняться посредством создания ПО на языке программирования Python, с использованием следующих библиотек:

- NumPy - для выполнения операций над массивами
- Pywt - для осуществления вейвлет преобразования

3.2 Разработка алгоритма определения межвитковых замыканий

3.2.1 Создание математической модели для симуляции МКЗ

Современные алгоритмы и методики определения МКЗ, главным образом – продольная дифференциальная защита трансформатора, реагируют на замыкания более 10% витков обмоток. Статистически, чаще всего данный тип неисправности проявляется на стороне низкого напряжения (НН), по причине того, что токи на стороне НН существенно больше.

Спектр необходимых данных, которые нужно получить от модели, обусловлен форматом APDU определённого МЭК-61850-9-2 и применяемых ПАС на сторонах НН и высшего напряжения (ВН) трансформатора. Кадр должен содержать мгновенные значения фазных токов и напряжений, а также значения токов и напряжений в нейтрали, которые представляют собой значения параметров нулевой последовательности, умноженные на 3.

В рамках данной работы, для эмуляции межвитковых коротких замыканий, была составлена математическая модель, которая состоит из:

- 1) источника с наложенными шумами и спонтанно изменяющейся частотой в пределах от 49,5 до 51 Гц;
- 2) спонтанно изменяющейся нагрузкой в пределах от 40 до 200 процентов от номинальной мощности трансформатора;
- 3) функциональных блоков автотрансформатора с расщеплённой вторичной обмоткой, для моделирования замыкания произвольного количества витков в пределах до 10% от общего числа;
- 4) блока имитирующего спонтанное возникновение МКЗ;
- 5) блока измерений тока и напряжения на сторонах НН и ВН;
- 6) блока, в котором проводится расчёт нулевых последовательностей тока и напряжения;

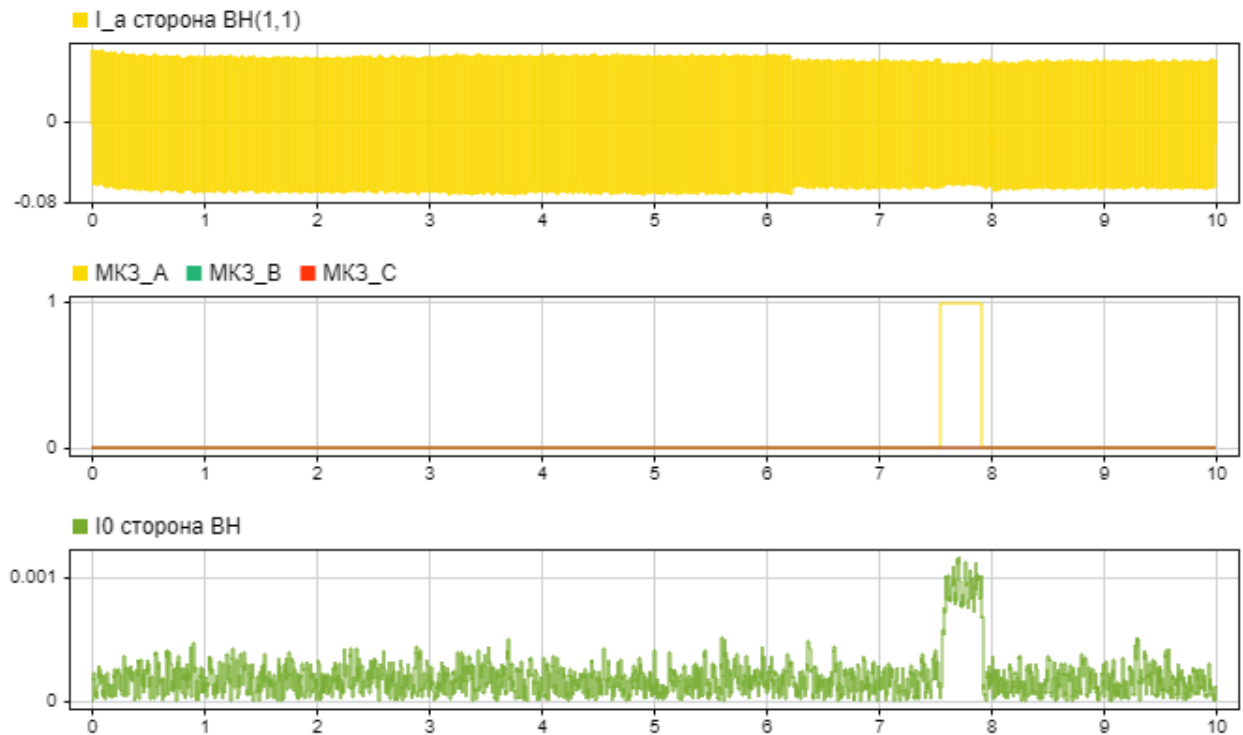


Рисунок 9 – Момент возникновения МКЗ

Как видно, сигнал имеет как высокоамплитудные участки, определяющие момент резкого изменения сигнала, так и «плато» режима, который может быть детектирован на более низкой частоте.

Также явно определён участок с пониженным значением тока, в момент неисправности. Связано это с изменением коэффициента трансформации, на момент возникновения МКЗ. Величина возникающего тока нулевой последовательности существенно меньше, чем при замыканиях на землю, что также может быть использовано для идентификации МКЗ путём введения пороговых значений.

Произведём разложение сигнала на максимально возможное количество уровней для определения из них наиболее информативных.

Результаты разложения показывают, что момент возникновения и протекания МКЗ в наиболее выражен на уровнях разложения с 9 по 14.

Данные уровни соответствуют частотам в диапазоне 3–28 Гц. Данный момент проиллюстрирован на рисунке 10.

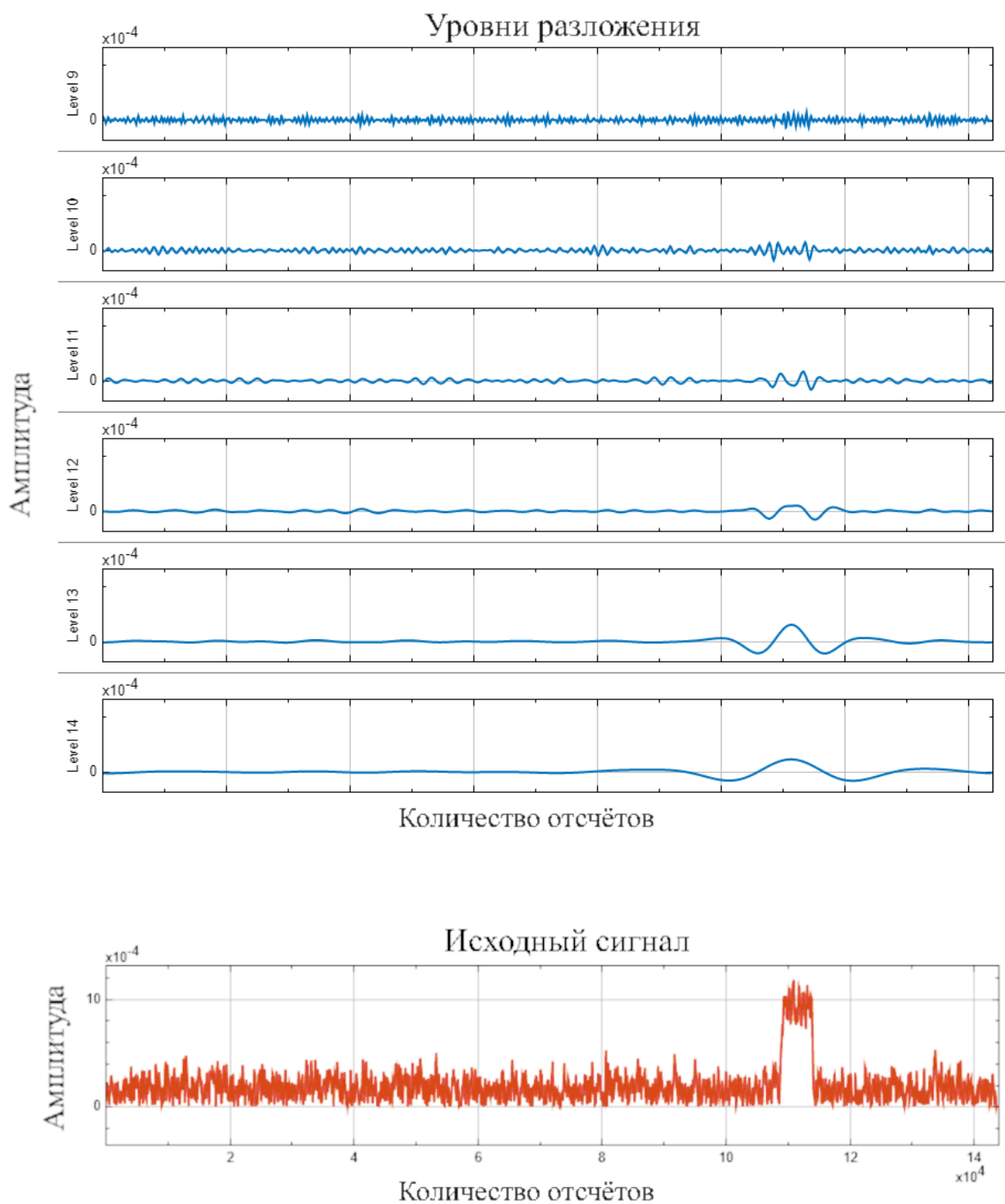


Рисунок 10 – Уровни разложения сигнала токов нулевой последовательности

В данном случае, для реконструкции наиболее информативной составляющей сигнала, будем использовать аппроксимирующие коэффициенты 9 уровня разложения, которые воспроизведут сигнал с достаточной степенью точности с сохранением характерных для возникновения неисправности участков. Проиллюстрируем данный момент на рисунке 11.

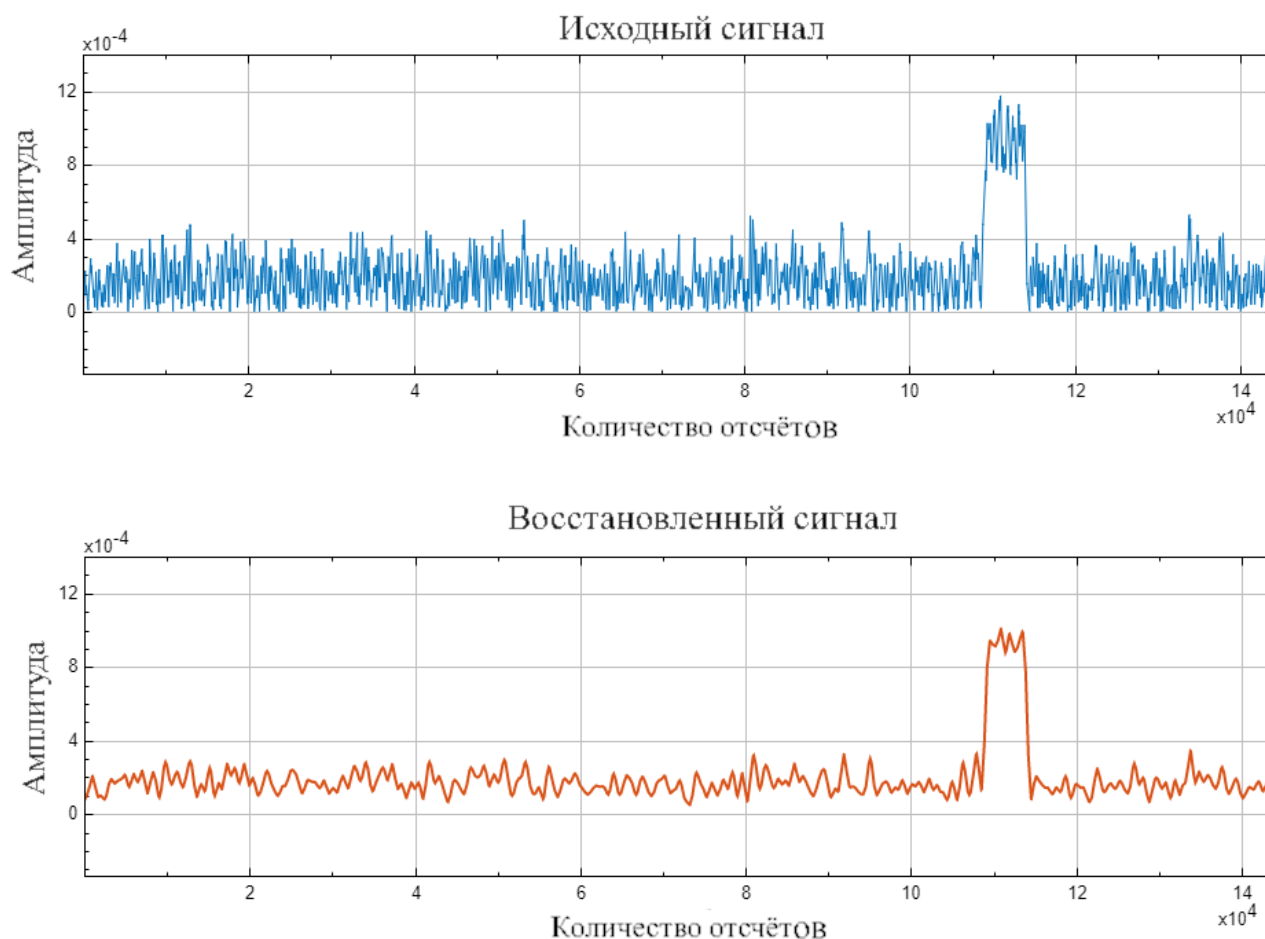


Рисунок 11 – Исходный и восстановленный сигналы I0

Количество коэффициентов аппроксимирующей ветви разложения составляет 288 отсчётов, что в 500 раз сжимает сигнал, без потери характерных для определения неисправности участков. Проявление граничных условий БВП, для данного рода неисправностей, где отслеживаемый параметр изменяется в несколько десятков раз во внимание не берётся.

Ввиду того, что для определения данного вида неисправности, требуется реагировать на амплитудные значения, посредством введения пороговых значений, по аналогии с «классическими» методами РЗиА, в данной работе предлагается анализ графика проинтегрированных значений коэффициентов аппроксимирующей ветви токов нулевой последовательности ВН.

Физический смысл интегрирования для дискретного сигнала длиной N заключается в последовательном суммировании значений отсчётов.

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i. \quad (26)$$

График проинтегрированных значений коэффициентов аппроксимирующей ветви разложения показан на рисунке 12.

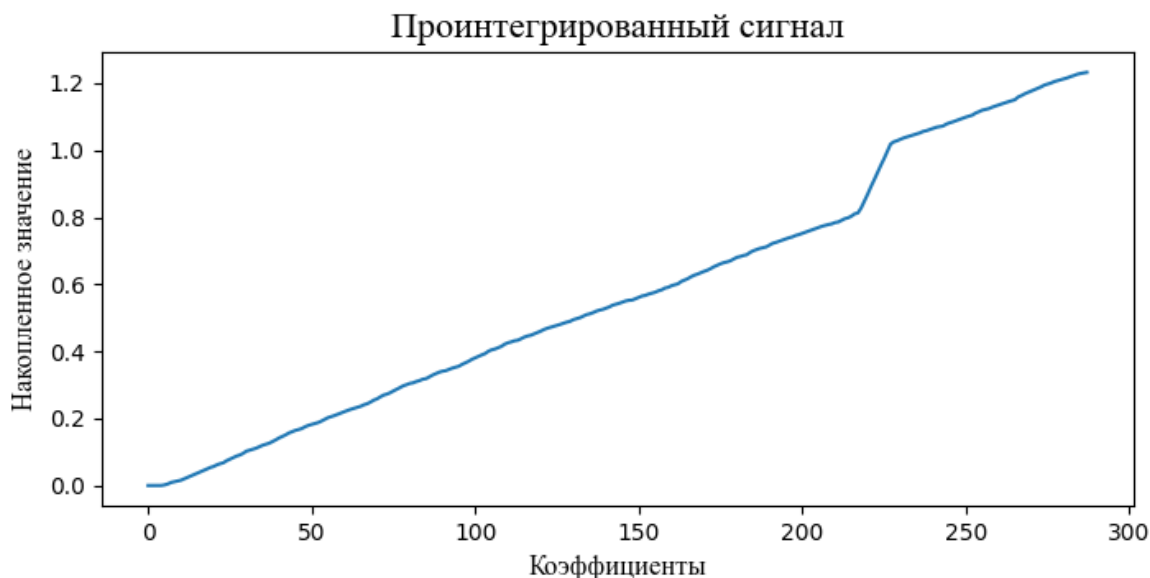


Рисунок 12 – График проинтегрированных коэффициентов разложения

Здесь явно прослеживается участок с проявлением МКЗ. График, в момент неисправности, изменяет угол наклона, что обусловлено увеличением значения токов нулевой последовательности. Данный параметр, можно рассматривать как качественный показатель состояния оборудования

Для определения угла наклона предполагается использовать методы линейной аппроксимации участков сигнала, а именно – метод наименьших квадратов (МНК).

Также, получившиеся коэффициенты аппроксимирующей ветви 9 уровня разложения, предполагается передавать в системы верхнего уровня, для анализа с помощью методов машинного обучения и применения искусственного интеллекта.

3.2.3 Составление алгоритма определения МКЗ

Для работы алгоритма, в режиме реального времени предполагается использовать метод скользящего окна, суть которого заключается в том, чтобы поступающие значения формировали окно, которое затем будет анализироваться. После заполнения текущего окна должно начинаться формирование следующего без потери отсчётов.

Ввиду того, что для получения аппроксимирующих коэффициентов необходимо, по меньшей мере, $2^9 = 512$ отсчётов, ширину окна примем существенно больше данного значения. В разрабатываемом алгоритме данный параметр будет составлять 14400 отсчётов, что соответствует количеству значений одного параметра SV-потока за 1 секунду.

Определение возникновения неисправности будет происходить посредством расчёта угла наклона прямой, полученной в результате линейной аппроксимации сигнала, зафиксированного в окне. Если значение данного показателя изменяется на 10% относительно предыдущего, то можно сделать вывод о наличии неисправности в данном оборудовании.

Для аппроксимирования сигнала интегрированных значений аппроксимирующей ветви 9 уровня разложения, будем использовать метод наименьших квадратов суть которого сводится к минимизации суммы квадратов отклонений между отсчётами. Функция, которую нужно минимизировать, описывается следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - (kx_i + b))^2, \quad (27)$$

где n – длина сигнала; y_i – зависимая переменная; x_i – независимая переменная; k – весовой коэффициент; b – свободный коэффициент.

Данный метод сводится к решению дифференциального уравнения от двух переменных. Решением данного уравнения будет система вида:

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{pmatrix}. \quad (28)$$

Значения коэффициентов находятся следующим образом:

1) Весовой коэффициент:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (29)$$

2) Свободный коэффициент:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - k \sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (30)$$

В результате получим уравнение прямой, где весовой коэффициент будет выступать в роли качественного показателя, по характеру изменения которого будет сделан вывод о наличии МКЗ.

Определение повреждённой фазы будет проводиться после выявления МКЗ, путём расчёта действующих значений токов фаз на периоде 100 мс, а затем сравнения значений, для выявления повреждённой обмотки.

Для расчёта действующих значений токов используем метод нахождения среднеквадратичного:

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i^2}, \quad (31)$$

где n – количество отсчётов; s_i – значение сигнала.

Алгоритм в виде блок-схемы представлен на Рисунке 13.

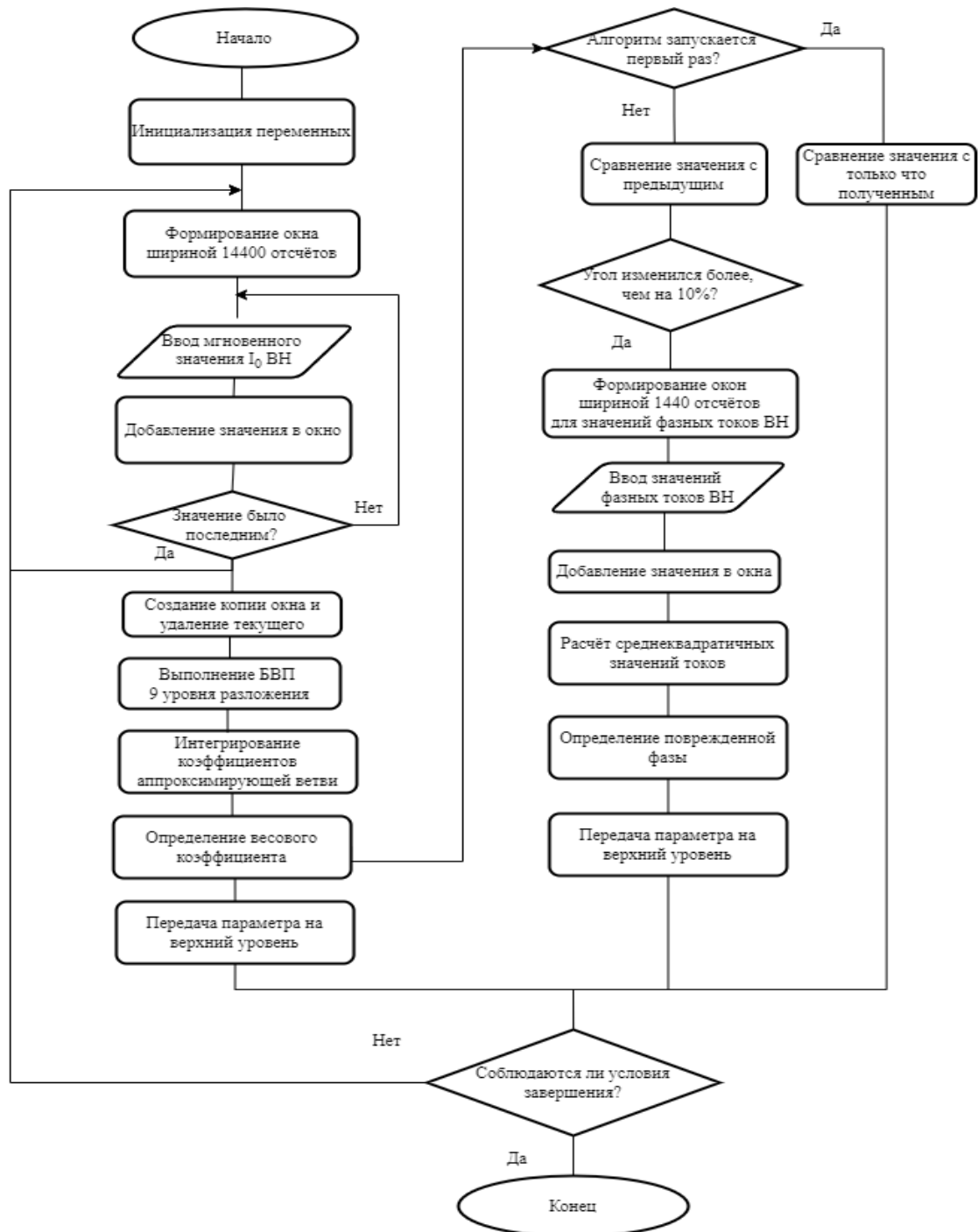


Рисунок 13 – Алгоритм определения МКЗ

3.3 Разработка алгоритма определения внутренних неисправностей трансформатора

3.3.1 Создание математической модели

Данный тип неисправности не проявляется с той степенью скорости, как, например, при замыканиях и пробоях, и является причиной их возникновения. Сложность в определении обусловлена малой динамикой развития в совокупности с отсутствием явного проявления в показаниях величин токов и напряжений.

Согласно [40], при деформациях обмоток, параметры полного сопротивления короткого замыкания $Z_{кз}$ увеличиваются вплоть до 20%. Данное значение возьмём в качестве максимального диапазона изменений при построении модели.

Для имитации изменения параметров схемы замещения произвольного трансформатора из группы, в предыдущую модель добавим блок, изменяющий параметры активного и индуктивного сопротивлений обмотки низкого напряжения. Модель представлена на рисунке 14.

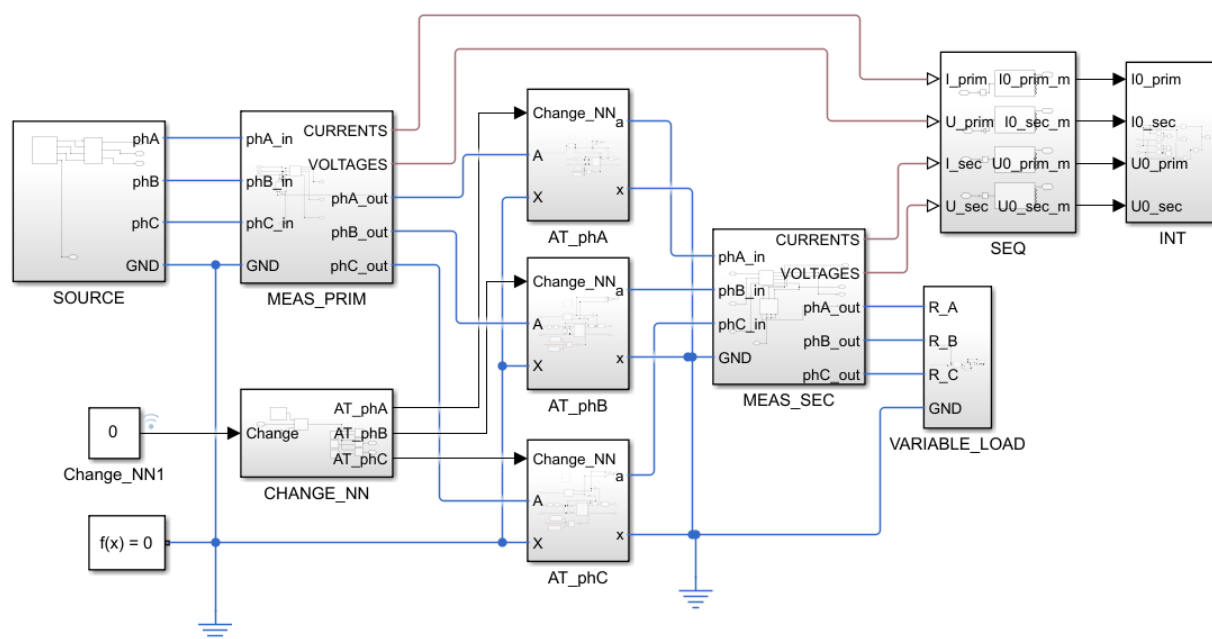


Рисунок 14 – Модель для имитирования внутренних неисправностей трансформатора

3.3.2 Получение и обработка результатов моделирования

Чтобы определить наиболее информативные параметры, которые доступны в составе цифрового потока, было смоделировано резкое изменение параметров на 20%. Длительность симуляции выставим равной 1 минуте.

Изменения параметров схемы замещения трансформатора, в данном случае, проявляются на значениях показаний токов и напряжений нулевой последовательности стороны НН, а также токов нулевой последовательности стороны ВН.

Проявление неисправности на показаниях, как токов, так и напряжений уровня НН, позволяет сделать вывод о том, что график рассчитанных мгновенных значений мощности нулевой последовательности будет более информативен. Сигналы указанных величин приведены на рисунках 15 и 16.

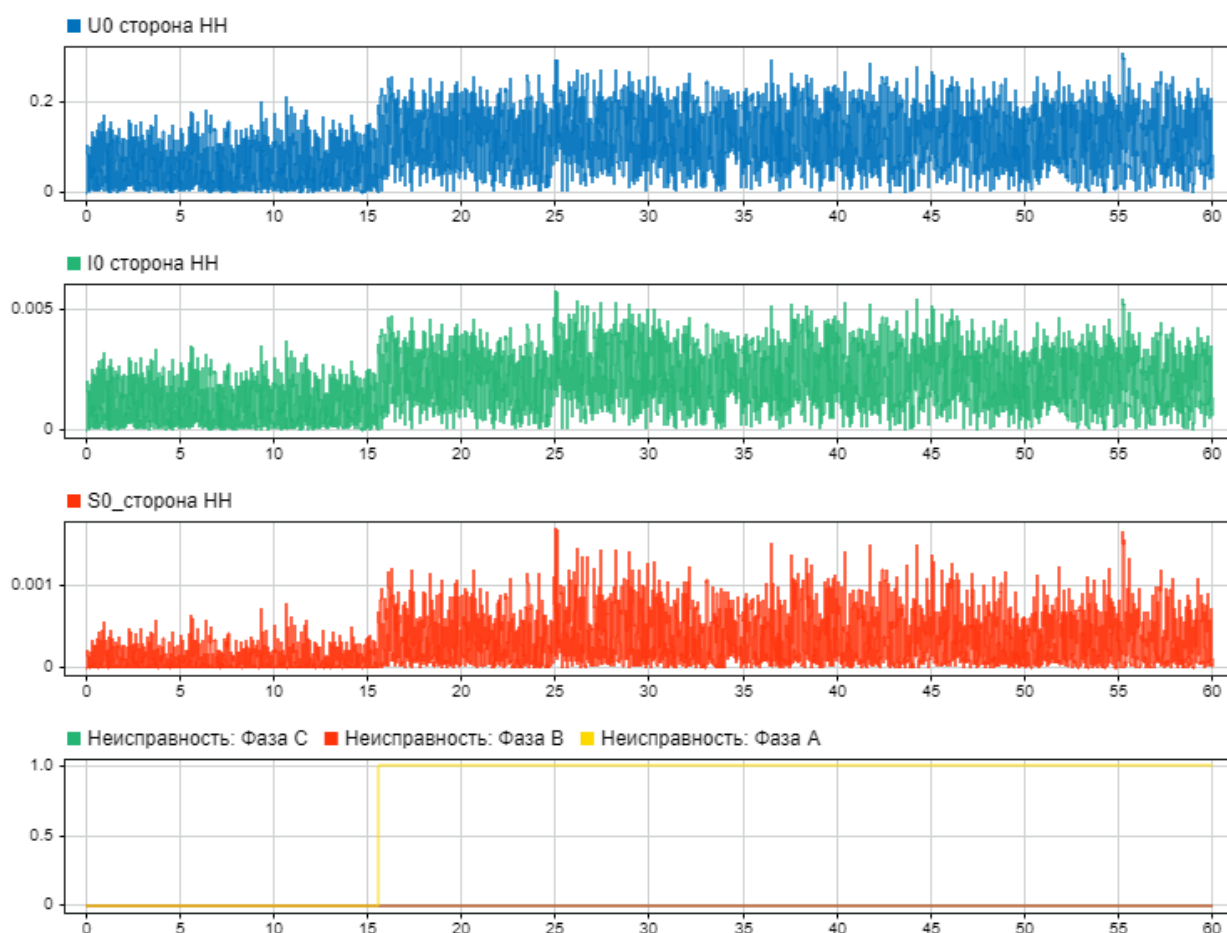


Рисунок 15 – I0, U0, S0 стороны НН, при возникновении неисправности



Рисунок 16 – I0, U0, S0 стороны ВН, при возникновении неисправности

Как можно наблюдать, в показаниях мощности нулевой последовательности для стороны ВН, явной корреляции с возникшей неисправностью не обнаружено.

По аналогии с алгоритмов определения МКЗ, ввиду того что неисправность определяется анализом амплитуды, более показательными, будут проинтегрированные значения упомянутых параметров.

В данном случае произведём интегрирование величин нулевой последовательности, непосредственно поступающих в составе цифрового потока и результата их произведения.

Рассмотрим на примере проинтегрированных значений тока, напряжения и мощности нулевой последовательности, для предыдущего опыта. Графики для сторон НН и ВН представлены на рисунке 17.

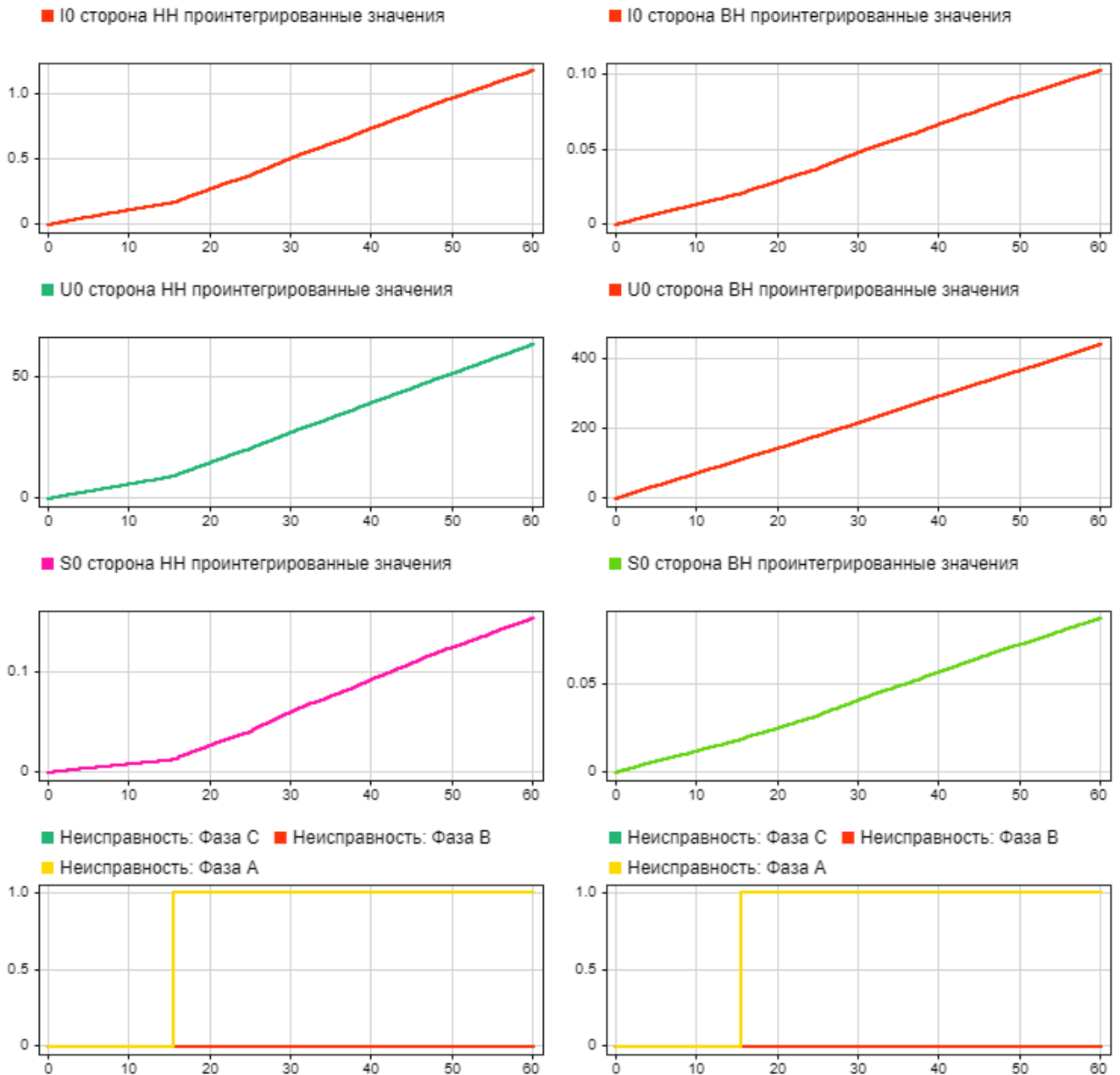


Рисунок 17 – Проинтегрированные значения I0, U0, S0 сторон НН и ВН

На графиках отчётливо видно, что проинтегрированные значения представляют собой линейный тренд, угол наклона которого меняется в момент возникновения аварии.

Характер проявления на графике мощности нулевой последовательности на стороне НН более ярко выражен, чем на стороне ВН, ввиду отсутствия влияния аварийной ситуации на уровень высшего напряжения. Этот факт используем для синтеза сигнала, который будет отображать внутренние изменения в трансформаторе.

Параметр, который будет наиболее явно отображать текущий режим работы, представляет собой отношение проинтегрированного значения мощности нулевой последовательности стороны ВН к стороне НН. Схожий характер будет иметь и график отношения проинтегрированных значений напряжений нулевой последовательности сторон ВН и НН. Для случая мгновенного изменения графики представлены на рисунке 18.

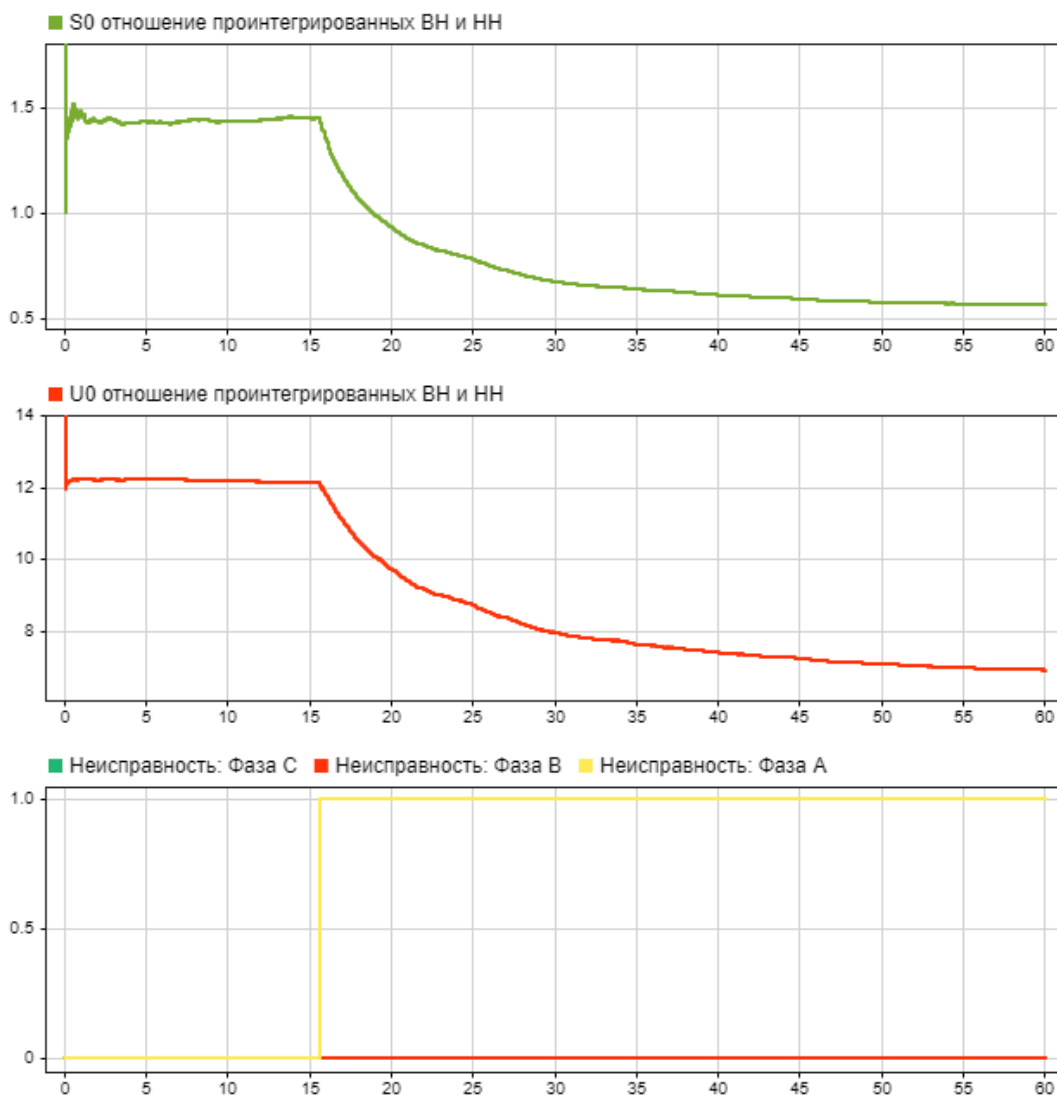


Рисунок 18 – График отношений, проинтегрированных U_0 , S_0 сторон ВН и НН

На графиках достаточно наглядно запечатлён момент изменения параметров схемы замещения трансформатора. Пик в начальных участках обусловлен малыми значениями рассчитываемых величин и результатами операции деления, для анализа во внимание данный участок не берётся.

Проведём опыт постепенного изменения параметров схемы замещения трансформатора и анализ сигналов, синтез которых был описан ранее. Сопротивление $z_{кз}$ будет изменяться раз в 4 секунды на 0,1 %.

Графики отношений проинтегрированных значений напряжений и мощностей нулевой последовательности приведены на рисунке 19.

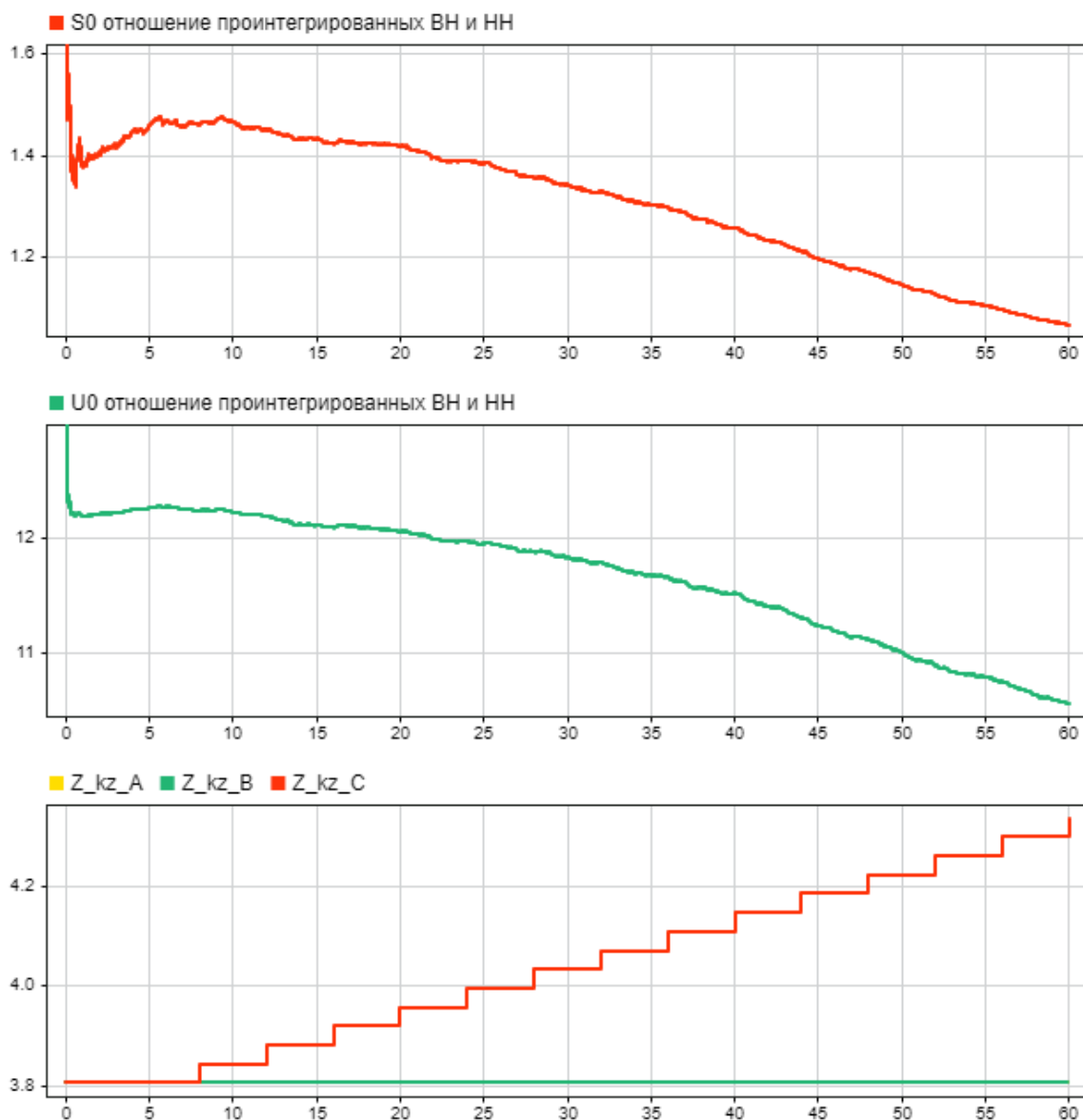


Рисунок 19 – Графики отношений проинтегрированных U_0 , S_0

Как можно наблюдать, явного проявления развивающейся неисправности здесь не зафиксировано. Сделать заключение о развивающейся неисправности, можно исходя из характера тренда сигнала, на графиках явно

можно определить, что значение отношений проинтегрированных величин постепенно снижается. В данном случае, величина изменения параметров схемы замещения составила 1,3 %.

Также можно отметить, что график отношений проинтегрированных значений напряжений нулевой последовательности не содержит артефактов в начале, который может быть ошибочно интерпретирован, как уменьшение параметра $z_{кз}$. Данный факт обуславливает выбор этого параметра для дальнейшего анализа.

Для определения текущего состояния оборудования и выявления развивающейся неисправности, указанный выше параметр необходимо наблюдать в долговременном масштабе.

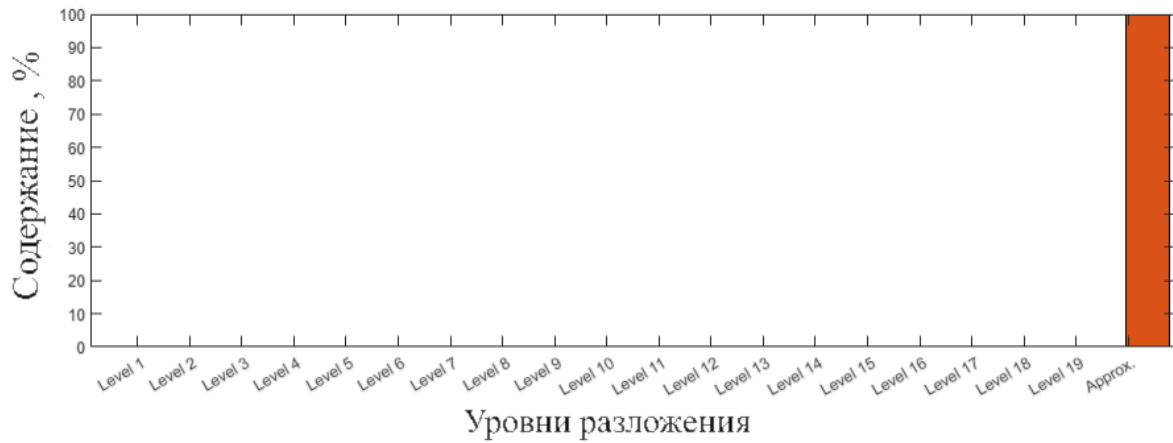
Вейвлет-преобразование полученных величин, в данном случае, актуально, в первую очередь, в качестве метода сжатия сигнала, для передачи в систему поддержки принятия решений и дальнейшего анализа посредством нейронных сетей, методов машинного обучения и других более совершенных методов обработки.

Максимальный уровень БВП для сигнала с частотой дискретизации 14400 Гц, длительностью 1 минуту равен 19. Для выполнения преобразования выберем вейвлет семейства Добеши $db4$. Процедуру вейвлет-преобразования выполним в пакете Wavelet Toolbox.

Исходя из характера изменения сигнала, который можно определить, как последовательное накопление значений, позволяет сделать вывод о том, что почти вся энергия содержится в аппроксимирующей составляющей. Но, синтезированный из аппроксимирующих коэффициентов максимального уровня разложения, сигнал не будет содержать информации, отображать характер изменений в работе оборудования.

Гистограмма и график иллюстрирующие данный момент представлены на рисунке 20.

Распределение по уровням разложения



Синтезированный сигнал

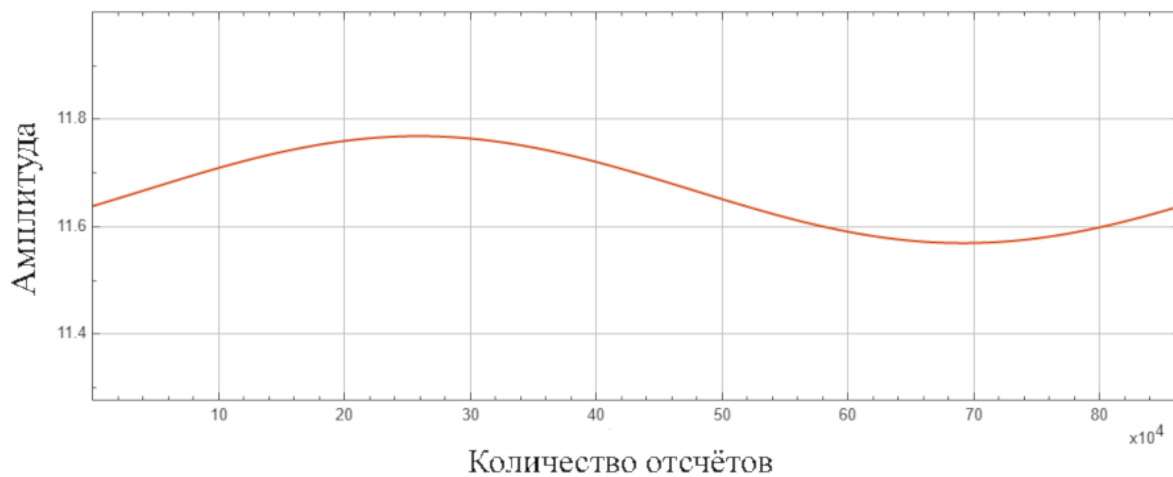


Рисунок 20 – Распределение энергии и аппроксимирующие коэффициенты 19 уровня

Опытным путём определили, что сигнал, синтезированный из коэффициентов разложения с 14 по 19 уровень, в совокупности с аппроксимирующими коэффициентами, с достаточной степенью точности описывает поведение сигнала. Их будем использовать для передачи на верхний уровень.

Ввиду того, что для синтеза сигнала используются все уровни начиная с 14, то можно сказать, что сигнал с достаточной степенью точностью будет определяться аппроксимирующими коэффициентами, 13 уровня разложения.

Исходный и синтезированный сигналы отношения проинтегрированных значений напряжения нулевой последовательности сторон НН и ВН представлены на рисунке 21.

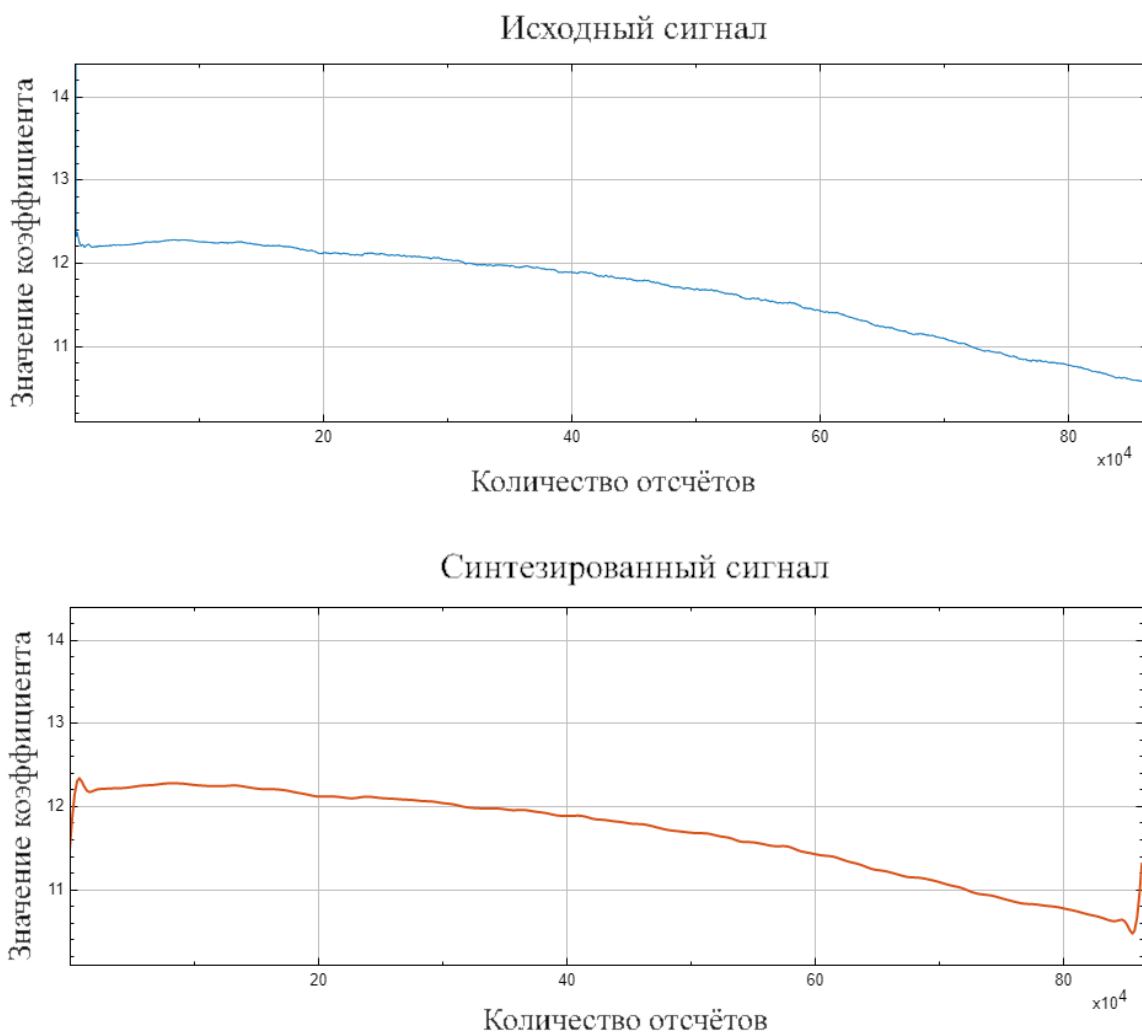


Рисунок 21 – График исходного и восстановленного сигналов

Длина ряда аппроксимирующих коэффициентов 13 уровня разложения вейвлетом Добеши db4 составляет 112 значений, по сравнению с исходным сигналом количество значений коэффициентов меньше в 7714 раз.

На восстановленном сигнале явно наблюдаются проявления граничных условий. Ширину участков где данные недостоверны примем равной 5% с начала и 5% с конца сигнала. Учитывая длину ряда коэффициентов недостоверными будем считать 6 коэффициентов в начале ряда и 6 коэффициентов в конце. Чтобы исключить влияние данного момента на достоверность сигнала, при его восстановлении, и соблюдения условия непрерывности, в алгоритме будем использовать метод перекрывающихся окон, в которых будем фиксировать данные для последующего БВП.

3.3.3 Составление алгоритма получения и передачи сигнала для анализа внутренних неисправностей трансформатора

Необходимая ширина окна выбрана исходя из того, что, результат в виде ряда аппроксимирующих коэффициентов 13 уровня разложения будет отдаваться на верхний уровень 1 раз в минуту. Анализ и выдача результата должны быть непрерывными и не содержать пропущенных участков.

В качестве входных данных будем использовать значения напряжений нулевой последовательности сторон ВН и НН трансформатора, которые необходимо проинтегрировать и найти результат от операции деления их друг на друга.

Результат деления далее будет формировать наполнение окна, для последующего БВП вейвлетом Добеши $db4$ и формирование фрейма, состоящего из аппроксимирующих коэффициентов 13 уровня разложения.

Ввиду того, что на начальных и конечных участках имеются искажения обусловленные граничными условиями БВП и малыми начальными значениями величин, приняли первые и последние 6 значений ряда коэффициентов разложения неинформативными. Необходимое минимальное перекрытие сигнала составляет 10%. Последние 10% отсчётов значений отношения величин, которые имеют начальную частоту дискретизации, добавляются в начало нового окна.

Необходимо отметить, что, при данном способе, для соблюдения условия непрерывности, период выдачи также сокращается на 10%. Для того, чтобы выдача коэффициентов происходила 1 раз в минуту, необходимо увеличить размер окна на 86400 значений.

После создания нового окна, постепенно добавляются значения, рассчитанные с помощью операций интегрирования и нахождения величин отношения. При заполнении окна, проинтегрированные значения обнуляются и результат последующих операций будет добавляться в новое окно.

Алгоритм в виде блок-схемы представлен на рисунке 22.

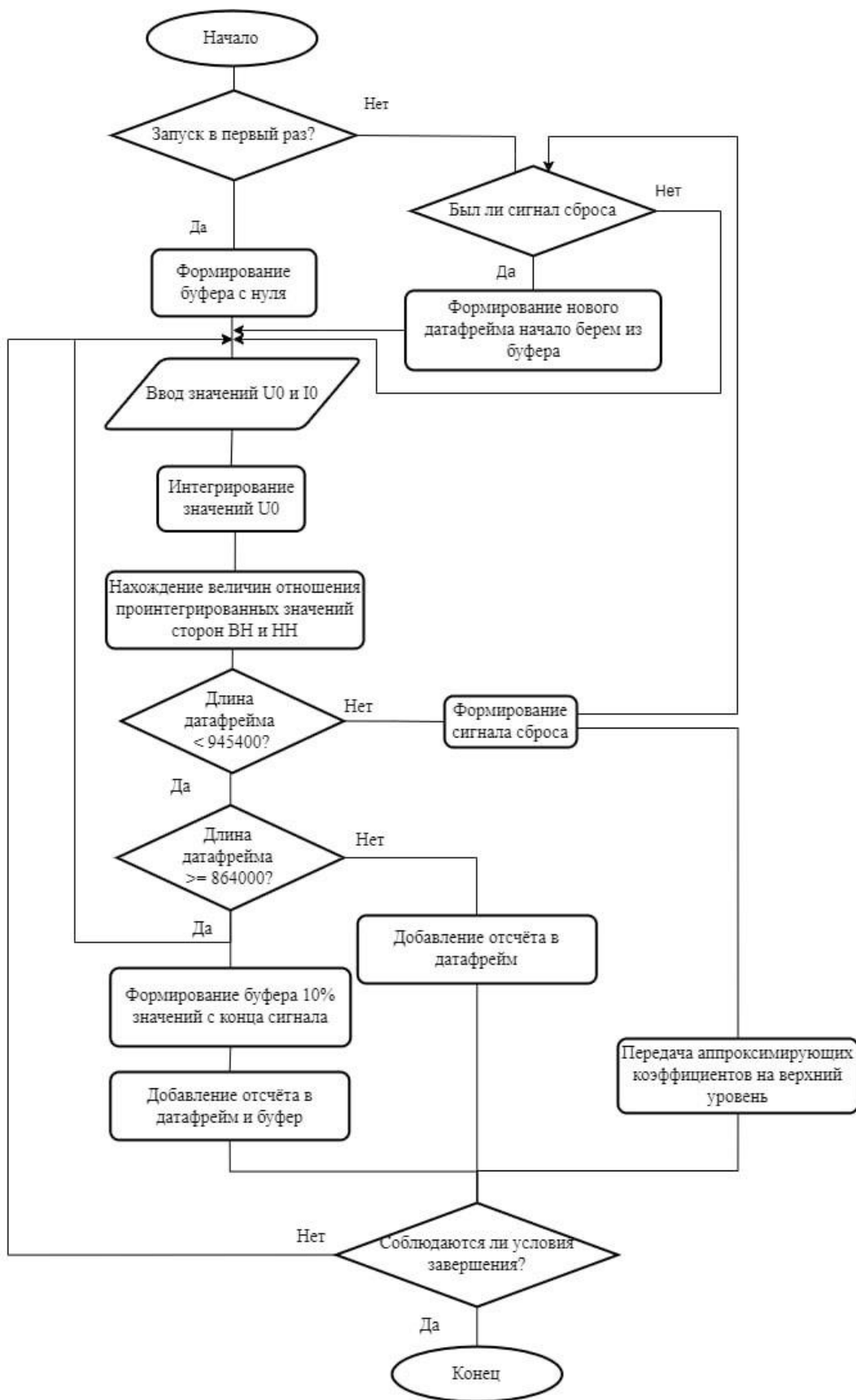


Рисунок 22 – Алгоритм получения и передачи сигнала для анализа внутренних неисправностей трансформатора

3.4 Выводы

В данной главе разработаны алгоритмы анализа параметров работы трансформаторного оборудования цифровой подстанции.

Описанный процесс разработки алгоритма может быть использован в качестве примера для различных видов оборудования цифровой подстанции.

Возможные неисправности трансформатора были выделены в две категории по характеру проявления. Для каждого случая была построена математическая модель, проведено компьютерное моделирование и выбран характерный параметр, по которому можно определить наличие или развитие неисправности. Алгоритмы обработки временного ряда полученных значений основаны на применении быстрого дискретного вейвлет-преобразования.

Для первой категории, рассмотрена ситуация межфазного замыкания в обмотке низкого напряжения. Предложенный алгоритм корректно работает при малых значениях количества замкнутых витков и может быть использован как дополнительный, к основным типам защиты оборудования, метод. В работе проанализирована и доказана эффективность анализа при значениях замкнутых витков ниже 10%.

Для определения развивающихся неисправностей, БВП применяется в первую очередь для компактного представления сигнала и сжатия временного ряда параметра, по которому можно, при анализе в долговременном масштабе, определить развитие внутренних неисправностей трансформатора.

Результатом алгоритма является тот факт, что длина коэффициентов разложения в данном случае в 7714 раз меньше исходного сигнала, что позволяет проводить наблюдение за оборудованием в долговременной перспективе, с использованием методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами выпускной квалификационной работы магистра являются следующие:

1) Обоснованы актуальность и значимость задачи развития методов мониторинга оборудования цифровой подстанции и проведён анализ проблем, связанных с текущим состоянием основного фонда силового оборудования подстанций;

2) Рассмотрены существующие и перспективные методы неразрушающего контроля оборудования; обоснована необходимость разработки алгоритмов основанных на частотном анализе временных рядов сигналов тока и напряжения, полученных с шины процесса цифровой подстанции;

3) Проведён анализ существующих методов обработки временных рядов, применительно к проблематике работы обосновано использование метода быстрого вейвлет-преобразования;

4) Выбран вид оборудования цифровой подстанции, требующий разработки алгоритмов анализа параметров работы, проведён анализ и выделение категорий основных причин выхода из строя, которые служат основанием разработки алгоритма;

5) Составлены математические модели для каждой категории неисправностей, предложены методы обработки и получения качественных параметров, определяющих наличие неисправности;

6) Предложены алгоритмы анализа параметров работы для двух категорий неисправностей оборудования;

7) Разработан алгоритм для неисправностей, характеризующимися резким изменением электрических величин, который позволяет повысить точность детектирования межфазных замыканий в обмотках трансформатора, при количестве короткозамкнутых витков в диапазоне 5-10%;

8) Разработан алгоритм для неисправностей, характер проявления которых растянут во времени, доказавший эффективность в более компактном представлении сигнала, для анализа временного ряда в долговременном масштабе, позволяющий реализовать оптимизированную по скорости и объёму данных передачу параметров сигнала в системы поддержки принятия решений, в том числе с использованием методов машинного обучения, объём данных сжат в 7714 раз относительно исходного сигнала.

В качестве дальнейших исследований, перспективным является апробация и совершенствование разработанных алгоритмов на основе данных с реальных цифровых подстанций при наличии различных дефектов силового оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023 [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency, 2023. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (Дата обращения: 29.05.2024).

2. IEA. Digitalisation and Energy [Электронный ресурс]. – Paris: IEA, 2017. – URL: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (Дата обращения: 29.05.2024).

3. IEA. Digitalisation [Электронный ресурс]. – Paris: IEA, 2023. – URL: <https://www.iea.org/energy-system/decarbonisation-enablers/digitalisation> (Дата обращения: 29.05.2024).

4. О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы: указ Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41919> (Дата обращения: 29.05.2024).

5. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р [Электронный ресурс]. – URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (Дата обращения: 29.05.2024).

6. Концепция Цифровая трансформация-2030 [Электронный ресурс]. – М.: Россети, 2020. – URL: https://www.rosseti.ru/upload/iblock/582/rajp59pvuvjsx5ztr38jjz2q98o8rkbd/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (Дата обращения: 29.05.2024).

7. Годовой отчёт ПАО Россети за 2022 год [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rosseti.ru/shareholders-and-investors/disclosure-of->

information/annual-reports/index.php?sphrase_id=78924 (Дата обращения: 29.05.2024).

8. Лобов Б. Н., Лызарь И. О., Левчук В. Э. Понятие "цифровая подстанция" // Молодой исследователь Дона. – 2020. – № 3 (24). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ponyatie-tsifrovaya-podstantsiya> (Дата обращения: 30.03.2024).

9. Оценка технического состояния оборудования электростанций и сетей (по наработке и срокам службы) [Электронный ресурс] // www.ti-ees.ru : [сайт]. — URL: <https://www.ti-ees.ru/functioning/analytics/time/> (дата обращения: 03.06.2024).

10. СТО 56947007-29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС [Электронный ресурс] / ПАО «Россети». — URL: <https://rosseti.ru/upload/iblock/545/t0vad6zka3qcfwt4dqjpv1v3ubtqaffw.pdf> (Дата обращения: 29.05.2024).

11. СТО 56947007-25.040.30.309-2020. Корпоративный профиль МЭК 61850 [Электронный ресурс] / ПАО «ФСК ЕЭС». — URL: <https://docs.cntd.ru/document/565982170> (Дата обращения: 29.05.2024).

12. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. — М.: Стандартинформ, 2019. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200123257?ysclid=lwxzvazmhp902500218> (Дата обращения: 01.04.2024).

13. Silin N. V., Ignatiev N. I., Korovkin N. V., Filimonov I. V. High-voltage equipment electromagnetic control // 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Brugge, Belgium, 2013. — pp. 850-853.

14. Silin N. V., Korovkin N. V., Hayakawa M. High-voltage equipment electromagnetic spectrum study for estimation of its technical state and prediction

of the residual life // 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, Hiroshima, Japan, 2013. – pp. 522-524.

15. Silin N. V., Ignatev N. I. and Kalmykov D. V. Advanced electromagnetic control method of transformer equipment // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 2017. – pp. 1-6. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076269.

16. D. Zhang, L. Wang, X. Hu, Z. Zhang, H. Jia, S. Chen. Detection of Transient Overvoltage and Analysis of Insulation State of Power Equipment // 2022 International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICCBE), Yunlin, Taiwan, 2022. – pp. 256-260. – DOI: 10.1109/ICCBE56101.2022.9888193.

17. Zhang J., Xu H., Wang X., Ding Y., Dai X., Hao J. Mechanical Defect Field Detection for Operational GIS Equipment Based on Vibration Signal Analysis // 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021. – pp. 1244-1248. – DOI: 10.1109/ACPEE51499.2021.9436830.

18. Голенищев-Кутузов А. В., Иванов Д. А., Потапов А. А., Кротов В. И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2019. – №4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-beskontaktnyh-metodov-diagnostiki-vysokih-elektricheskikh-poley> (Дата обращения: 04.04.2024).

19. Li J. Transformer Noise Monitoring System // 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC): Материалы конференции, Chongqing, China, 2020. – pp. 1350-1353. – DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085052.

20. Yu J., Yang Q., Cheng Q., Yuan L. Research on Noise Monitoring System of Intelligent Substation // 2021 International Conference on Artificial Intelligence, Big Data, Computing and Data Communication Systems (icABCD): Материалы

конференции, Durban, South Africa, 2021. – pp. 1-7. – DOI: 10.1109/icABCD51485.2021.9519364.

21. Бочкарев И. В., Брякин И. В. Разработка нового способа диагностики электромагнитного привода силовых и коммутационных механизмов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2020. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-novogo-sposoba-diagnostiki-elektromagnitnogo-privoda-silovyh-i-kommutatsionnyh-mehanizmov> (Дата обращения: 05.04.2024).

22. Li H. Thermal Fault Detection and Diagnosis of Electrical Equipment Based on the Infrared Image Segmentation Algorithm // Advances in Multimedia. – 2021. – pp. 1-7. – DOI: 10.1155/2021/9295771.

23. Zhao Z., Feng S., Zhai Y., Zhao W., Li G. Infrared Thermal Image Instance Segmentation Method for Power Substation Equipment Based on Visual Feature Reasoning // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – vol. 72. – Art no. 5029613. – pp. 1-13. – DOI: 10.1109/TIM.2023.3322998.

24. Bian J., Hui X., Zhao X., Tan M. A Novel Monocular-Based Navigation Approach for UAV Autonomous Transmission-Line Inspection // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018. – pp. 1-7. – DOI: 10.1109/IROS.2018.8593926.

25. Wang J., Zhang Q. Visual Defect Detection for Substation Equipment Based on Joint Inspection Data of Camera and Robot // 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, China, 2020. – pp. 491-495. – DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141647.

26. СТО 56947007-29.200.10.011-2008. Стандарт организации ОАО "ФСК ЕЭС". Трансформаторы силовые, автотрансформаторы и реакторы. Автоматизированная система мониторинга и технического диагностирования. Общие технические требования. – Утвержден и введен в действие 2008, с изменениями на 2019. – М.: ОАО "ФСК ЕЭС", 2021. – URL:

<https://www.rosseti.ru/upload/iblock/790/0gsgs8tkcбep8zofg7218ppgpl62pkmv.pdf>
f (Дата обращения: 03.04.2024).

27. СТО 56947007-29.240.35.270-2019. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Автоматизированная система мониторинга и технического диагностирования КРУЭ. Общие технические требования. – Утвержден и введен в действие 2019. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2021. – URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/8ed/c9fcyljyui1k08il8ia08bf4p8muafwn.pdf>
(Дата обращения: 03.04.2024).

28. СТО 56947007-29.060.20.243-2017. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Системы мониторинга КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена 110 кВ и выше. Типовые технические требования. – Утвержден и введен в действие 2017. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2021. – URL: <https://www.rosseti.ru/upload/iblock/b4d/bbth1dyijqjk6tyhs7tmq2o7r6xqd5b0.pdf>
(Дата обращения: 03.04.2024).

29. Хлебцов А. П., Зайнутдинова Л. Х., Шилин А. Н. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2020. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-metodov-i-ustroystv-diagnostiki-silovogo-elektrooborudovaniya-transformatornyh-podstantsiy>

30. Jackson K., MacNamara R. Advanced IEC 61850 monitoring and fault finding of railway traction power & substation automation systems // 16th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2022), Hybrid Conference, Newcastle, UK, 2022. – pp. 385-392. – DOI: 10.1049/icp.2022.0971.

31. Zhmatov D. V. Technical Condition Monitoring of Electric Equipment in the Digital Substation // 2020 2nd International Conference on Control Systems,

Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2020. – pp. 983-986. – DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280800.

32. Huang L., Liang Y., Huang H., Zhou J. Digital Twin Modeling and Operating State Assessment of Substation Equipment // 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Chongqing, China, 2021. – pp. 159-163. – DOI: 10.1109/CEEPE51765.2021.9475674.

33. Lak P. Y., Key S., Yoon S.-M., Nam S.-R. Digital Twin Application for the Evaluation of Protection Performance in IEC-61850-Based Digital Substations // 2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Xuchang, China, 2023. – pp. 68-72. – DOI: 10.1109/APAP59666.2023.10348444.

34. Xue G., He B., Li X., Xiaokaiti M., Ma W. Research on the Digital Model of Substation Inspection System Based on Digital Twin Technology // 2023 International Conference on Ambient Intelligence, Knowledge Informatics and Industrial Electronics (AIKIE), Ballari, India, 2023. – pp. 1-6. – DOI: 10.1109/AIKIE60097.2023.10390366.

35. Сюрдо А. И., Бирюков Д. Ю. Физические основы измерений: учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 143 с. – ISBN 978-5-7996-0909-2.

36. Жмудь В. А. Теорема Котельникова-Найквиста-Шеннона, принцип неопределённости и теория относительности // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – № 1 (7). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teorema-kotelnikova-nayvista-shennona-printsip-neopredelennosti-i-teoriya-otnositelnosti> (дата обращения: 01.06.2024).

37. Акимов П. А., Мозгалева М. Л. Некоторые элементы кратномасштабного вейвлет-анализа. Часть 1. Понятие о вейвлетах и кратномасштабном вейвлет-анализе // Вестник МГСУ. – 2012. – № 7. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-elementy-kratnomasshtabnogo-veyvlet->

analiza-chast-1-ponyatie-o-veyvletah-i-kratnomasshtabnom-veyvlet-analize-1
(дата обращения: 15.04.2024).

38. Семенов В. И. Сравнение алгоритма кратномасштабного анализа изображений в частотной области с алгоритмом Малла // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 59. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-algoritma-kratnomasshtabnogo-analiza-izobrazheniy-v-chastotnoy-oblasti-s-algoritmom-malla> (дата обращения: 01.06.2024).

39. Антонов В. О. Анализ статистики технологических отказов функциональных узлов силовых трансформаторов 35 кВ и выше // Вестник науки. – 2024. – № 1 (70). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-statistiki-tehnologicheskikh-otkazov-funktsionalnyh-uzlov-silovyh-transformatorov-35-kv-i-vyshe> (дата обращения: 25.04.2024).

40. Хренников А. Ю. Обнаружение деформаций обмоток силовых трансформаторов средствами технической диагностики после коротких замыканий // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2009. – № 3-4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obnaruzhenie-deformatsiy-obmotok-silovyh-transformatorov-sredstvami-tehnicheskoy-diaagnostiki-posle-korotkih-zamykaniy> (дата обращения: 29.04.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

ЦПС I, II И III АРХИТЕКТУРЫ

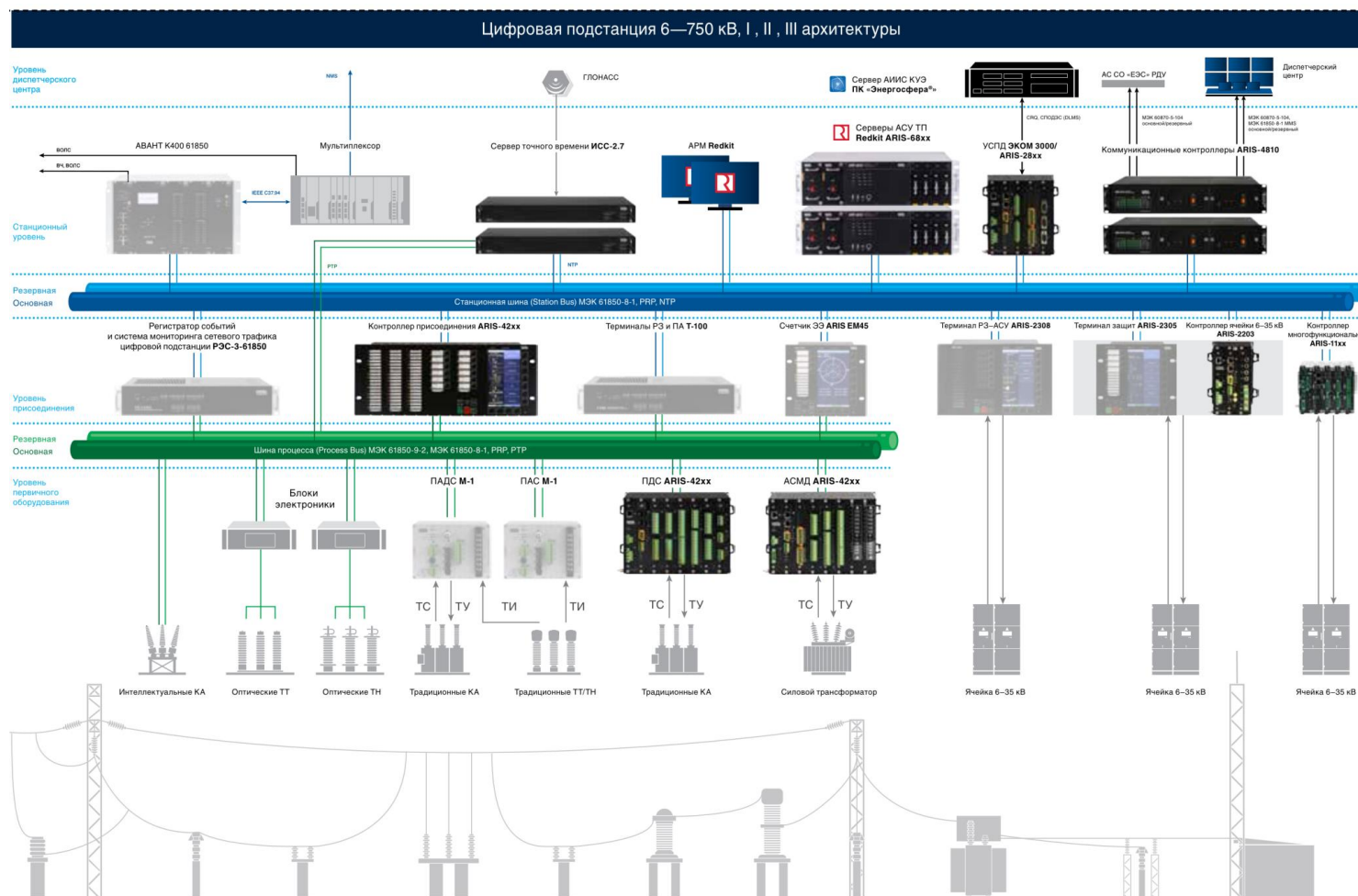


Рисунок А1. ЦПС I, II и III архитектуры