

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

Факультет энергетический
Кафедра энергетики
Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) образовательной программы
Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

Н.В. Савина

« 23 » 06 20 23

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Разработка цифрового двойника распределительного устройства напряжением 10 кВ с использованием системы SCADA фирмы Siemens

Исполнитель
студент группы 142-ом


подпись, дата

О.Ю. Саяпин

Руководитель
профессор, канд.техн.наук


подпись, дата

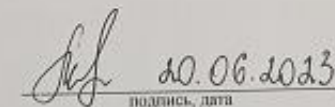
Ю.В. Мясоедов

Руководитель
научного содержания
программы магистратуры
профессор, д-р техн. наук


подпись, дата

Н.В. Савина

Нормоконтроль
старший преподаватель
кафедры энергетики


подпись, дата

Л.А. Мясоедова

Рецензент


подпись, дата

У.В. Калыгин

Благовещенск 2023

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

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

Н.В. Савина

« 09 » 01 20 23

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Саякина Олега Сергеевича

1. Тема выпускной квалификационной работы:

Разработка цифрового двойника распределительного устройства напряжением 10 кВ с автоматизированной системой SCADA
(утверждено приказом от 27.02.2023 № 442)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 20.06.2023

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: коммерческое распределительное устройство 10 кВ, оборудование системы мониторинга переходных процессов

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

1- Анализ задач разработки цифровых двойников; 2- разработка цифр. двойника ЧРУ 10 кВ; 3- разраб. цифр. двойника (график)

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) чертежей - 6 шт., таблицы - 12 шт., графиков - 44 шт., схемы - 7 шт.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов)

7. Дата выдачи задания

Руководитель выпускной квалификационной работы: Масляков Н.В.
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата): _____
(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 134 с, 11 формул, 123 рисунка, 12 таблиц, 51 источников, 4 приложения, 6 листов.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК, СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ, ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР, MATLAB, SIMULINK, Т-ОБРАЗНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ, ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА, ОПЫТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ, SCADA, SIEMENS, WINCC OA, ТЕРМИНАЛ РЗА SIPROTEC, КРУ 10КВ, МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Разработка цифровых двойников на сегодняшний день — это актуальная тема в электроэнергетике, которая позволит повысить эффективность работы энергосистемы, улучшить качество энергоснабжения, сократить затраты на обслуживание и ремонт оборудования и повысить безопасность работы системы.

Целью работы является получить готовые к работе экземпляры цифровых двойников КРУ 10кВ и двухобмоточного трансформатора, исследовать методы создания цифровых двойников и исследовать их практическую значимость для энергетической системы России.

Основные результаты работы:

1. Разработан и получен готовый к работе экземпляр цифрового двойника КРУ 10 кВ.
2. Разработан и получен готовый к работе экземпляр цифрового двойника двухобмоточного трансформатора.

Новизной является то, что разработкой цифровых двойников в электроэнергетике является новым направлением, и применения цифровых двойников может быть новым подходом к управлению энергосистемами и решению большего числа проблем, с которыми сталкиваются при эксплуатации электроэнергетических систем во всем мире.

Практической значимостью является то, что в ходе работы были получены реальные прототипы цифровых двойников, методами, которые можно использовать на практике. Кроме того, разработанное программное обеспечение для создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов позволяет «бесшовно» интегрироваться к системам мониторинга переходных режимов, не допуская остановку технологического процесса и внедрения дорогостоящего оборудования.

При работе над выпускной квалификационной работы было опубликовано две статьи:

- «Идентификация математической модели объектов управления каскадного контура регулирования температуры водородного реактора установки получения гелия на Амурском газоперерабатывающем заводе»;

- «Описание спецификации цифровой подстанции и формирование SSD-файла».

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Анализ подходов к разработке и использованию цифровых двойников в электроэнергетике	13
1.1 Современное состояние электроэнергетических систем в мире	13
1.2 Понятие цифровой двойник в электроэнергетике	15
1.3 Анализ подходов к разработке цифровых двойников	18
1.4 Анализ протоколов передачи данных между реальным объектом и цифровой моделью	19
1.5 Зарубежный опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике	20
1.6 Отечественный опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике	23
1.7 Вывод по первой главе	25
2 Разработка цифрового двойника КРУ 10кВ в SCADA WinCC OA	27
2.1 Описание КРУ 10 кВ	28
2.2 Структурная схема цифрового двойника	31
2.3 Обмен данными между SCADA и терминалом РЗА	34
2.4 Обмен данными между цифровой моделью и терминалом РЗА	34
2.5 Обмен данными между SCADA и цифровой моделью	36
2.6 Разработка SCADA системы КРУ 10кВ	37
2.7 Разработка цифровой модели КРУ 10 кВ	45
2.8 Демонстрация работы цифрового двойника КРУ 10 кВ	50
2.9 Вывод по второй главе	57

3	Разработка программного обеспечения для создания цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов на основе системы мониторинга переходных режимов	59
3.1	Анализ проблем при эксплуатации силовых трансформаторов	59
3.2	Система мониторинга переходных режимов	62
3.3	Разработка программного обеспечения для работы с системой мониторинга переходных режимов и создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов	68
3.4	Цифровая модель двухобмоточного трансформатора в Simulink	70
3.5	Графическая оболочка программного обеспечения	77
3.6	Вывод по третьей главе	83
4	Создание цифрового двойника двухобмоточного трансформатора на основе системы мониторинга переходных режимов	84
4.1	Структурная схема цифрового двойника двухобмоточного трансформатора	85
4.2	Настройка цифрового двойника	87
4.3	Конфигурация оборудования системы мониторинга переходных режимов	87
4.4	Расчет параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора	89
4.5	Настройка программного обеспечения цифрового двойника	94
4.6	Демонстрация работы цифрового двойника	94
4.7	Эксперимент с активной нагрузкой	94
4.8	Эксперимент в режиме холостого хода	105
4.9	Эксперимент в режиме короткого замыкания	113
4.10	Вывод по четвертой главе	121

Заключение	123
Библиографический список	126
Приложение А	132
Приложение Б	133
Приложение В	134
Приложение Г	135

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

СМНР – система мониторинга переходных режимов;

ВН – напряжение на высокой стороне трансформатора;

НН – напряжение на низкой стороне трансформатора;

АСУ ТП – автоматизация систем управления технологическими процессами;

САУ – системы автоматического управления;

ПС – подстанция;

ЛЭП – линия электропередач;

ОРУ – открытое распределительное устройство;

КРУ – комплексное распределительное устройство;

РЗА – релейная защита и автоматика.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время электроэнергетические системы играют важную роль в жизни общества, обеспечивая надежное и эффективное энергоснабжение. Однако, в связи с быстрым развитием технологий и увеличением количества потребителей, возникают новые проблемы в управлении и мониторинге электроэнергетических систем. В этой связи, цифровые двойники становятся все более актуальными в электроэнергетике, позволяя создавать виртуальные модели электростанций, подстанций и сетей, а также прогнозировать спрос на электроэнергию и создавать виртуальные модели электромеханических устройств, таких как генераторы и трансформаторы. Это позволяет операторам системы быстро обнаруживать и устранять проблемы в работе оборудования, что может снизить вероятность аварий и повысить надежность работы электроэнергетических систем, проводить различные эксперименты и исследования без риска для реального оборудования.

Кроме того, одним из приоритетов государственной политики России является цифровизация экономики. В рамках данного приоритета одним из наиболее наукоемких является направление, связанное с созданием цифровых двойников технических систем, использование которых позволяет имитировать работу этих систем с высокой (до 95%) точностью совпадения результатов моделирования с реальными показателями [3].

Таким образом, разработка цифровых двойников — это актуальная тема в электроэнергетике, которая позволит повысить эффективность работы энергосистемы, улучшить качество энергоснабжения, сократить затраты на обслуживание и ремонт оборудования и повысить безопасность работы системы.

Цель работы. Целью работы является получить готовые к работе экземпляры цифровых двойников, исследовать методы создания цифровых двойников и исследовать их практическую значимость для энергетической системы России.

Объект исследования. Объектом исследования является комплектное распределительное устройство 10 кВ и двухобмоточный трансформатор.

Предмет исследования. Предметом исследования является цифровые двойники КРУ 10кВ и двухобмоточного трансформатора.

В выпускной квалификационной работе для достижения поставленной цели решены следующие основные частные научные задачи:

1. Анализ подходов к разработке цифровых двойников.
2. Анализ опыта разработки цифровых двойников за рубежом и в России.
3. Разработка структурной схемы цифрового двойника КРУ 10 кВ.
4. Разработка цифровой модели КРУ 10 кВ.
5. Разработка системы управления (SCADA) КРУ 10 кВ.
6. Тестирование работы цифрового двойника КРУ 10 кВ.
7. Разработка ПО для работы с СМПП и создание цифрового двойника двухобмоточного трансформатора.
8. Разработка цифровой модели двухобмоточного трансформатора.
9. Настройка оборудования СМПП.
10. Расчет параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора путем проведения опытов холостого хода и короткого замыкания.
11. Создание готового экземпляра цифрового двойника двухобмоточного трансформатора на основе СМПП.
12. Тестирование работы цифрового двойника двухобмоточного трансформатора при работе под нагрузкой, в режиме холостого хода, в режиме короткого замыкания.

Методы исследования. Основными применяемыми методами исследования в работе являются: теоретический анализ литературы по теме исследования, метод сравнительного анализа, математическое и физическое моделирование процесса, экспериментальный метод, включающий проведение физического эксперимента, анализ и обобщение полученных данных.

Новизна. Новизной является то, что разработкой цифровых двойников в электроэнергетике является новым направлением, и применения цифровых

двойников может быть новым подходом к управлению энергосистемами и решению большего числа проблем, с которыми сталкиваются при эксплуатации электроэнергетических систем во всем мире.

Практическая значимость. Главный акцент выпускной квалификационной работы сделан на практическую значимость, так как в ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены реальные прототипы цифровых двойников, методами, которые можно использовать на практике. Кроме того, разработанное программное обеспечение для создания цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов позволяет бесшовно интегрироваться к системам мониторинга переходных режимов, не допуская остановку технологического процесса и внедрения дорогостоящего оборудования.

Характеристика структуры. В данной выпускной квалификационной работе будет рассмотрена разработка цифровых двойников в электроэнергетике с целью повышения эффективности работы энергосистем и обеспечения их безопасности. Будут рассмотрены методы создания цифровых двойников с применением современных цифровых протоколов передачи данных регламентированных в стандартах МЭК 60840 и МЭК 61850 и системы мониторинга переходных электрических режимов (стандарт IEEE C37.118) их применение в энергосистемах и возможности для дальнейшего развития этой технологии, так же будут созданы цифровые двойники двухобмоточного трансформатора и комплектного распределительного устройства 10кВ.

Для реализации цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов было разработано программное обеспечение, которое имеет удобный и интуитивный понятный графический интерфейс, бесшовную интеграцию к системе мониторинга переходных режимов, с которой считывает параметры электрической сети.

При создании цифровых двойников использовалось оборудование, размещённое в лаборатории цифровой подстанции на кафедре энергетики в Амурском государственном университете:

- система мониторинга переходных электрических режимов (устройства синхронизированных векторных измерений ЭНИП 2 РМУ, концентратор данных векторных измерений ES-PDC, блок коррекции времени ЭНКС-2);

- комплектное распределительное устройство 10кВ с терминалами релейной защиты Siprotec компании Siemens.

Из программных продуктов использовалась среда разработки имитационного моделирования Matlab/Simulink и современная среда разработки SCADA систем компании Siemens WinCC OA.

Опубликованные статьи. При работе над выпускной квалификационной работы было опубликовано две статьи:

- «Идентификация математической модели объектов управления каскадного контура регулирования температуры водородного реактора установки получения гелия на Амурском газоперерабатывающем заводе» [1];

- «Описание спецификации цифровой подстанции и формирование SSD-файла» [2].

1 АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

1.1 Современное состояние электроэнергетических систем в мире

Электрическая сеть представляет собой инфраструктуру для передачи электроэнергии от производителя к потребителям на большие расстояния, охватывающую территорию страны или даже нескольких стран. На первых этапах развития электросетей применялась централизованная односторонняя передача электроэнергии, производимой из ископаемых топлив, таких как нефть, уголь и природный газ. Однако при сжигании этих топлив в атмосферу выбрасываются значительные объемы парниковых газов, включая диоксид углерода, диоксид серы, метан и другие, что сильно загрязняет окружающую среду. Электроэнергетика является крупнейшим источником выбросов парниковых газов среди всех секторов экономики. Чтобы снизить зависимость от традиционной генерации на основе ископаемых топлив и уменьшить выбросы углекислого газа в атмосферу, развиваются микросети, которые используют возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия, а также интеллектуальные сети и виртуальные электростанции.

Таким образом, крайне важно поддерживать текущую суть этих систем, чтобы гарантировать безопасность, улучшать процедуры контроля и автоматизировать процессы, а также поддерживать эти системы в актуальном состоянии. Энергосистема будущего станет основным источником экологически чистой энергии, доступной для всех и предлагающей управление на стороне повышенного спроса в дополнение к безопасности, надежности и отказоустойчивости. Управление сетью осуществляется посредством централизованной или децентрализованной связи по двусторонней системе передачи энергии.

Вместе с климатическими проблемами, мировые потребности в энергии растут с каждым днем. После 6-процентного увеличения в 2021 году, недавний анализ предсказывает, что мировое потребление энергии вырастет на 2,4 про-

цента в 2022 году. Это отражает средние темпы роста за десятилетие до эпидемии Covid-19. Ожидается, что рост потребления электроэнергии продолжится до 2023 года, однако прогноз осложняется текущей экономической ситуацией.

В прошлом году мир пережил множество аварий в электроэнергетике, что является для некоторых стран самым высоким показателем за последние три года [4].

На рисунке 1 приведена статистика аварий в энергосистемах мира за последние 30 лет в период с 1990 по 2022 год. Эти аварии делятся в течение длительного времени из-за необходимости ручного обслуживания и большого времени восстановления.

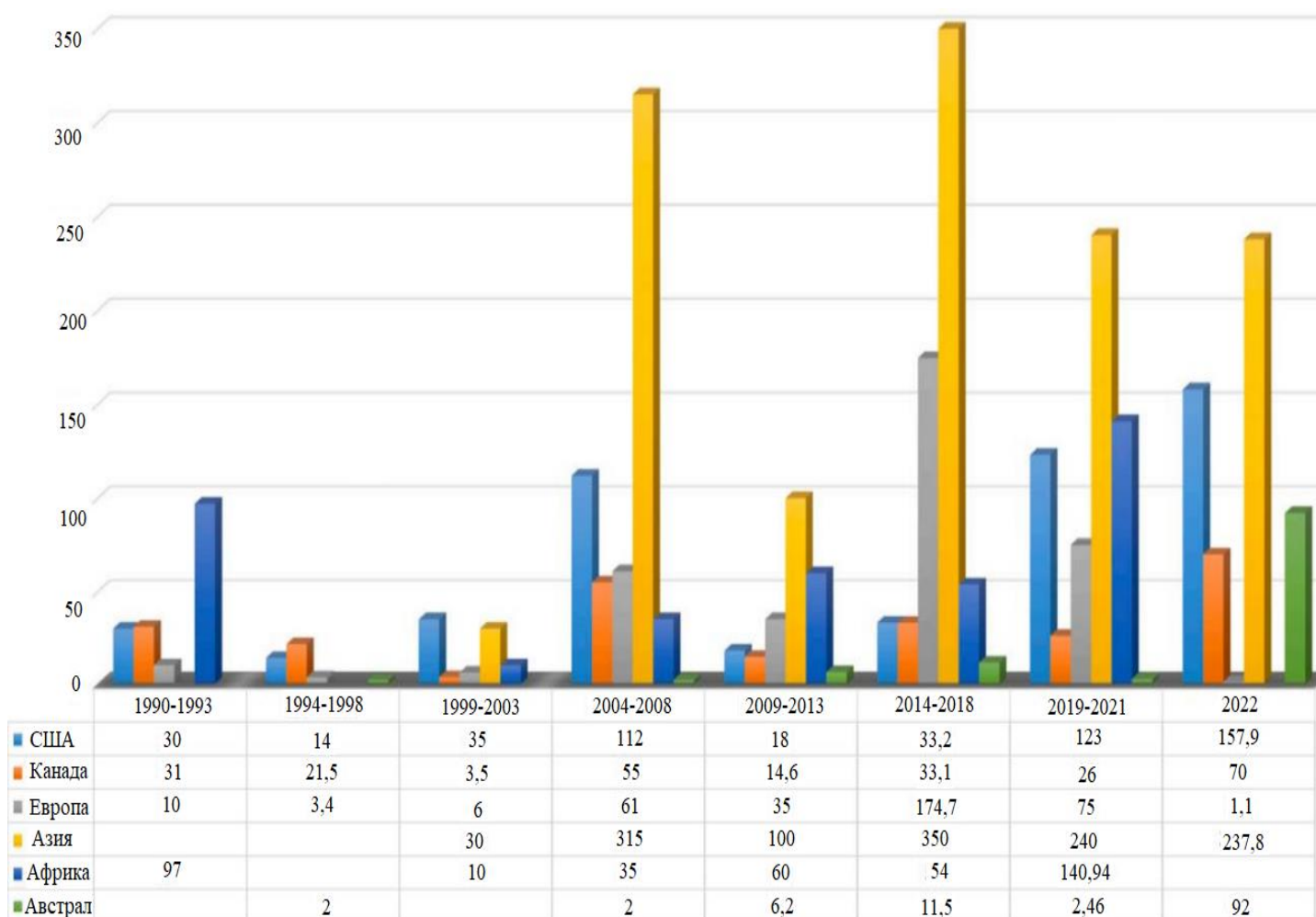


Рисунок 1 – Статистика аварий в энергосистемах мира за последние 30 лет

Экологическая осознанность, неэффективные распределительные сети, высокие затраты на передачу электроэнергии и увеличивающееся осведомление потребителей о затратах на энергию являются распространенными проблемами в энергетических системах. Для их решения необходимо обеспечить универсальный доступ к сети с высоким уровнем кибербезопасности и надежности. Возобновляемые источники энергии играют важную роль в развитии чистой энергетики. Однако, существующие возобновляемые источники энергии имеют ряд недостатков, включая потери при передаче электроэнергии, частые отключения, уязвимость к кибератакам и слабую защиту системы. Веерные отключения электроэнергии и нехватка электроэнергии в Китае, а также чрезвычайная ситуация в Техасе, вызванная зимним штормом Ури, стали одними из самых серьезных проблем в обеспечении энергоснабжения, в то время как дополнительные проблемы усугубили уже сложную ситуацию на рынках (общенациональное отключение электроэнергии в Пакистане, веерные отключения электроэнергии в Шри-Ланке). На многих мировых рынках угроза перебоев в электроснабжении возрастает с добавлением новых препятствий, таких как экстремальные погодные условия, такие как снегопады, торнадо, циклоны, отсутствие технического обслуживания, недостаточный уровень оптимизации и хронический недостаток инвестиций в генерирующую и сетевую инфраструктуру [4].

Со временем электроэнергетика в мире только будет усложняться, потребление электроэнергии расти, что приведет еще к большему увеличению количества аварий, исходя из этого можно сделать вывод, что современной электроэнергетике необходима новый подход к управлению. Одним из новых подходов к управлению в электроэнергетике во всем мире стало применение цифровых двойников, поскольку она обладает необходимой гибкостью моделирования, новыми структурами безопасности, и возможностями анализа данных в реальном времени.

1.2 Понятие цифровой двойник в электроэнергетике

В настоящее время в мире активно развивается новая концепция промышленности Industry 4.0, инициированная четвертой промышленной революцией.

Данная концепция предполагает широкое использование компьютерных технологий как для сбора и анализа больших массивов информации, так и для создания виртуальных прототипов технической продукции, позволяющих исследовать производимые и эксплуатируемые устройства на всех этапах их жизненного цикла, повышая тем самым их надежность.

Поэтому в России в 2014 году была разработана перспективная программа, получившая название Национальной технологической инициативы, в соответствии с которой к приоритетным направлениям государственной политики России была отнесена цифровизация экономики, одним из путей реализации которой является создание цифровых двойников технических систем [3].

Общие положения разработки и применения цифровых двойников изделий регламентирует ГОСТ Р 57700.37-2021, согласно которому применение ЦД изделий в промышленности является развитием парадигмы компьютерного моделирования и цифрового инжиниринга изделий.

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021, цифровой двойник – это система, которая состоит из цифровой модели изделия и двухсторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [6].

Применительно к электроэнергетике изделием может быть электростанция, подстанция, электрические сети, а также электромеханические устройства, такие как генераторы и трансформаторы.

Под двухсторонними информационными связями понимается показание с датчиков реального объекта (напряжение, ток, частота и т.д.), которые передаются в цифровую модель. Информация поступает с цифровой модели (виртуальные датчики, отчет о состоянии и прогноз) обслуживающему персоналу для принятие необходимых действий (рисунок 2).



Рисунок 2 – Структурная схема цифрового двойника в электроэнергетике

Цифровые двойники электроэнергетических объектов используются для симуляции работы системы при различных нагрузках, изменениях топологии сети, аварийных ситуациях и других условиях, что позволяет оптимизировать работу системы в целом.

Цифровые двойники также могут использоваться для диагностики и предотвращения аварийных ситуаций в электроэнергетических системах. Например, виртуальная модель генератора может использоваться для определения причин возникновения вибраций в реальном генераторе, что позволяет предотвратить его поломку.

В целом, использование цифровых двойников в электроэнергетике позволяет повысить эффективность работы системы, улучшить качество энергоснабжения, сократить затраты на обслуживание и ремонт оборудования и повысить безопасность работы системы.

Разработка цифровых двойников — это актуальная тема в электроэнергетике, на которую обращают внимание ведущие электроэнергетические компании

России. Так, например, использование цифровых двойников предусмотрено концепцией «Цифровая трансформация 2030» «Федеральная сетевая компания – Россети» (ПАО «Россети»).

Цифровой двойник открывает новые возможности к управлению электро-энергетическими сетями и объектам.

Все относительные исследования цифровых двойников, которые были предложены и разработаны для электроэнергетики основываются на следующих концепциях, как онлайн-анализ данных в режиме реального времени и возможность сбора данных, автоматическое управление, облачная платформенная система, диспетчеризация энергосистемы, система связи от физического тела к цифровому двойнику, оптимизация энергосистемы, управление стороной высокого спроса, CPS, отображение SCADA тела двойника, тестирование кибербезопасности с использованием IoT, анализ больших данных, машинное обучение, глубокое обучение, блокчейн, PLC, MATLAB, искусственные нейронные сети, различные модели кибербезопасности и множество протоколов передачи данных.

1.3 Анализ подходов к разработке цифровых двойников

Разработка цифровых двойников в электроэнергетике подразумевает выполнение ряда задач, из основных задач можно выделить:

- 1) Разработка структурной схемы цифрового двойника;
- 2) Настройка коммутационного оборудования, систем связи, протоколов передачи данных;
- 3) Сбор данных об объекте (КРУ, трансформатор и т.д.);
- 4) Разработка цифровой модели.

Цифровые модели можно создавать с помощью многочисленных датчиков и искусственного интеллекта на основе нейросетей и технологий высокоскоростных вычислений на основе разнообразных данных. А также при помощи имитационного моделирования в специализированных программных продуктах, таких как MATLAB, PSCAD.

Цифровая модель может работать на персональных компьютерах, серверах под управлением операционных системах Windows, Linux. Так и на специализированных вычислительных машинах, программно-аппаратных комплексов, реального времени, тем самым грамотно распределяя вычислительную нагрузку внутри вычислительных машин, что способствует точности обработки данных имитационной модели в реальном времени.

1.4 Анализ протоколов передачи данных между реальным объектом и цифровой моделью

При разработке цифрового двойника электроэнергетических сетей и объектов на подстанции применяют уже используемые на подстанции средства связи в том числе и применяемые протоколы передачи данных между различным управляющим оборудованием и диспетчерским центром.

Широко распространены следующие протоколы:

- MMS (МЭК 61850), используется для передачи данных и команд между устройствами управления в электроэнергетике и SCADA.
- SV (МЭК 61850), используется для передачи высокочастотных аналоговых значений (выборок) измерений и сигналов в системах электроэнергетики.
- GOOSE (МЭК 61850), используется для передачи событий и команд между устройствами в подстанциях электроэнергетики.
- С37.100, используется в электроэнергетической отрасли для обмена данных, связанных с положительной и нулевой последовательностями, между реле защиты, мониторинговыми системами, системами контроля и управления, а также другими компонентами системы электроснабжения.
- МЭК 60870, используется в электроэнергетической отрасли для обмена данных и коммуникации между различными компонентами системы.
- OPC, при разработке цифрового двойника может быть использован при передаче больших объемов данных параметров электрической сети из SCADA в цифровую модель и обратно.

- MQTT, протокол передачи сообщений, разработанный для масштабируемой и эффективной коммуникации между устройствами в сетях Internet of Things (IoT).

1.5 Зарубежный опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике

Цифровые двойники в электроэнергетике широко применяются в зарубежных странах, особенно в США и Европе. Они используются для управления и оптимизации работы энергетических систем, а также для моделирования и анализа различных сценариев.

Самый крупный рынок цифровых двойников в области энергетики находится в США. Электростанции в США эксплуатируются в гибких условиях, включая частую смену режима и длительные периоды низкой нагрузки, что ведет к уменьшению срока службы и производительности оборудования [7].

1.3.1 Цифровой двойник для контроля нагрузки лопасти ветряной турбины
Компания «Hitachi» разработала цифровой двойник ветрогенератора и использовало его для оценки нагрузок на лопастях (рисунок 3).

Цифровой двойник ветряной турбины получает следующие данные от системы диспетчерское управление и сбор данных (SCADA):

- скорость ветра и направление ветра на вершине гондолы;
- скорость вращения ротора;
- азимутальный угол ротора;
- угол тангажа лопасти.

Внешняя сила, действующая на лопасти, делится в основном на три силы: аэродинамическую, гравитация и сила упругости. Гравитация сила и сила упругости могут быть легко рассчитаны из полученных данных измерений, поскольку они зависят только от вращения лопастей. С другой стороны, аэродинамическая сила не зависит только от вращения лопастей, на нее влияют воздушные потоки. Чтобы рассчитать аэродинамическую силу действующую на лопасти ветряной турбины, необходимо оценить состояние ветра, но доступна только ин-

формация о скорости и направления ветра в верхней части гондолы. Таким образом, на этом этапе рассчитывается только «приблизительная» оценка состояния ветра и соответствующая аэродинамическая нагрузка с аэродинамической моделью лопасти [5].

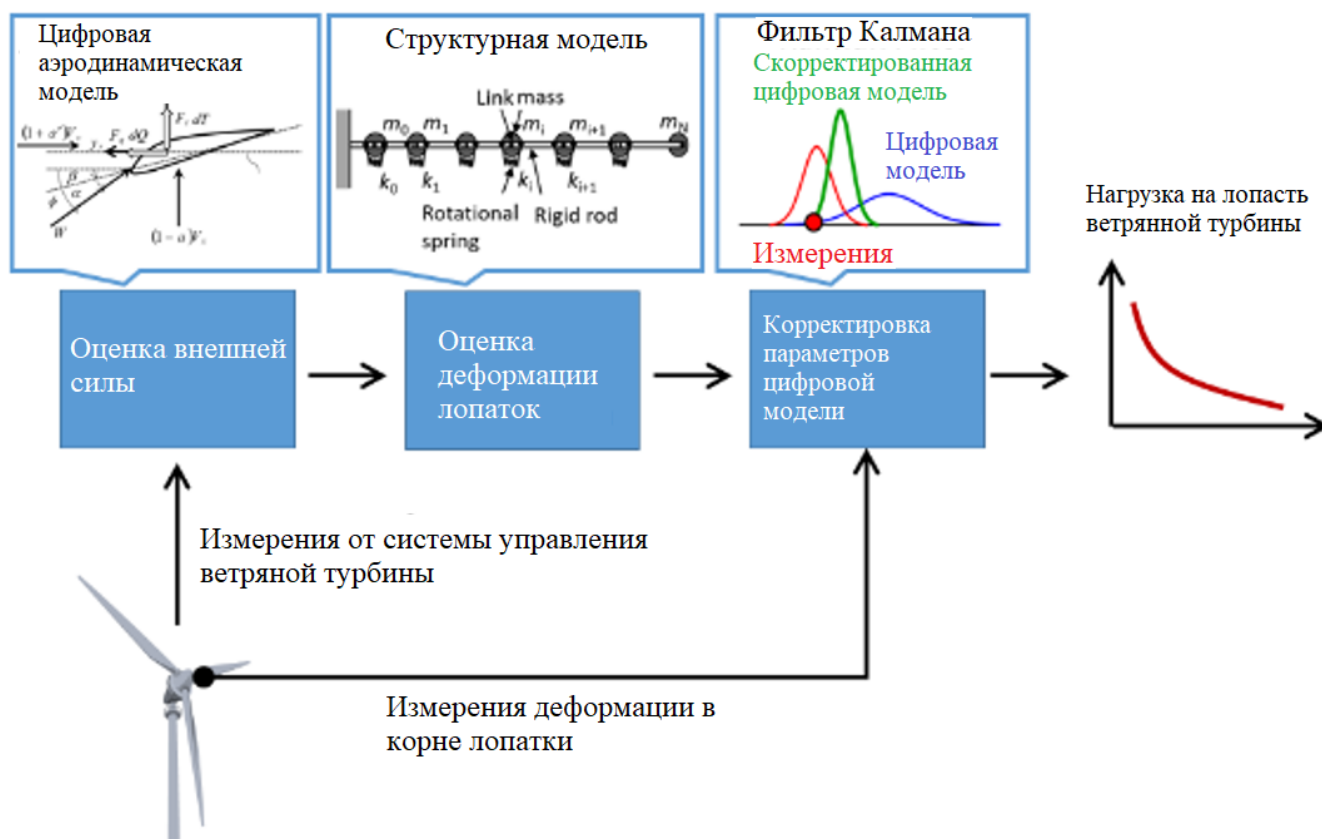


Рисунок 3 – Структурная схема цифрового двойника ветрогенератора компании «Hitachi»

В своем исследовании «Hitachi» построили цифровую модель ветряной турбины. Как упоминалось выше, расчетная внешняя сила не является точной из-за отсутствия информации о ветре. Поэтому, просто использовалась структурная модель лопасти с расчетными параметрами внешней силы. Корректировка выходных параметров цифровой модели осуществлялась на основе измерений деформации в корне лопатки при помощи фильтра. После корректировки выходных параметров цифровой модели, система управления на основе этих данных рассчитывала нагрузку, действующую на лопасть ветряной турбины.

Данный метод был применен для ветряной турбины «Hitachi» мощностью 2 МВт для оценки нагрузок на ветровые лопасти. Результаты показали, что предложенный метод оценки нагрузки обеспечивает хорошие оценки, согласующиеся с истинным моментом, рассчитанным симулятором (рисунок 4) [7].

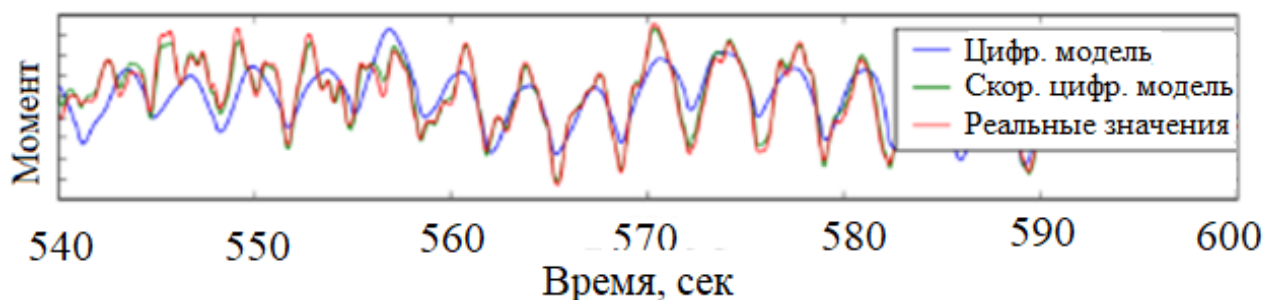


Рисунок 4 – Временной ряд параметров нагрузки на лопасть ветряной турбины цифровой модели и реальной ветряной турбины при скорости ветра 15,0 м/с

1.3.2 Примеры использования цифровых двойников других крупных компаний

Компания General Electric создала цифровой двойник, который является основой цифровой электростанции Digital Power Plant (рисунок 5). ПО Digital Power Plant позволяет собирать данные с оборудования General Electric. По данным General Electric [3], модель ЦД сама убеждает покупателя в целесообразности покупки оборудования на основе расчета различных ситуаций, оптимизации и виртуальных испытаний.

Компания «Siemens» использует цифровые двойники для моделирования работы энергетических систем в разных странах и регионах. Это позволяет оптимизировать работу систем управления электроэнергией и снизить затраты на ее производство и распределение.

Компания «Duke Energy» использует цифровые двойники для мониторинга и оптимизации работы сетей распределения электроэнергии в США. Они позволяют операторам сетей быстро диагностировать неисправности и предотвращать аварии.

Компания «Schneider Electric» использует цифровые двойники для управления энергосистемами городов в разных странах мира, включая Париж, Лондон и Сингапур. Они позволяют оптимизировать расход энергии и снизить затраты на обслуживание городских систем.

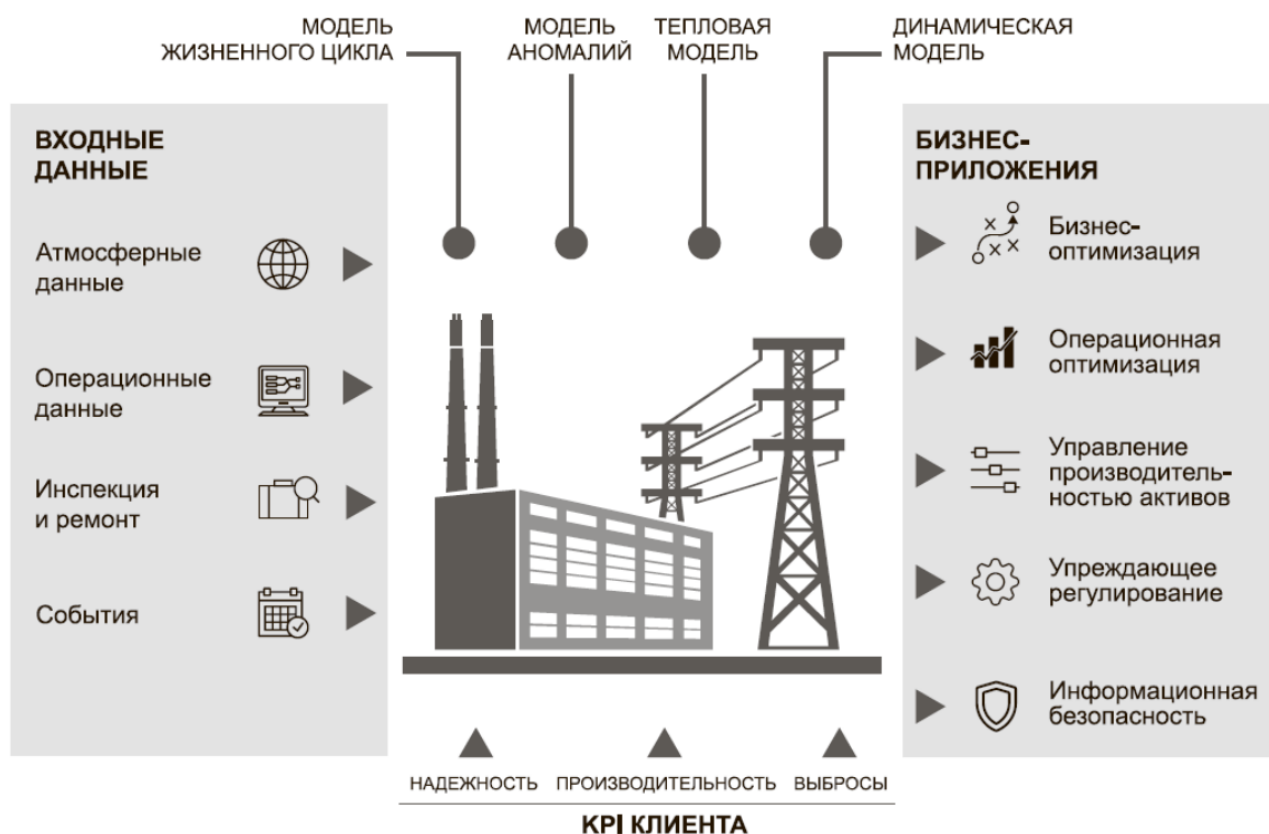


Рисунок 5 – Цифровой двойник от компании General Electric

1.6 Отечественный опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике

В России также есть опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике. Например, компания «Росэнергоатом» использует цифровые двойники для оптимизации работы атомных электростанций (АЭС).

Цифровые двойники позволяют анализировать данные, полученные от датчиков на АЭС, и прогнозировать возможные проблемы с оборудованием. Также

цифровые двойники используются для проведения виртуальных испытаний оборудования, что позволяет оптимизировать его работу и повысить эффективность использования.

Кроме того, в России есть компании, которые разрабатывают цифровые двойники для электроэнергетических систем. Например, компания «Системы энергетической автоматики» разработала цифровой двойник для электрических сетей, который позволяет проводить анализ и оптимизацию работы сетей, а также предотвращать возможные аварии и сбои в работе.

Компания ЦИТМ Экспонента разрабатывает и внедряет цифровые двойники для различных отраслей, включая энергетику. Одним из проектов компании является разработка цифрового двойника энергетической системы для крупнейшего энергетического холдинга России - ПАО "Мосэнерго".

Цифровой двойник компания ЦИТМ Экспонента реализуется на комплексе полунатурного моделирования «Ритм» (рисунок 5).

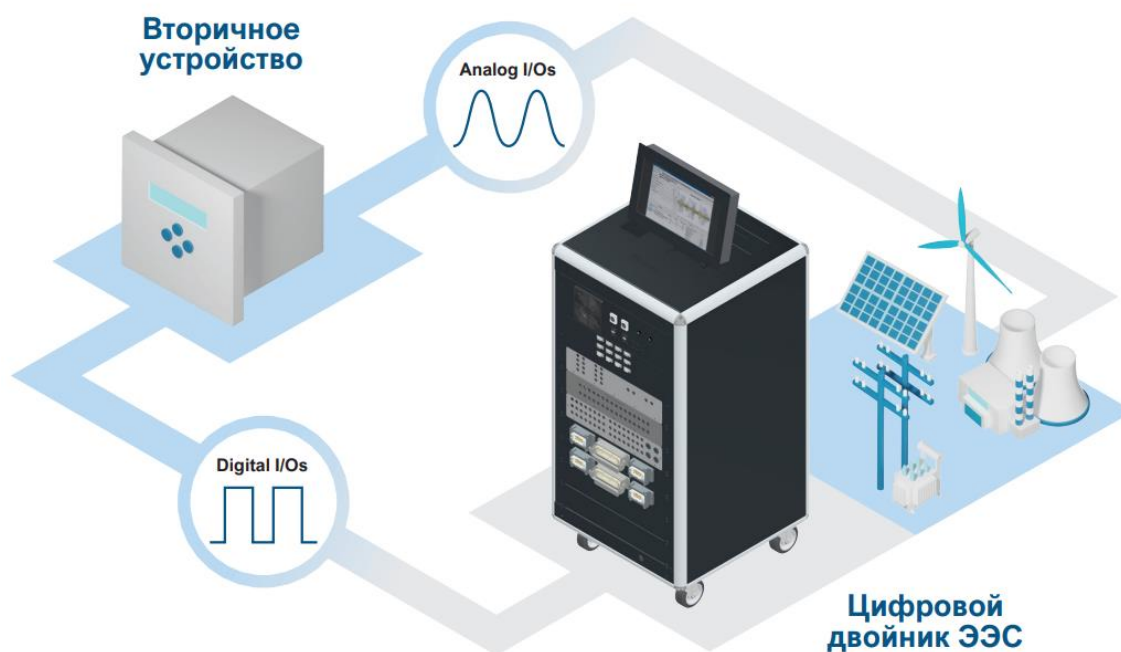


Рисунок 5 – Структурная схема комплекса полунатурного моделирования «Ритм»

Цифровой двойник Мосэнерго позволяет моделировать работу энергосистемы с учетом всех факторов, влияющих на ее работу, таких как погода, потребление электроэнергии и т.д. Также цифровой двойник может предсказывать возможные аварии и сбои в работе системы, что позволяет оперативно принимать меры для предотвращения проблем. Используется и для оптимизации работы энергосистемы, например, для увеличения эффективности использования оборудования и сокращения затрат на эксплуатацию.

Так же разработкой цифровых двойников в электроэнергетике занимается институт МЭИ (далее - Московский энергетический институт) и использует, чтобы оптимизировать учебный процесс, проводить научные исследования, а также моделировать различные процессы в энергетической отрасли.

Один из проектов связанный с разработкой цифрового двойника института МЭИ — это создание цифрового двойника энергетической системы города Москвы. Этот проект включает в себя моделирование работы энергосистемы города с учетом всех факторов, влияющих на работу системы, таких как погода, потребление электроэнергии, производство энергии, а также учет работы различных объектов инфраструктуры, таких как транспортные системы и жилые здания.

Цифровой двойник института МЭИ реализуется на аппаратно-программной платформе ЦДЭС.

Таким образом, опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике в России существует и развивается, что позволяет повысить эффективность работы оборудования и систем, а также обеспечить более надежную и безопасную работу электроэнергетических объектов.

1.7 Вывод по первой главе

Данная глава была посвящена постановке задачи исследования, анализу проблем эксплуатации современных электроэнергетических систем, обоснованию применения цифровых двойников в электроэнергетике, анализу подхода к разработке цифровых двойников, а также анализу и обзору уже существующих цифровых двойников отечественных и зарубежных компаний.

Анализ проблем эксплуатации современных электроэнергетических систем в мире, приведённый за 30 лет, показывает, что количество аварий из года в год увеличивается. На это влияет множество факторов в том числе рост потребления электроэнергии, строительство новых электростанций и внедрение возобновляемых источников энергии.

Однако опыт применения цифровых двойников в электроэнергетике за рубежом и в России показывает, что с помощью цифровых двойников можно улучшить управления электроэнергетическими системами, снизить количество аварий в энергосетях за счет возможности мониторинга за состоянием оборудования на цифровой модели, которая имеет двухстороннюю связь с реальным объектом. Это позволяет сравнить показания реального объекта и цифровой модели и выявить неполадки на ранней стадии. Кроме того, цифровой двойник позволяет использовать для симуляции работы системы при различных нагрузках, изменениях топологии сети, аварийных ситуациях и других условиях, что позволяет оптимизировать работу системы в целом.

Приведённый в данной главе анализ подхода к разработке цифровых двойников будет применен в следующих главах при разработке цифрового двойника КРУ 10кВ и двухобмоточного трансформатора.

2 РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КРУ 10кВ в SCADA WinCC OA

В данной главе будет описана поэтапная разработка цифрового двойника КРУ 10 кВ. Цифровой двойник КРУ 10 кВ будет представлять собой цифровую модель КРУ 10 кВ и которая взаимодействует с реальным оборудованием. Осуществления связи между управляющим оборудованием КРУ 10 кВ, имитационной моделью и SCADA системой будет организовано посредством протокола MMS регламентированным в стандарте для цифровых подстанций МЭК 61850-8-1.

Цифровой двойник КРУ 10 кВ сможет быть использован для различных целей:

1. Мониторинг и диагностика: Цифровой двойник позволит диспетчерам мониторить в SCADA системе WinCC OA отклонения показаний датчиков реального оборудования КРУ 10 кВ и виртуальных датчиков имитационной модели КРУ 10 кВ в режиме реального времени.

2. Оптимизация работы: Цифровой двойник позволит проводить различные сценарии исследования и оптимизации работы КРУ 10 кВ. Он может помочь в определении оптимальных настроек параметров КРУ, таких как время коммутации, согласование с другими элементами электросети и другие параметры.

3. Обучение и обучение персонала: Цифровой двойник может быть использован для обучения персонала и проведения тренировок. Он позволяет симулировать различные сценарии работы КРУ 10 кВ и обучить персонал правильным процедурам и реакциям на различные ситуации.

4. Тестирование и разработка: Цифровой двойник КРУ 10 кВ может быть использован для тестирования новых алгоритмов, устройств и технологий в безопасной и контролируемой среде. Это может помочь в разработке и внедрении новых решений для эффективной и надежной работы КРУ.

2.1 Описание КРУ 10 кВ

КРУ 10 кВ представляют собой две ячейки: ввод и отходящая линия (рисунок 6). Однолинейная схема согласно документации на КРУ представлена на фотографии 7.



Рисунок 6 – Фотография КРУ 10 кВ

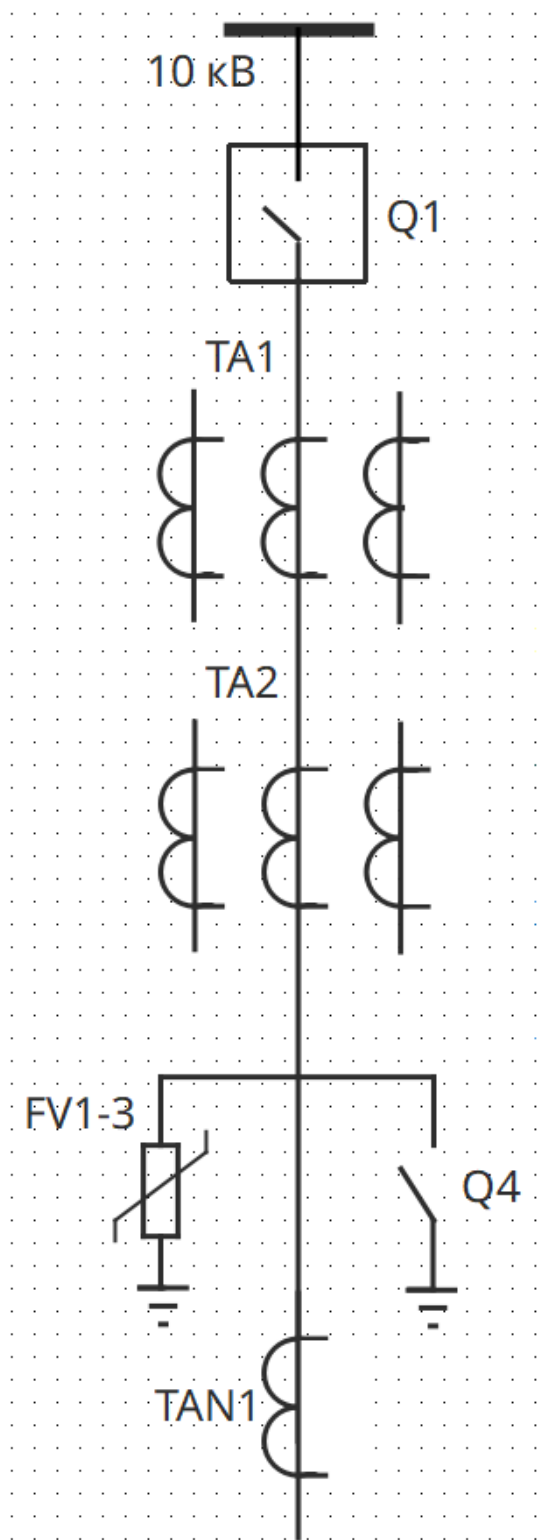


Рисунок 7 – Однолинейная схема КРУ 10 кВ согласно документации

Релейная защита для КРУ 10 кВ осуществляется терминалом РЗА Siprotec 7SJ8042, который является многофункциональным реле защиты и управления, разработанным компанией Siemens. Оно обеспечивает защиту от короткого замыкания, перегрузок, напряжения, обратного тока и заземления. Также Siprotec

7SJ8042 имеет возможность удаленного управления и мониторинга через протоколы связи IEC 61850, Modbus и Profibus.

Выключатель для КРУ 10 кВ - вакуумный выключатель от «Таврида Электрик» (рисунок 8). Он обеспечивает быстрое и надежное отключение оборудования при возникновении неисправностей в электроэнергетической системе.



Рисунок 8 – Фотография вакуумного выключателя

Из исполнительных элементов также присутствуют заземляющие ножи, предназначенные для заземления токоведущих частей оборудования, когда оно находится в отключенном состоянии, т.е. когда снято напряжение (рисунок 9).

Управление выключателем и заземляющими ножами осуществляется через терминал РЗА Siprotec 7SJ8042.



Рисунок 9 – Фотография заземляющих ножей

2.2 Структурная схема цифрового двойника

Структурная схема представлена на рисунке 10.

В структурной схеме присутствуют:

- КРУ 10 кВ с двумя ячейками вводом и отходящей линией. Релейная защита и автоматика, управление выключателем 10 кВ осуществляется двумя терминалами релейной защиты компании Siemens Siprotec 7SJ8042.

- Коммутатор, работающий на втором уровне модели OSI;

- Станция моделирования, на которой работает имитационная модель КРУ 10 кВ (имитационная модель в Simulink), принимает данные от КРУ 10 кВ и SCADA WinCC OA через OPC-сервер;

- Станция управления, которая осуществляет мониторинг и управление оборудованием КРУ 10 кВ (SCADA WinCC OA).

Осуществление связи с верхним уровнем происходит при помощи протокола MMS (МЭК 61850-8-1).

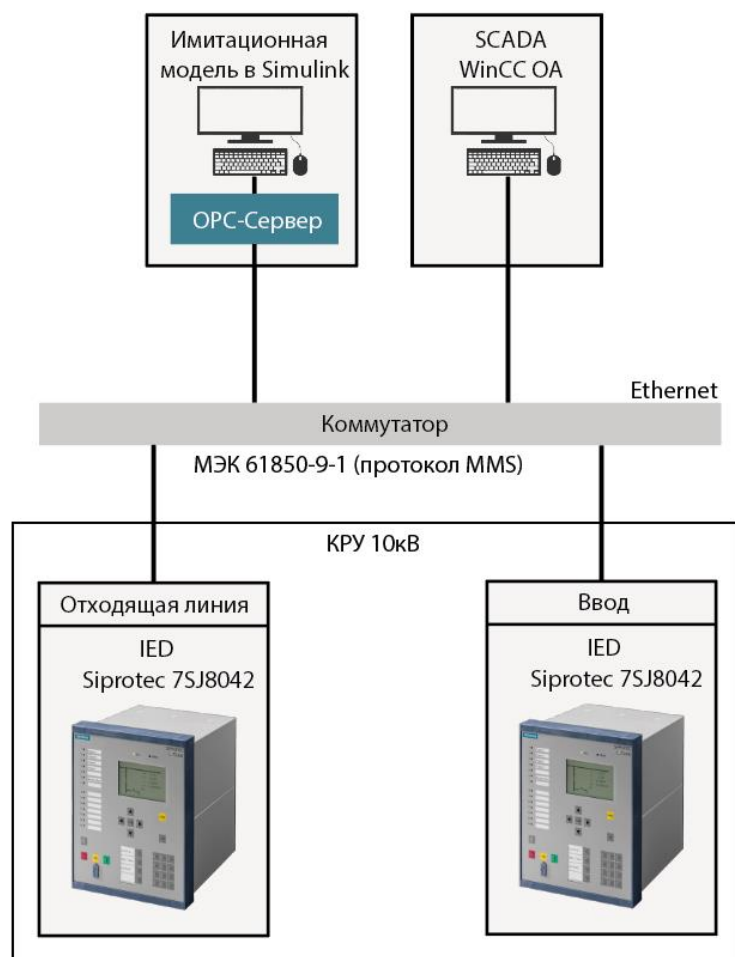


Рисунок 10 – Структурная схема цифрового двойника КРУ 10 кВ

Работа цифрового двойника осуществляется следующим образом. SCADA периодически опрашивает терминалы РЗА Siprotec и получает от них параметры электрической сети, положение выключателя и положение заземляющих ножей. Данные параметры отображаются на главной мнемосхеме в разделе «реальный объект». В это же время ОПС-сервер так же опрашивает терминалы РЗА, получая данные о фазном напряжении, частоты сети на силовых шинах КРУ, положения выключателя и заземляющих ножей, эти данные потом передаются в цифровую модель КРУ в Simulink. В модели генерируется ровно такое же фазное напряжение, с такой же частотой сети, как на силовых шинах реального КРУ. Положение выключателей и заземляющих ножей соответствует реальному КРУ.

Если на реальное КРУ подано напряжение и выключатель находится в положение «включено» в модели пофазно начинает протекать электрический ток. Значение тока зависит от фазного напряжения и от заданной диспетчером в

цифровой модели активной и реактивной нагрузки. Значение фазных токов в цифровой модели измеряется при помощи виртуальных датчиков. Из цифровой модели через OPC-сервер значения фазных токов передаются в SCADA, где архивируются (для просмотра на графиках) и отображаются на главной мнемосхеме в разделе «цифровая модель».

Диспетчер по значениям отображающихся в SCADA на главной мнемосхеме может определить возможные неисправности и аварийные ситуации, о которых может сообщить рассогласование между показаниями оборудования реального КРУ и цифровой модели.

Фотография цифрового двойника КРУ 10 кВ представлена на рисунке 11.

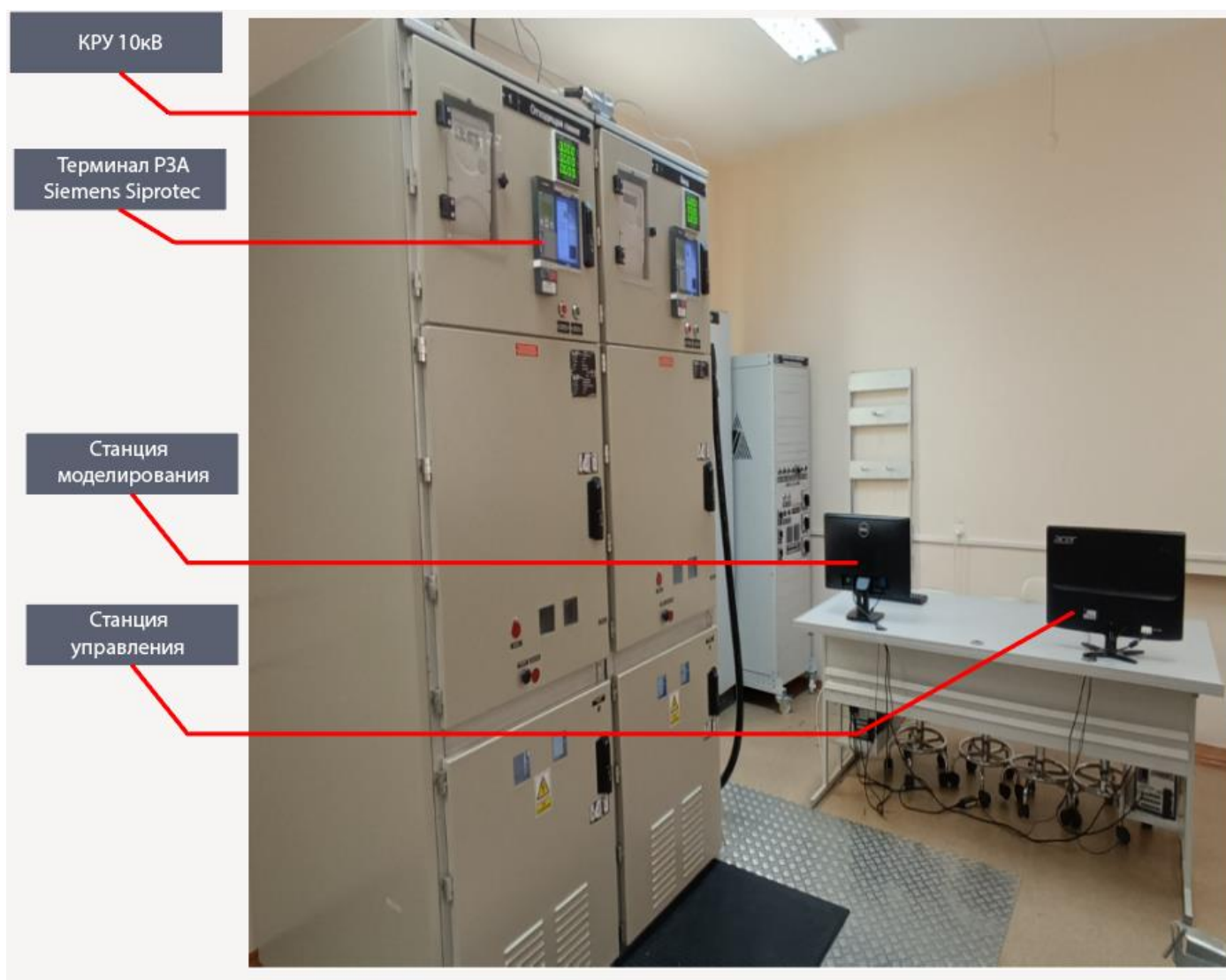


Рисунок 11 – Фотография цифрового двойника КРУ 10 кВ

2.3 Обмен данными между SCADA и терминалом РЗА

Передача данных между SCADA и терминалами РЗА осуществляется по протоколу MMS.

Протокол MMS (Manufacturing Message Specification) — это стандарт промышленной автоматизации, используемый для передачи данных между различными устройствами и системами. Протокол MMS был разработан в 1992 году и впоследствии стал частью стандарта IEC 61850, который определяет стандарты для систем автоматизации подстанций в основном используется для передачи данных между сервером и клиентом. Сервер — это устройство, которое хранит данные, а клиент — это устройство, которое запрашивает данные у сервера. Протокол MMS используется для передачи различных типов данных, таких как цифровые значения, аналоговые значения, текстовые данные и т.д.

Протокол MMS поддерживает различные типы соединений, включая TCP/IP, ISO/IEC 8802-3 (Ethernet) и другие. Он также поддерживает различные форматы данных, такие как ASCII, binary, BCD и другие.

Протокол MMS может использоваться в различных областях промышленности, включая энергетику, нефтегазовую промышленность, химическую промышленность, производство и другие. Он используется для управления и контроля различных процессов, таких как управление нагрузкой, контроль качества продукции, мониторинг и управление транспортными системами и другое.

В цифровом двойнике протокол настроен таким образом чтобы клиент (SCADA) периодически опрашивала сервер (терминал РЗА). SCADA и терминал РЗА осуществляют обмен данными регламентированными в стандарте МЭК 61850-7-3 и МЭК 61850-7-4. Данная структура данных приведена в таблице 1.

2.4 Обмен данными между цифровой моделью и терминалом РЗА

Обмен данными между цифровой моделью и терминалом РЗА осуществляется при помощи OPC-сервера компании «МПС софт».

Протокол OPC (OLE for Process Control) — это стандарт промышленной автоматизации, который используется для передачи данных между различными

устройствами и системами в промышленных процессах. Протокол OPC был разработан в 1996 году компанией Microsoft и впоследствии стал стандартом промышленной автоматизации.

Протокол OPC используется для передачи различных типов данных, таких как цифровые значения, аналоговые значения, текстовые данные и другие.

OPC-сервер и терминал РЗА, так же осуществляют обмен данными регламентированные в стандарте МЭК 61850-7-3 и МЭК 61850-7-4. Структура данных представлена в таблице 2.

Таблица 1 – Структура данных обмена между SCADA и терминалом РЗА

Логическое устройство (LD)	Логический узел (LN)	Данные	Атрибуты	Наименование
CTRL	Q0XCBR1	Pos	stVal	Положение выключателя
CTRL	Q0XCBR1	Loc	stVal	Местное или дистанционное управление положением выключателя
CTRL	Q0XCBR1	Pos_Oper	ctVal	Дистанционное управление положением выключателя (команда управления)
CTRL	Q8XCBR1	Pos	stVal	Положение заземляющих ножей
CTRL	Q8XCBR1	Loc	stVal	Местное или дистанционное управление положением заземляющих ножей
CTRL	Q8XCBR1	Pos_Oper	ctVal	Дистанционное управление положением заземляющих ножей (команда управления)
MEAS	MMXU1	Hz	mag_f	Частота сети, Гц
MEAS	MMXU1	PhV_phsA	mag_f	Фазное напряжение на фазе А, В
MEAS	MMXU1	PhV_phsB	mag_f	Фазное напряжение на фазе В, В
MEAS	MMXU1	PhV_phsC	mag_f	Фазное напряжение на фазе С, В
MEAS	MMXU1	A_phsA	mag_f	Ток в фазе А, А
MEAS	MMXU1	A_phsB	mag_f	Ток в фазе В, А
MEAS	MMXU1	A_phsC	mag_f	Ток в фазе С, А
MEAS	MMXU1	TotW	mag_f	Активная мощность, МВт
MEAS	MMXU1	TotVA	mag_f	Полная мощность, МВА
MEAS	MMXU1	TotVAr	mag_f	Реактивная мощность, МВАр

Таблица 2 – Структура данных обмена между цифр. моделью и терминалом РЗА

Логическое устройство (LD)	Логический узел (LN)	Данные	Атрибуты	Наименование
CTRL	Q0XCBR1	Pos	stVal	Положение выключателя
CTRL	Q8XCBR1	Pos	stVal	Положение заземляющих ножей
MEAS	MMXU1	Hz	mag_f	Частота сети, Гц
MEAS	MMXU1	PhV_phsA	mag_f	Фазное напряжение на фазе А, А
MEAS	MMXU1	PhV_phsB	mag_f	Фазное напряжение на фазе В, А
MEAS	MMXU1	PhV_phsC	mag_f	Фазное напряжение на фазе С, А

2.5 Обмен данными между SCADA и цифровой моделью

Обмен данными между SCADA и цифровой моделью осуществляется с помощью OPC-сервера. В качестве OPC-сервера выступает OPC-сервер компании «МПС софт» «Multi-Protocol Master OPC» (рисунок 12).

Данные обмена представлены в таблице 3.

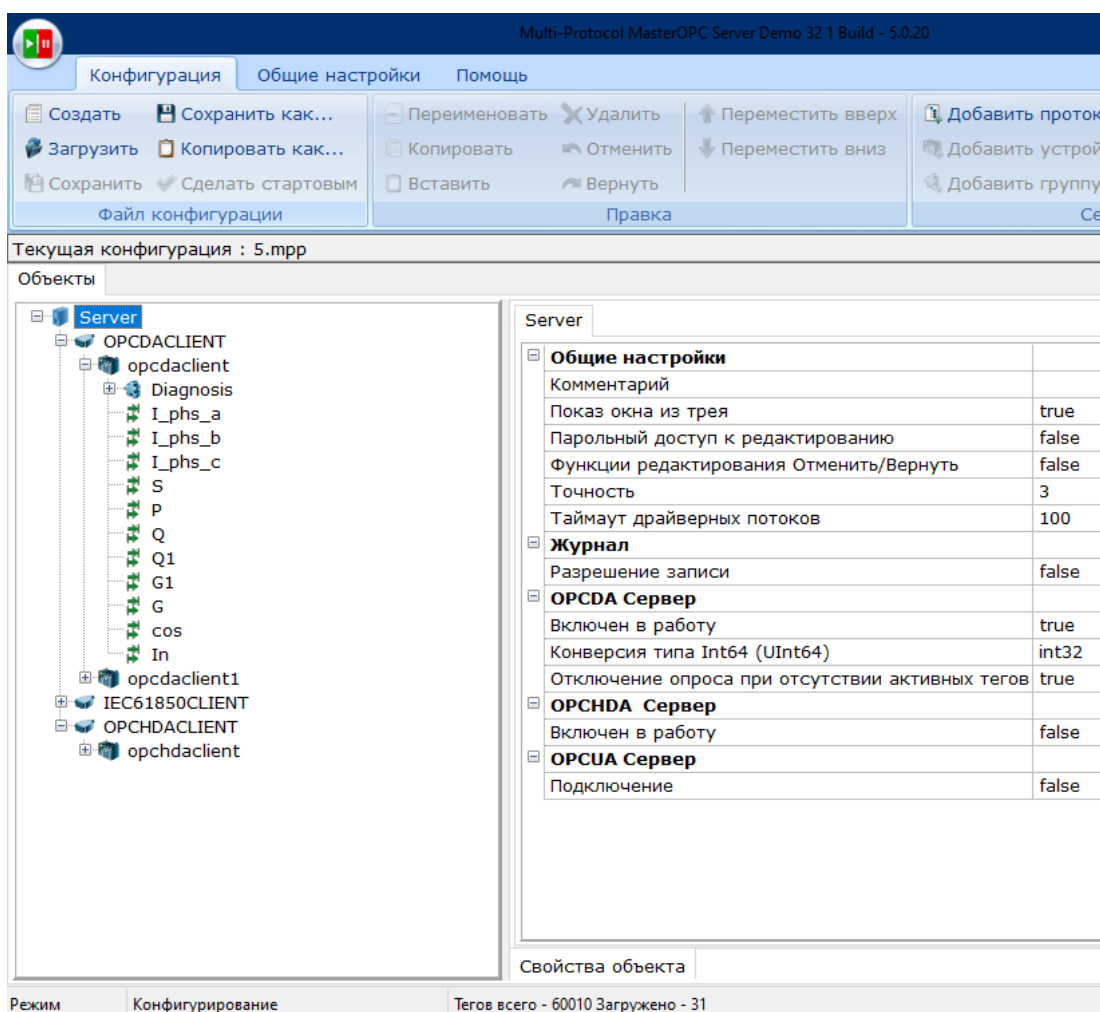


Рисунок 12 – OPC-сервер «Multi-Protocol Master OPC»

Таблица 3 – Данные обмена между цифровой моделью и SCADA

Переменная	Наименование	Ед. измерения
I_phs_a	Ток в фазе А	А
I_phs_b	Ток в фазе В	А
I_phs_c	Ток в фазе С	А
S	Фазное напряжение на фазе А	В
P	Фазное напряжение на фазе В	В
Q	Фазное напряжение на фазе С	В
Q1	Положение выключателя (вкл., выкл., промежуточное)	
G1	Положение заземляющих ножей (вкл., выкл., промежуточное)	
cos	Коэффициент мощности	

2.6 Разработка SCADA системы КРУ 10кВ

Для управления и мониторинга КРУ 10 кВ была разработана SCADA система в программном обеспечении фирмы Siemens WinCC OA. Дополнительно в SCADA был интегрирован мониторинг за цифровой моделью КРУ разработанной в Simulink, с помощью чего диспетчер сможет наблюдать как изменяются параметры на реальном объекте и цифровой модели и делать выводы о работоспособности силового оборудования и электрической сети.

«WinCC OA» представляет собой сокращенное название программного продукта «SIMATIC WinCC Open Architectur», предназначенного разработки систем мониторинга технологических процессов и управления данными процессами с использованием графических пользовательских интерфейсов. В качестве аппаратной платформы могут использоваться сервера и рабочие станции на базе ПК. Совместно с базовыми системами автоматизации (ПЛК, ПЦУ, УСО, терминалы РЗА) и соответствующими датчиками и исполнительными механизмами. WinCC OA позволяет образует полнофункциональную систему автоматизации (рисунок 13).

Особенностями WinCC OA является:

- высокая гибкость, обладает огромным количеством инструментов для разработки систем диспетчеризации;

- масштабируемость;
- открытость и интеграция, предоставляет открытые интерфейсы и позволяющие интегрировать системы с другими системами;
- Обладает высокой надежностью и отказоустойчивостью;
- Обладает инструментами для осуществления аналитики данных, основанных на алгоритмах машинного обучения.

Кроме того, в WinCC OA встроено большое количество драйверов, таких как драйвер МЭК 61850, МЭК 60870 позволяющих интегрировать системы автоматизации в электроэнергетике.

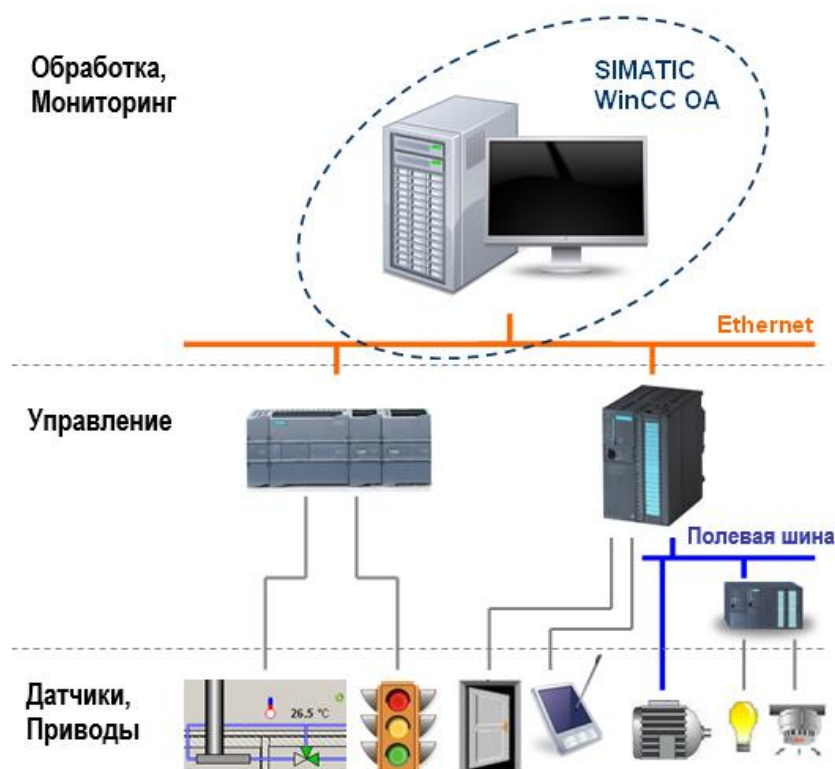


Рисунок 13 – Система автоматизации

WinCC OA представляет собой модульную систему (рисунок 14). Необходимые функции выполняются отдельными модулями, созданными для разных задач. В WinCC OA эти модули называются менеджерами. Менеджеры являются отдельными программами.

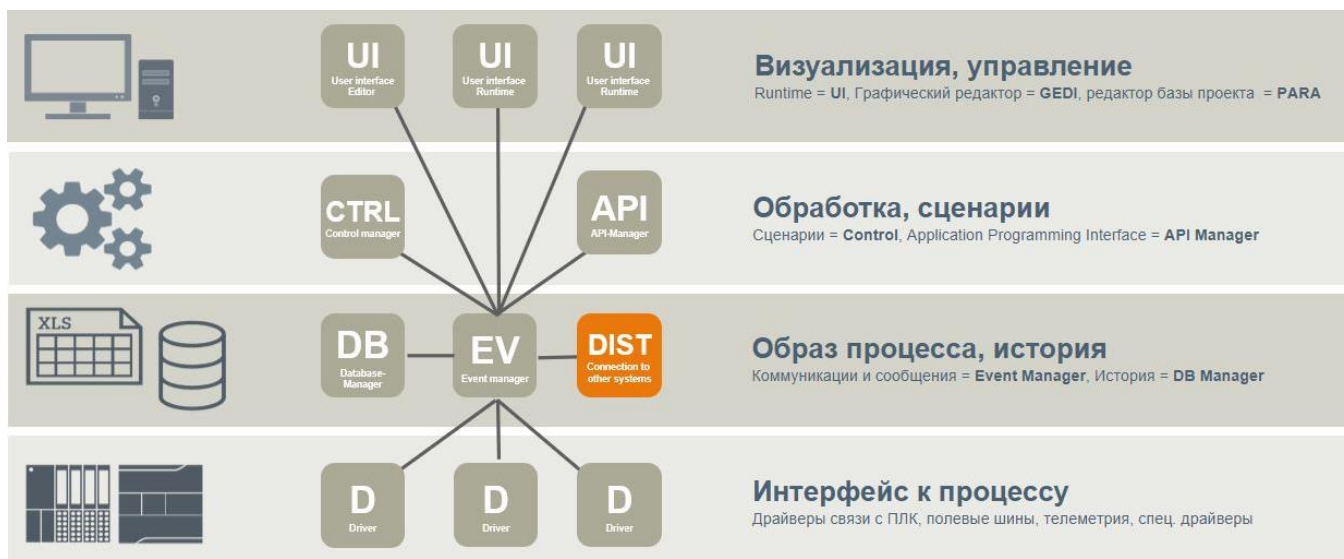


Рисунок 14 – Модульная структура WinCC OA

Модульная структура разработанной SCADA приведена на рисунке 15.

The screenshot shows the 'Менеджер (Монитор процессов: Monitoring project)' window in WinCC OA. It displays a table of running processes with the following data:

Ст	Описание	Но.	Опции	Время запуска
2	Монитор процессов	1		2023.06.20 11:16:21.3 2
2	Менеджер БД	0		2023.06.20 11:16:28.9 14
2	Менеджер архива	0	-num 0	2023.06.20 11:16:31.3 22
2	Менеджер архива	1	-num 1	2023.06.20 11:16:31.5 23
2	Менеджер архива	2	-num 2	2023.06.20 11:16:31.8 10
2	Менеджер архива	3	-num 3	2023.06.20 11:16:32.1 3
2	Менеджер архива	4	-num 4	2023.06.20 11:16:32.4 19
2	Менеджер архива	5	-num 5	2023.06.20 11:16:32.7 21
2	Менеджер событий	0		2023.06.20 11:16:36.2 2
2	Мультиплексный прокси	1		2023.06.20 11:20:07.6 3
2	Менеджер сценариев	1	-f pvss_scripts.lst	2023.06.20 11:20:07.9 11
2	Интерфейс пользователя	2	-m gedi	2023.06.20 14:30:58.3 16
2	Драйвер эмулятора периферии	1	-num 1	2023.06.20 11:20:08.3 19
2	Web Server	2	webclient_http.ctl	2023.06.20 11:20:08.6 19
2	Клиент МЭК 61850/61400	3	-num 3	2023.06.20 11:20:08.8 9
2	Интерфейс пользователя	1	-p Amgu/1_Start_panel.r	2023.06.20 11:20:10.0 9
0	Менеджер видео	1		
0	Менеджер сценариев	1	-f VIDEO_OA_scripts.lst	
0	Клиент OPC DA	2	-num 2	
0	Сервер OPC DA	2	-num 2	
0	Драйвер МЭК 60870 101/104	3	-num 3	2023.06.20 11:20:50.8
0	Менеджер сценариев	2	-num 2 Rashet.ctl	

Рисунок 15 – Модули в разработанной SCADA

Из основных менеджеров можно отметить следующие:

- Менеджер архива, сохраняет значение тегов в базе данных в определенные временные промежутки, для анализа данных в виде таблицы или тренда;
- Менеджер сценариев, модуль позволяющий запускать скрипты, написанные пользователем;
- Интерфейс пользователя, модуль в котором ведется разработка графического интерфейса, разработка программ управления.
- Клиент МЭК 61850/61400, драйвер позволяющий осуществлять обмен данными с терминалом РЗА Siprotec;
- Клиент OPC DA, драйвер позволяющий осуществлять обмен данными с OPC-сервером.

Для вывода существующих точек данных, а также для создания новых используется редактор базы данных PARA.

Точки данных обмена с терминалом РЗА Siprotec представлены на рисунке 16 и соответствуют структуре данных обмена между SCADA и терминалом РЗА, приведенных в таблице 1.

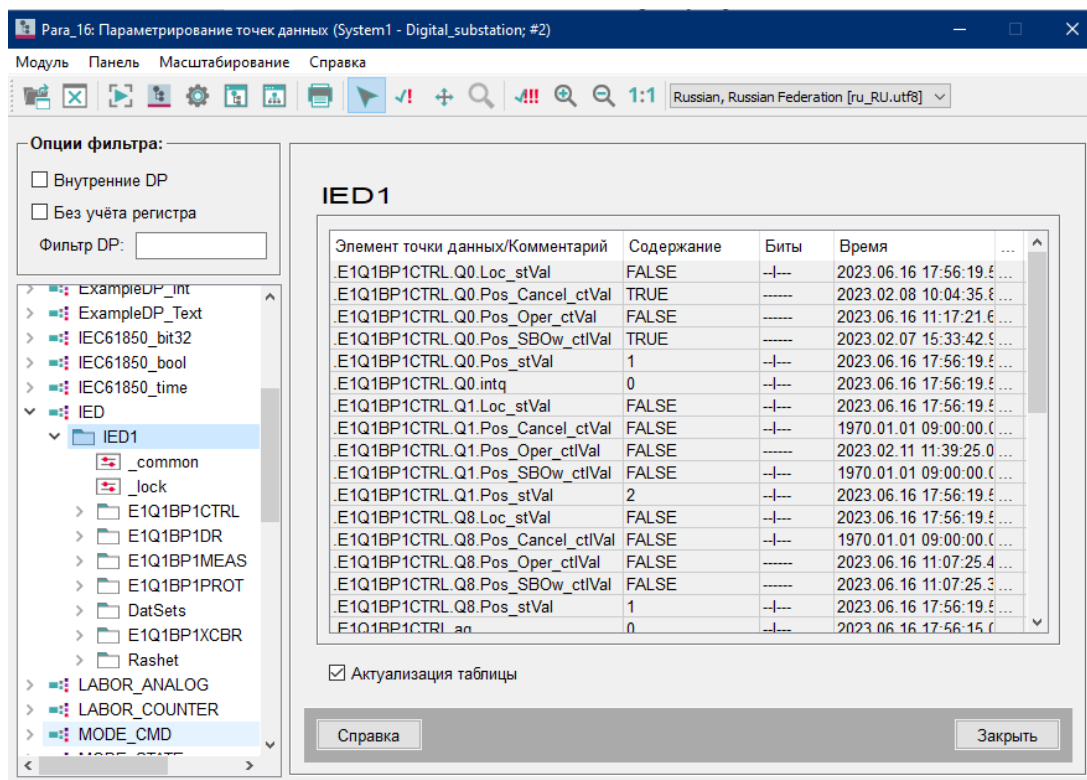


Рисунок 16 – Точки данных обмена с терминалом РЗА Siprotec

Точки данных обмена с терминалом с OPC-сервером представлены на рисунке 17 и соответствуют структуре данных обмена между SCADA и OPC-сервером, приведенных в таблице 3.

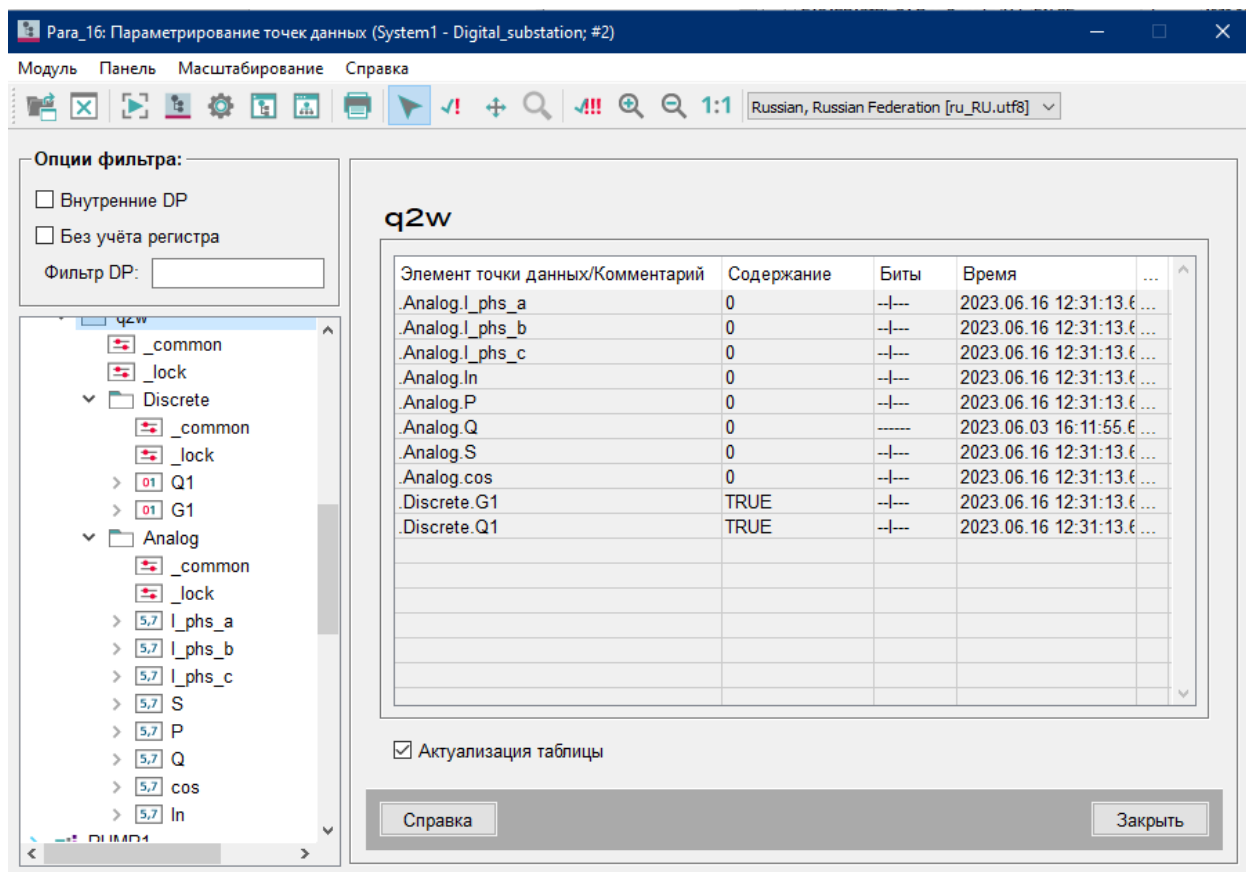


Рисунок 17 – Точки данных обмена с терминалом с OPC-сервером

Главная мнемосхема представлена на рисунке 18.

На главной мнемосхеме можно наблюдать следующие разделы:

- «Видео», выводит изображение с камер видеонаблюдения. Первая камера выводит положение тележки с выключателем, вторая выводит положение заземляющих ножей;
- «Реальный объект», отображены исполнительные механизмы реальной КРУ 10 кВ. Графическое отображение исполнительного механизма изменяется при изменении его положения, так же изменяется цвет блока. Красный цвет – положение «выключено», желтый цвет – положение «промежуточное»,

зеленый цвет – положение «включено». Рядом с исполнительными механизмами отображаются показания датчиков (показания параметров электрической сети). При двойном нажатии на любой из параметров открывается тренд данного параметра с реального датчика и виртуального датчика имитационной модели (рисунок 19). При двойном нажатии на исполнительный механизм (выключатель, заземляющие ножи) откроется окно управления этим механизмом (рисунок 20).

- «Цифровая модель», отображены исполнительные механизмы цифровой модели КРУ 10 кВ. Рядом с исполнительными механизмами отображаются показания виртуальных датчиков цифровой модели (показания параметров электрической сети).


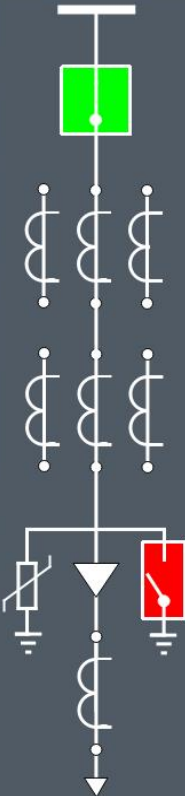
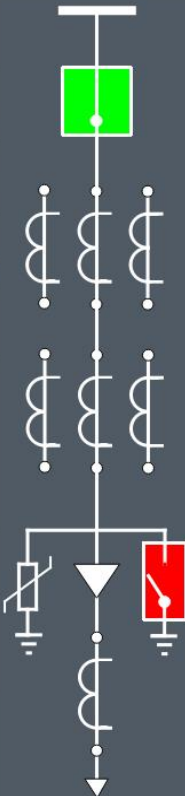

КРУ 10кВ			
Видео	Реальный объект		Цифровая модель
 06-07-2023 星期三 13:41:49 Camera 01		Частота сети: $f_{ABC} = 50.050$ Гц	
		Полная мощность: $S_{ABC} = 7.858$ МВА	
 06-07-2023 星期四 13:28:29 Camera 13		Актив. мощность: $P_{ABC} = 6.3335$ МВт	Полная мощность: $S_{ABC} = 7.7970$ МВА
		Реакт. мощность: $Q_{ABC} = 4.6512$ МВАр	Актив. мощность: $P_{ABC} = 6.283$ МВт
		Коэфф мощности: $\cos \varphi = 0.806$	Реакт. мощность: $Q_{ABC} = 4.617$ МВАр
		Напряжение: $U_A = 5.845$ кВ $U_B = 5.860$ кВ $U_C = 5.850$ кВ $U_N = 0$ кВ	Коэфф мощности: $\cos \varphi = 0.806$
		Ток: $I_A = 460.500$ А $I_B = 459.000$ А $I_C = 423.000$ А	Напряжение: $U_A = 5.845$ кВ $U_B = 5.860$ кВ $U_C = 5.850$ кВ $U_N = 0$ кВ
			Ток: $I_A = 461.835$ А $I_B = 457.276$ А $I_C = 424.539$ А

Рисунок 18 – Главная мнемосхема

Окно управления исполнительным механизмом отображает следующую информацию:

- Блок «Готов», если горит зеленым цветом, то это значит выключатель находится в рабочем состоянии и готов к работе;
- Блок «Ав. отключение», горит красным цветом при переводе выключателя в положение «выключено» при противоаварийной автоматике;
- Блок «Откл. по защите», горит красным цветом при переводе выключателя в положение «выключено» при срабатывании релейной защиты (МТЗ, ДЗ);
- Блок «Неисправ. бл. управ.», горит красным цветом при неисправности блока управления исполнительным механизмом.
- Блок «Нет связи», горит красным цветом при потере связи с терминалом РЗА Siprotec;
- Блок «Дист. режим», горит зеленым цветом при дистанционном режиме управления;
- Блок «Дист. режим», горит желтым цветом при ручном режиме управления;
- Клавиша «Выключить», переводит исполнительный механизм в положение «Выключено»;
- Клавиша «Включить», переводит исполнительный механизм в положение «Включено»;
- Блок «Выключен», горит красным цветом при положении исполнительного механизма в положении «выключено»;
- Блок «Промежуточное», горит желтым цветом при положении исполнительного механизма в положении «выключено»;
- Блок «Включен», горит зеленым цветом при положении исполнительного механизма в положении «включено»;
- Клавиша «Видео», открывает дополнительное окно для управление видеопотоком;

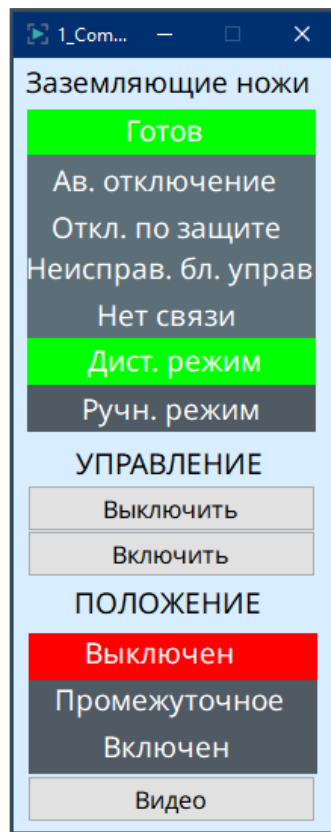


Рисунок 19 – Окно управления исполнительным механизмом

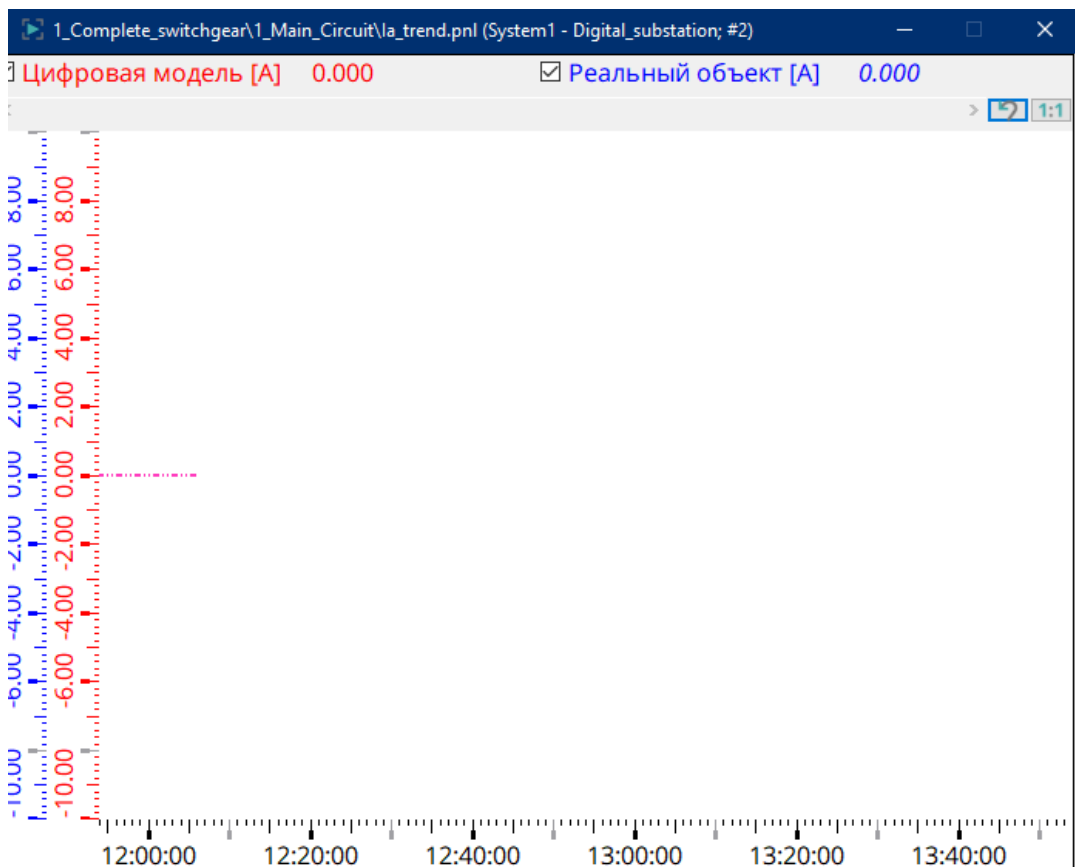


Рисунок 20 – Тренд параметра с реального датчика и виртуального датчика

2.7 Разработка цифровой модели КРУ 10 кВ

Имитационное моделирование — это метод исследования динамики системы, который позволяет оценить ее поведение в различных условиях без необходимости проведения физических экспериментов. Имитационное моделирование в Simulink — это один из самых распространенных и эффективных инструментов для создания моделей сложных систем и их анализа в виртуальной среде.

Simulink — это программа для имитационного моделирования динамических систем, разработанная компанией MathWorks. Она является частью семейства программных продуктов MATLAB. Simulink широко используется в различных областях, таких как автоматика и управление, электротехника и электроника, механика и техника, а также в научных и исследовательских работах.

С помощью Simulink можно создавать модели различных систем: от простых электрических цепей до сложных механических и многомерных систем управления. При этом, Simulink предоставляет широкий набор готовых блоков для создания моделей, а также возможность программирования собственных блоков и скриптов на MATLAB. В результате, имитационное моделирование в Simulink позволяет значительно сократить время и затраты на исследование и оптимизацию работы сложных систем в реальных условиях [3].

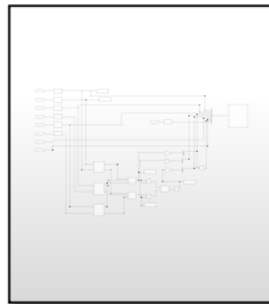
Разработанная имитационная модель КРУ 10кВ в Simulink представляет собой электромагнитную Т-образную схему замещения двухобмоточного трансформатора изображенной в приложении В.

Из основных элементов в имитационной КРУ можно выделить следующие элементы:

- Блок «Data_from_IED» (рисунок 21), в данном блоке переменные: фазное напряжение фазы А, В, С и частота сети с терминала РЗА Siprotec через OPC-сервер по протоколу MMS (МЭК 61850) поступают в модель. Затем значения напряжений пересчитывается, находится амплитуда сигнала, и далее пересчитанные значения напряжений с частотой сети поддаются на блоки «Source phase», которые генерируют трехфазное напряжение в цифровой модели. В внутреннее представление блока приведено на рисунке 22.

- положение заземляющих ножей цифровой модели;
- полная, активная, реактивная мощность цифровой модели;
- коэффициент мощности цифровой модели.

Внутреннее представление блок приведено в приложении Г.



Data_to_SCADA

Рисунок 23 – Блок «Data_to_SCADA»

- Блоки «Source phase A», «Source phase B», «Source phase C» (рисунок 24), данный блок генерирует трехфазное напряжение в цифровой модели из полученных данных от терминала РЗА Siprotec (напряжение на каждой фазе, частота сети);

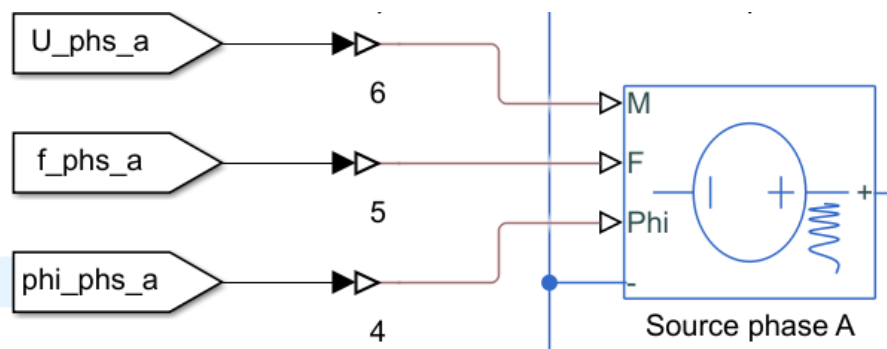


Рисунок 24 – Блок «Source phase A»

- Блоки «Circuit Breaker», блоки имитирует работу выключателя (рисунок 25) и заземляющих ножей (рисунок 26);

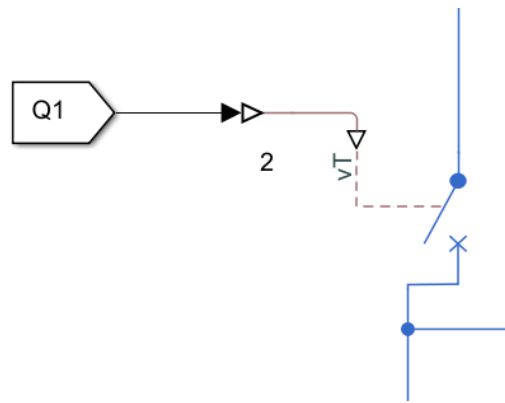


Рисунок 25 – Блок «Circuit Breaker», имитирующий работу выключателя

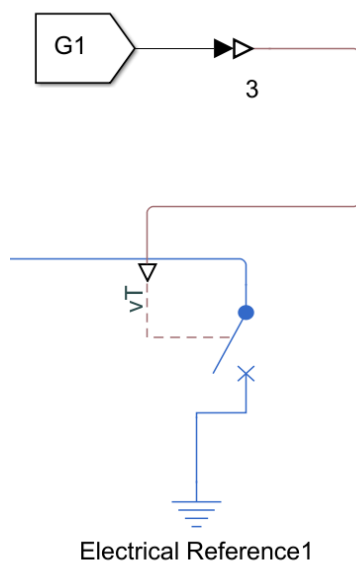


Рисунок 26 – Блок «Circuit Breaker», имитирующий работы заземляющих ножей

- Блоки «Current Sensor» (рисунок 27), «Voltage Sensor» (рисунок 28), в имитационной модели измеряют ток и напряжение соответственно;

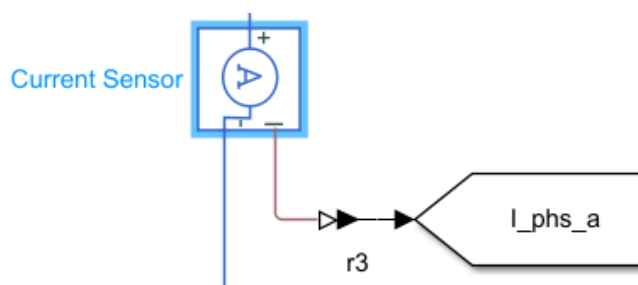


Рисунок 27 – Блок «Current Sensor»

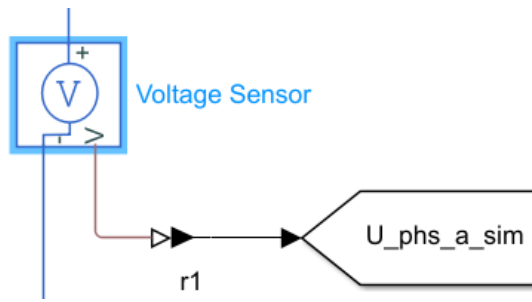


Рисунок 28 – Блок «Voltage Sensor»

- Блоки «Rz», «Lz» (рисунок 29), имитируют активную и реактивную нагрузку;

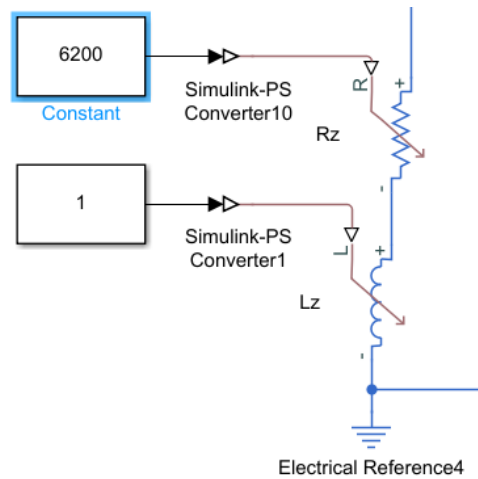


Рисунок 29 – Блоки «Rz», «Lz»

- Блок «OPC Configuration» (рисунок 30), используется для настройки связи с OPC-сервером, настройки приведены на рисунке 31;

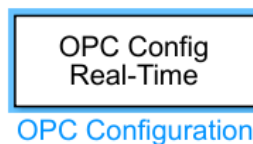


Рисунок 30 – Блок «OPC Configuration»

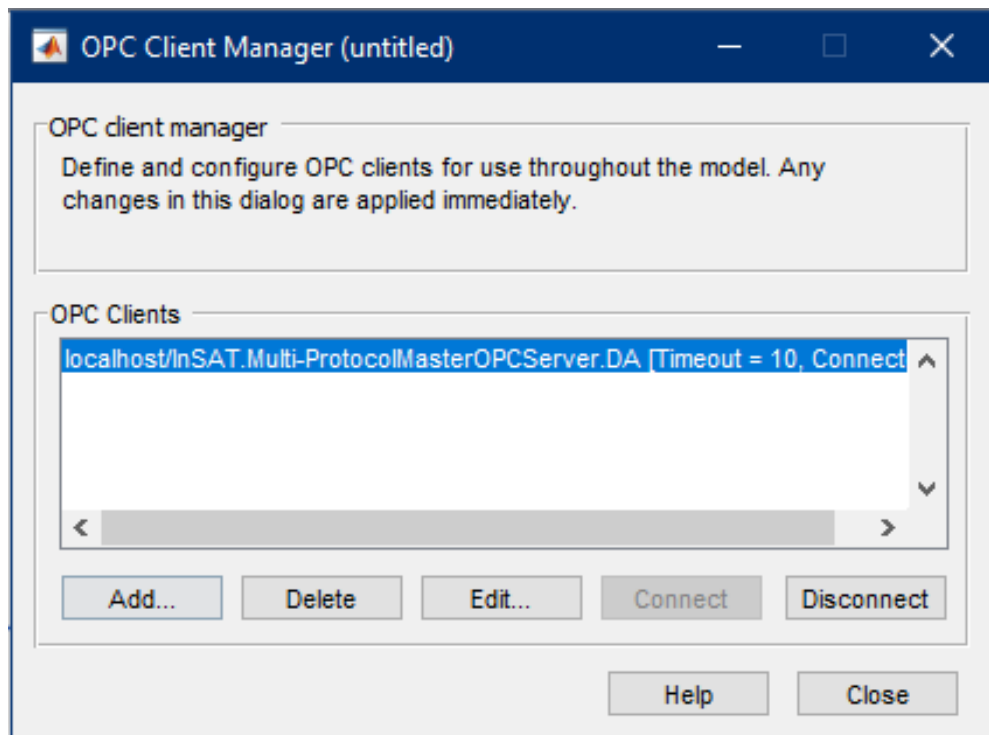


Рисунок 31– Настройки блока «OPC Configuration»

2.8 Демонстрация работы цифрового двойника КРУ 10 кВ

Далее будет приведена демонстрация работы цифрового двойника КРУ 10кВ. Стоит отметить, что КРУ 10 кВ является лабораторным оборудованием и не работает под напряжением 10кВ, силовые шинны не подключены не к одному источнику питания. Источником тока и напряжения для вторичных цепей оборудования КРУ (терминал РЗА, электрический счетчик) является специальный силовой шкаф (рисунок 32), который позволяет ступенчато в зависимости от положения переключателя изменять ток и напряжение, также возможна имитация аварийных ситуаций. Общее количество переключателей шесть штук. Три переключателя для изменения фазного напряжения для каждой фазы и три переключателя для изменения силы тока в каждой фазе. Значения напряжений для каждого положением переключателя приведено в таблице 4. Для тока приведено в таблице 5.

Таблица 4 – Значения напряжений для каждого положением переключателя

Положение переключателя	Значение напряжение во вторичных цепях, В	Значения напряжения в терминале РЗА Siprotec, кВ
0	75	7
1	65	5,9
2	75	7
3	60	5,2
4	75	7
5	54	4
6	75	7
7	47	3,6
8	75	7
9	35	2,5
10	75	7
11	25	2

Таблица 5 – Значения токов для каждого положением переключателя

Положение переключателя	Значение тока в вторичных цепях, А	Значения тока в терминале РЗА Siprotec
0	0,4	490
1	0,8	650
2	0,4	490
3	1,2	700
4	0,4	490
5	1,5	900
6	0,4	490
7	1,8	940
8	0,4	490
9	2,1	1100
10	0,4	490
11	2,4	1150



Рисунок 32 – Источник тока и напряжения для лабораторного оборудования

При помощи источника источник тока и напряжения для лабораторного оборудования на вторичные цепи терминала РЗА Siprotec подадим фазное напряжение с номиналом приблизительно равным 6 кВ, что соответствует положению переключателя для фазы А – 3, для фазы В – 3, для фазы С – 3.

В SCADA на главной мнемосхеме в разделе «Реальный объект» и «Цифровая модель» можно наблюдать, что появилось значения напряжений для каждой фазы и значения частоты сети (рисунок 33). Так как в данный момент времени выключатель находится в положении «выключено», значения токов, мощности равно нулю.



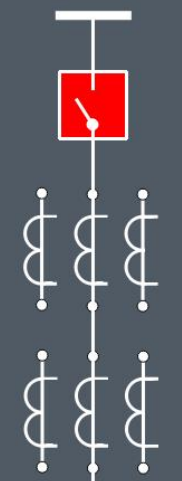

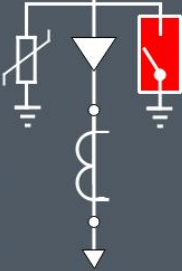
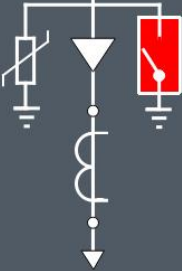
КРУ 10кВ				
Видео	Реальный объект	Цифровая модель		
			Частота сети: $f_{ABC} = 49.960$ Гц	Частота сети: $f_{ABC} = 49.960$ Гц
			Полная мощность: $S_{ABC} = 0$ МВА	Полная мощность: $S_{ABC} = 0.0000$ МВА
			Актив. мощность: $P_{ABC} = 0$ МВт	Актив. мощность: $P_{ABC} = 0.000$ МВт
			Реакт. мощность: $Q_{ABC} = 0$ МВАр	Реакт. мощность: $Q_{ABC} = 0.000$ МВАр
	Коэфф мощности: $\cos \varphi = 1.000$	Коэфф мощности: $\cos \varphi = 1.000$	Напряжение: $U_A = 5.795$ кВ $U_B = 5.845$ кВ $U_C = 5.840$ кВ $U_N = 0$ кВ	Напряжение: $U_A = 5.795$ кВ $U_B = 5.845$ кВ $U_C = 5.840$ кВ $U_N = 0$ кВ
	Ток: $I_A = 0$ $I_B = 0$ $I_C = 0$	Ток: $I_A = 0.000$ А $I_B = 0.006$ А $I_C = 0.006$ А		

Рисунок 33 – Главная мнемосхема при выключателе в положение «выключено»

В цифровой модели в Simulink изменим нагрузку:

- Активное сопротивление на фазе А – 7,8 Ом;
- Активное сопротивление на фазе В – 8,3 Ом;
- Активное сопротивление на фазе С – 11,4 Ом;
- Индуктивность на фазах А, В, С – 0,08 Гн.

Выставим ток для фазы А номиналом 460 А; для фазы В – 459А; для фазы С – 423 А при помощи изменения положений переключателей на источнике токов и напряжение.

С помощью окна управления выключателем переведем его в положение «включено».

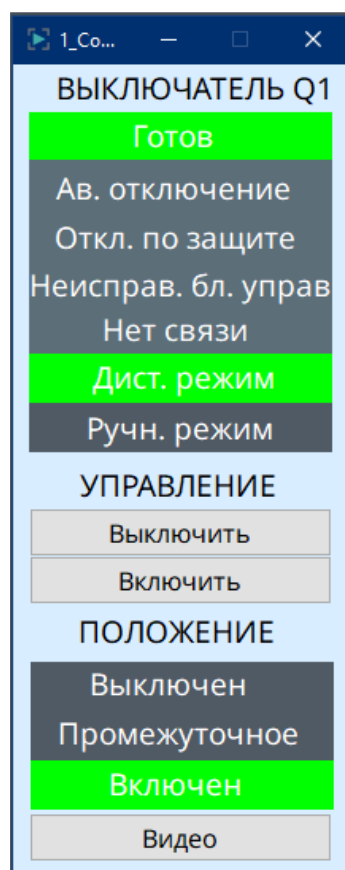


Рисунок 34 – Главная мнемосхема при выключенном выключателе

В главном окне в разделе «Реальный объект» и «Цифровая модель» изменились значения токов, мощности (рисунок 35). Значения параметров электрической сети в данный момент времени приведены в таблице 6. Из таблицы видно, что есть несущественная погрешность, которая объясняется погрешностью узлах измерения терминала РЗА Siprotec.

Таблица 6 – Значения параметров электрической сети

Параметр	Реальный объект	Цифровая модель	Ед. измер.
Частота сети	50	50	Гц
Полная мощность	7,858	7,7970	МВА
Активная мощность	6,3335	6,283	МВт
Реактивная мощность	4,6512	4,617	МВАр
Коэффициент мощности	0,806	0,8067	
Напряжение на фазе А	5,845	5,845	кВ
Напряжение на фазы В	5,860	5,860	кВ

Продолжение таблицы 6

Напряжение на фазы С	5,850	5,850	кВ
Ток в фазе А	460,5	461,835	А
Ток в фазе В	459	457,276	А
Ток в фазе С	423	424,539	А

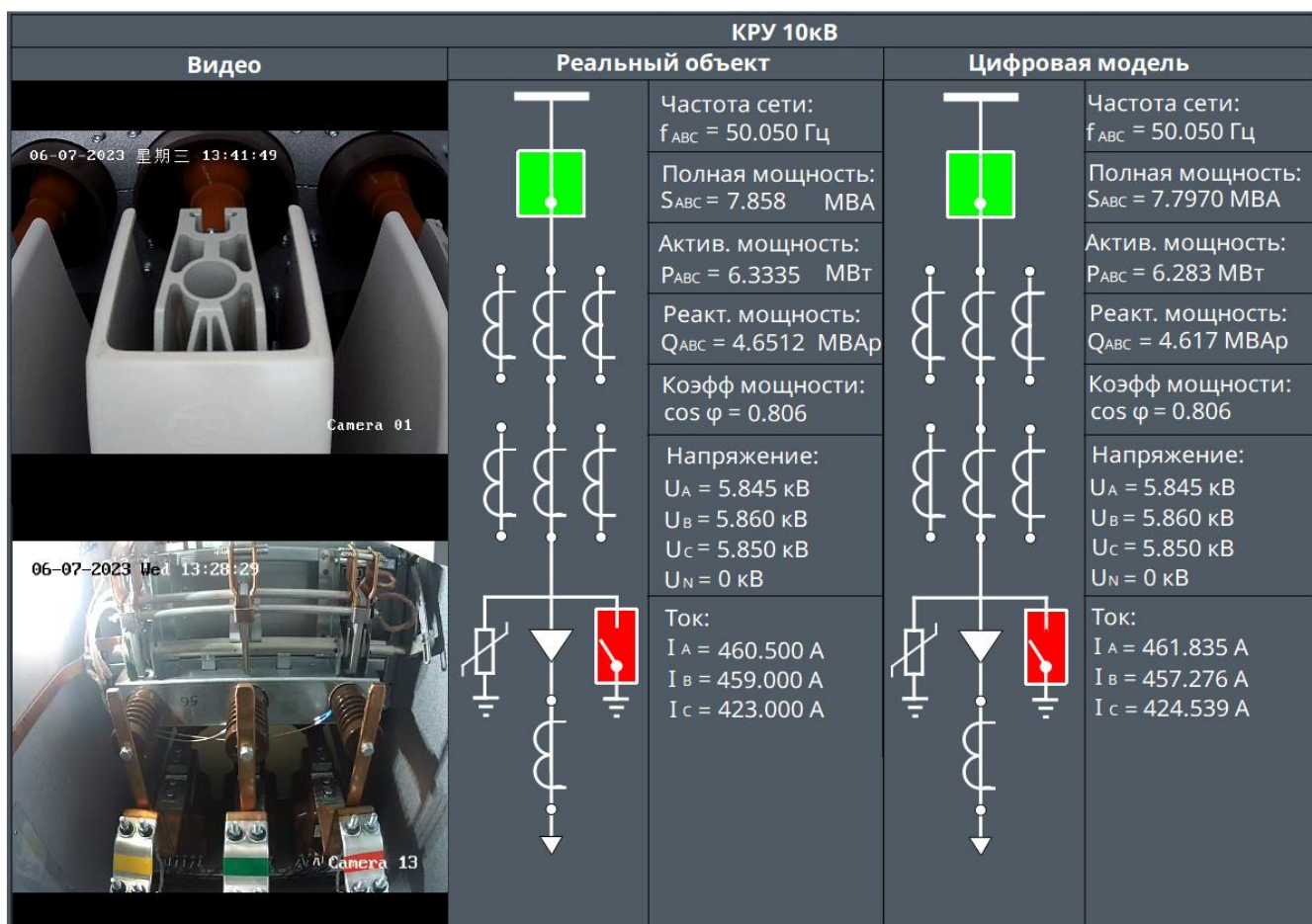


Рисунок 35 – Главная мнемосхема при выключателе в положение «включено»

Посмотрим, как ведёт система при изменении напряжения на фазе А. Для этого изменим на источнике токов и напряжений положения переключателя, отвечающего за напряжение на фазе А. Произведем ступенчатое изменение напряжения с 5кВ вначале до 7кВ, затем опять до 5 кВ, до 4кВ и опять до 5кВ. Проанализируем временной ряд токов фазы А (рисунок 36). На графике можно видеть тренд тока в фазе А реального объекта (синяя линия), ток в фазе А цифровой модели (красная линия), напряжение на фазе А (черная линия). Как видно при

изменении напряжения с 5кВ до 7 кВ произошло изменения тока цифровой модели, ток реального объекта не изменился так как к реальному КРУ не подключена нагрузка, и он управляется от источника токов и напряжений.

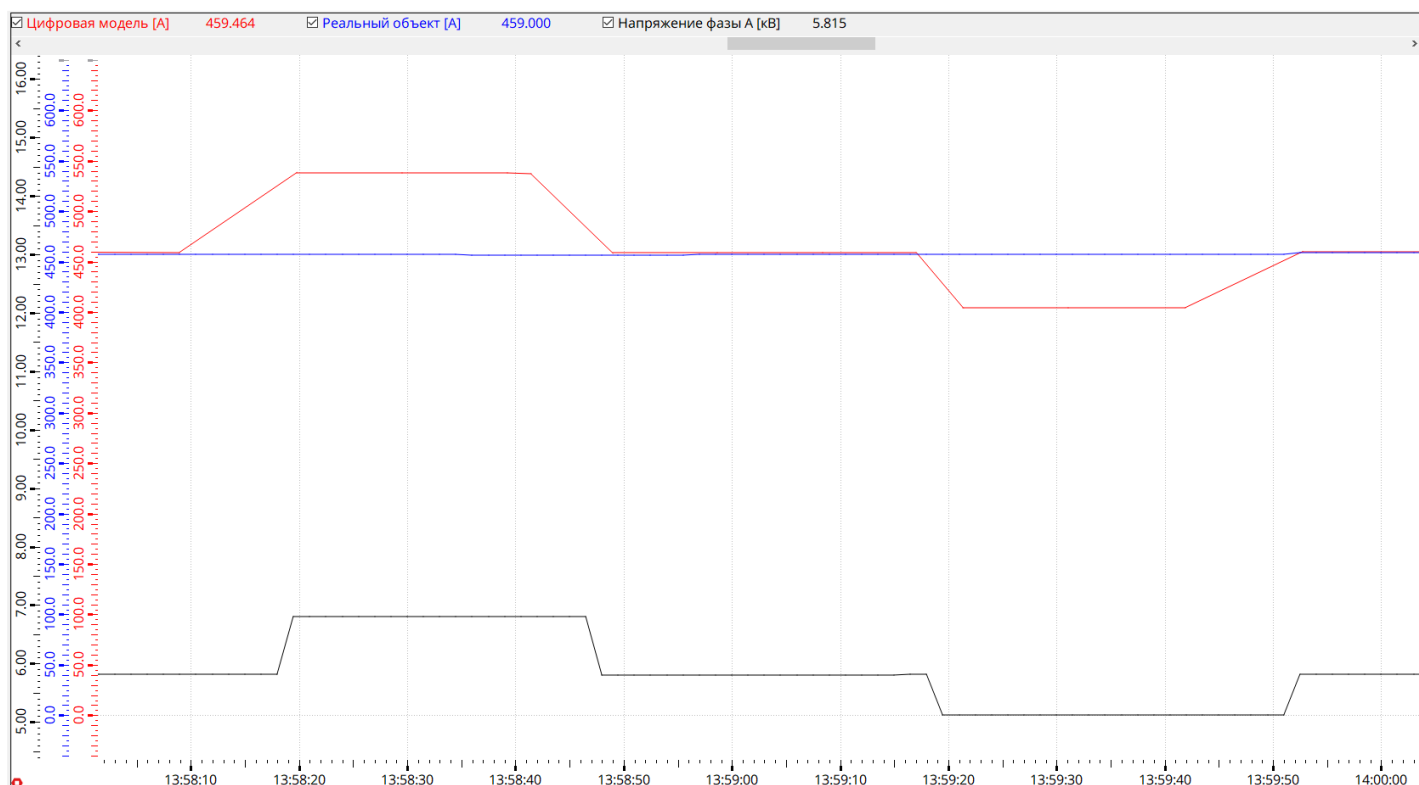


Рисунок 36 – Временной ряд токов и напряжений фазы А (синий тренд – ток реального объекта, красный тренд – ток цифровой модели, черный тренд – напряжение) при изменении напряжения реального объекта

На этом примере, как раз видно, что в потенциале может наблюдать диспетчер при колебании напряжения и рассогласовании токов реального объекта и цифровой модели, которые могут возникать при аварийных ситуациях или изменении параметров (свойств) электрической нагрузки.

Посмотрим на другой пример. Произведем ступенчатое изменение тока в фазе А реального объекта (рисунок 37). На временном графике видно, что ток цифровой модели не изменился в отличие от реального объекта, так как воздействие на цифровую модель не было, напряжения не изменялось, нагрузка осталась прежней. В данном случае так же можно наблюдать, рассогласование токов

реального объекта и цифровой модели, что может тоже сказать о возможной аварийной ситуации или изменения параметров (свойств) электрической нагрузки.



Рисунок 37 – Временной ряд токов и напряжений фазы А (синий тренд – ток реального объекта, красный тренд – ток цифровой модели, черный тренд – напряжение) при изменении тока реального объекта

2.9 Вывод по второй главе

Данная глава была посвящена разработке цифрового двойника КРУ 10 кВ. Была разработана структурная схема цифрового двойника, разработано программное обеспечение (цифровая модель КРУ 10 кВ, SCADA). Цифровой двойник реализован на практике.

Цифровой двойник КРУ 10 кВ протестирован при различных воздействиях на реальный объект (изменения напряжений на фазе А, В, С, изменения токов в фазах А, В, С, изменение положения выключателя, имитация короткого замыкания путем изменения положения заземляющих ножей). Эксперименты показали приемлемые показатели точности цифровой модели относительно реального объекта.

Данный цифровой двойник КРУ 10 кВ будет полезен для тех предприятий, на которых заранее известно, какая будет конечная нагрузка или на предприятии будет реализована диспетчеризация, где будет осуществлен контроль нагрузки при помощи коммутационного оборудования (изменения положения выключателей, положение – автоматический выключателей).

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

Создание цифровых двойников трансформаторов — это крайне важная задача в области электроэнергетики. Цифровой двойник позволит проводить компьютерное моделирование его работы и прогнозировать его поведение в различных условиях.

3.1 Анализ проблем при эксплуатации силовых трансформаторов

Силовые трансформаторы играют важную роль в энергосистеме, поскольку они позволяют передавать электрическую энергию на большие расстояния и изменять напряжение электрической энергии в соответствии с требованиями потребления. Он определяет значительную надежность и передачу электрической энергии.

Отказ трансформатора ведет к тяжелым последствиям, а восстановления его работоспособности требует длительного времени.

Отказ такого важного элемента, как трансформатор может привести к большим потерям за недоотпуска электроэнергии.

При эксплуатации силовых трансформаторов могут возникать различные проблемы. Рассмотрим некоторые из них:

1. Повреждения обмоток. Обмотки силовых трансформаторов могут повреждаться из-за перегрузок, коротких замыканий или вибраций. Такие повреждения могут привести к понижению эффективности трансформатора и снижению качества электроэнергии, которую он производит.

2. Наличие магнитных загрузок. Магнитные загрузки могут возникнуть из-за неправильной настройки трансформатора или из-за наличия магнитных материалов вблизи трансформатора. Это может привести к снижению эффективности трансформатора и повышенному нагреву.

3. Повреждения изоляции. Изоляция трансформатора может повреждаться из-за воздействия влаги, пыли, грязи, животных и т.д. Поврежденная изоляция может привести к коротким замыканиям и другим проблемам.

4. Несоответствие нагрузки. Несоответствие нагрузки может привести к перегрузкам и снижению эффективности трансформатора. Например, если трансформатор предназначен для низкой нагрузки, но используется для высокой нагрузки, это может привести к его перегрузке и повреждению [8].



Рисунок 38 – Повреждение изоляции обмотки масляного трансформатора

По статистике чаще всего из строя выходят следующие элементы трансформатора: вводы, обмотки, РПН, система охлаждения, устройства газовой защиты, ПБВ [8].

Для предотвращения этих проблем необходимо регулярно производить диагностику трансформатора. Однако часто по имеющемуся данным традиционной диагностики, многие аварийные ситуации нельзя предсказать заблаговременно.

Так по статистике наиболее распространённым причинами отказов силовых трансформаторов является изменения свойств конструкционных материалов и дефекты конструкции при изготовлении (рисунок 39) [8].



Рисунок 39 – Причины отказов силовых трансформаторов в процентах

Большинство из представленных причин можно избежать, внедрив интеллектуальную систему мониторинга за трансформаторами, которая могла бы предсказывать сложно-выявляемые дефекты, которую с помощью традиционной диагностики распознать нельзя.

Современные интеллектуальные системы мониторинга за трансформаторами использует алгоритмы машинного обучения, нейронные сети. Но данные алгоритмы необходимо обучить, собирая данные с различных датчиков и испытывая объект исследования в различных ситуациях, в частности для силового трансформатора, испытывая его в различных режимах. С действующим оборудованием это будет проблематично, дорого и недопустимо продолжительно по времени. Можно решить данную проблему путем построения имитационной мо-

дели трансформатора и тем самым провести различные эксперименты на имитационной модели, например симитировать межвитковое замыкания и тем самым обучить алгоритмы распознавания дефектов.

Но возникает следующая проблема: «Как удостовериться, что имитационная модель трансформатора достаточно точно описывает и моделирует работу реального трансформатора?». Необходимо верификация параметров имитационной модели, в частности для трансформаторов это верификация параметров схемы замещения (проверка достоверности результатов расчёта параметров схемы замещения).

3.2 Система мониторинга переходных режимов

Система мониторинга переходных режимов (СМПП, англ. сокр. WAMS — Wide Area Measurement System), основана на использовании синхронизированных векторных измерений и позволяет проводить мониторинг динамических свойств энергосистемы. СМПП устанавливаются на ключевых объектах электроэнергетики и способствуют повышению эффективности диспетчерского управления и качества управления режимами энергосистемы.

СМПП предоставляет данные, на основе которых осуществляются:

- измерение электрических величин в режиме реального времени для глобального мониторинга состояния энергосистемы;
- определение запасов устойчивости (пропускная способность линий, контроль напряжений и фазовых углов в узлах энергосистемы), обнаружение качаний мощности;
- возможность проверки модели энергосистемы, запись архивов и аварийных событий, анализ аварийных событий, измерение электрических величин в режиме реального времени [9].

2.2.1 Синхронизированные векторные измерения (СВИ)

Синхронизированные векторные измерения — это совокупность векторных и скалярных параметров электроэнергетического режима, измеренных и рассчитанных с заданной дискретизацией в однозначно определенные моменты

времени, синхронизированные с помощью глобальных навигационных спутниковых систем. Данная технология регламентирована в стандарте IEEE C37.118 [11].

Технология синхронизированных векторных измерений реализуется на основе следующих принципов:

- измерение мгновенных значений фазных токов и напряжений с дискретностью более 128 точек за период промышленной частоты, вычисление СВИ от 1 и более раз на периоде промышленной частоты с привязкой к меткам единого времени с точностью 1 мкс;

- сбор и обработка в режиме реального времени данных СВИ с объектов электроэнергетики в ВК СМНР СО;

- разработка и функционирование на базе СВИ расчетных алгоритмов, обеспечивающих в требуемом временном интервале визуализацию динамики изменения ПЭР, идентификацию технологических нарушений и некорректной работы энергетического оборудования, мониторинг низкочастотных колебаний с определением их параметров и уровня опасности, оценивание состояния электрического режима, определение параметров схемы замещения оборудования, диагностику неисправностей систем регулирования и т.п.

Точная синхронизация, высокая дискретизация, малое время отклика измерений, а также измерение параметров синхронизированного вектора при частоте, отличной от номинальной, предоставляют возможность определения и мониторинга динамических свойств энергосистемы как объекта управления [11].

Данный метод позволяет получать точные и надежные данные о состоянии электрической системы, включая параметры напряжения, тока, мощности, частоты и других параметров, в режиме реального времени. Для этого в различных точках электрической сети устанавливаются фазовые измерительные устройства, которые осуществляют синхронизированные измерения параметров напряжения и тока в режиме реального времени.

Синхронизированные векторные измерения позволяют оперативно отслеживать изменения параметров электрической системы в режиме реального времени, выявлять возможные неисправности и ошибки в работе системы, а также принимать меры по предотвращению возможных аварийных ситуаций.

Рассмотрим представление синусоидального сигнала, имеющий вид:

$$x(t) = X_m(t) \cos (\int \omega(t)dt + \delta_0) \quad (1)$$

Где ω – частота сигнала в радианах в секунду, δ_0 – фазовый угол в радианах, X_m – амплитуда сигнала. Среднеквадратичное значение входного сигнала равно $X_m/\sqrt{2}$.

Данный сигнал может быть представлен на комплексной плоскости в виде синхронизированного вектора:

$$X(t) = (X_m(t)/\sqrt{2}) \exp(i \delta(t)) = (X_m(t)/\sqrt{2})(\cos \delta(t) + i \sin \delta(t)) \quad (2)$$

Где $X_m(t)/\sqrt{2}$ – модуль (амплитуда) синхронизированного вектора, равный действующему значению рассматриваемого сигнала;

$\delta(t) = \int \omega(t)dt + \delta_0$ – фазовый угол синхронизированного вектора, равный углу между основной гармоникой фазного тока (напряжения) и условной косинусоидой промышленной частоты, фаза которой равна нулю при смене секунд UTC (рисунок 41). Представление сигнала в виде синхронизированного вектора на рисунке 40.

$\omega(t)$ – круговая частота синхронизированного вектора [11].

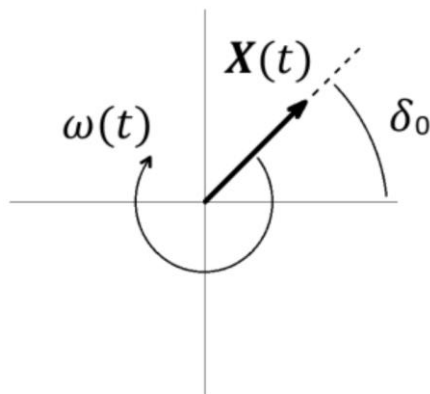


Рисунок 41 – Вращение синхронизированного вектора при частоте, отличной от номинальной

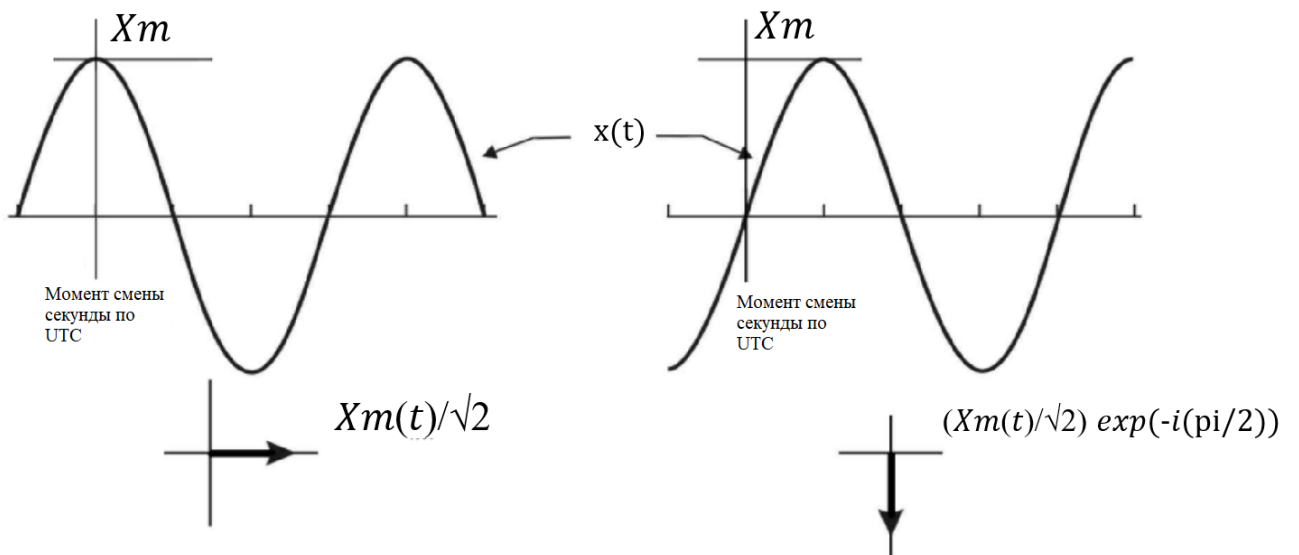


Рисунок 41 – Представление синхронизированного вектора

Устройство синхронизированных векторных измерений (PMU) (рисунок 42), осуществляет измерение амплитуды и фазового угла входящего сигнала с присвоением метки. С помощью этих данных мы получаем векторное представление синусоидальной величины.



Рисунок 42 – Устройство синхронизированных векторных измерений

УСВИ осуществляет измерение следующих параметров:

- синхронизированные векторы фазных напряжений, где модулем является действующее значение основной гармоники фазного напряжения, а фазовым углом соответствующий абсолютный угол напряжения;

- синхронизированные векторы фазных токов, где модулем является действующее значение основной гармоники силы фазного тока, фазовым углом соответствующий абсолютный угол тока;

- частота пофазно [11];

2.2.2 Структурная схема системы мониторинга переходных режимов

Структурная схема системы мониторинга переходных режимов представлена на рисунке 43.

В данной структурной схеме система мониторинга переходных режимов представлены следующие элементы:

- PMU — phasor measurement unit (устройство синхронизированных векторных измерений), выполняет функции векторных измерений, регистрирует электромеханические переходные режимы энергосистемы, обеспечивает полный набор измеряемых параметров трехфазной электрической сети.

- PDC — phasor measurement unit (концентратор данных векторных измерений), представляет собой программно-аппаратный комплекс, осуществляющий сбор векторных измерений с устройств синхронизированных векторных измерений (PMU) по протоколу IEEE C37.118 и дальше передает объединенные пакеты векторных измерений на верхний уровень по протоколу C37.118.

Все оборудование синхронизировано с глобальными навигационными спутниковыми системами (ГЛОНАСС/GPS).

Протокол C37.118 (или IEEE C37.118) — это стандарт протокола обмена данными для устройств синхронизированных векторных измерений (Synchrophasors). Он был разработан IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) и определяет формат и структуру данных, передаваемых между устройствами синхронизированных векторных измерений и центром управления электроэнергетической системой.

Протокол C37.118 обеспечивает передачу измеренных параметров (напряжение, ток, фазовый угол, частота и т.д.) в режиме реального времени с высокой точностью и разрешением. Данные передаются в виде синхронизированных векторных измерений, что позволяет операторам электроэнергетических систем быстро оценивать состояние и динамику сети и принимать необходимые меры для обеспечения ее стабильной работы.

Протокол C37.118 использует формат данных в стандарте IEEE 1344, который определяет структуру кадра данных, формат записи чисел с плавающей точкой и кодирование данных. Кадры данных передаются по сети с помощью протокола передачи данных TCP/IP, UDP/IP.

Протокол C37.118 является широко используемым стандартом для обмена данными между устройствами синхронизированных векторных измерений и центрами управления электроэнергетической системой. Он обеспечивает высокую точность и надежность передачи данных, что позволяет операторам электроэнергетических систем быстро реагировать на любые изменения и сбои в работе сети.

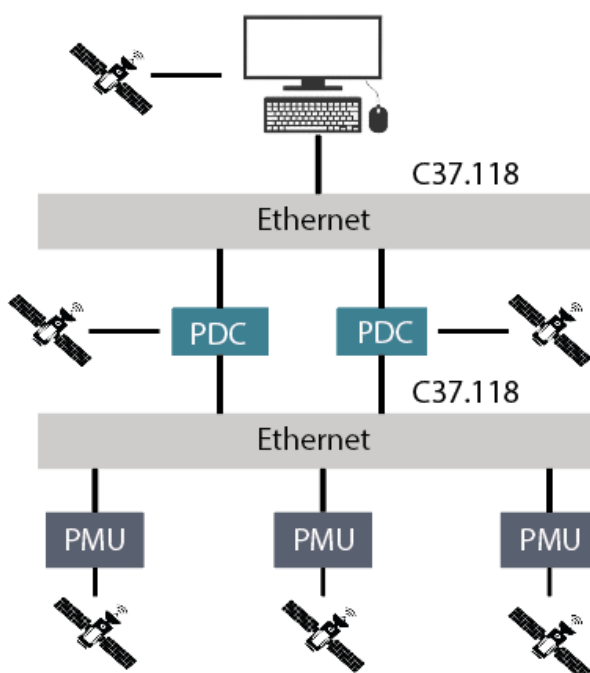


Рисунок 43 – Структурная схема система мониторинга переходных режимов

3.3 Разработка программного обеспечения для работы с системой мониторинга переходных режимов и создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был разработано программное обеспечение для работы с системой мониторинга переходных режимов и создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов.

Созданные цифровые двойники двухобмоточных трансформаторов при помощи разработанного программного обеспечения позволит проводить верификацию параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора путем сбора при помощи системы мониторинга переходных режимов синхронизированных измерений параметров электрической сети с первичной и вторичной обмотки двухобмоточного трансформатора (синхронизированные вектора токов и напряжения, фазных углов, частоты сети), имитационного моделирования работы двухобмоточного трансформатора и сравнения полученных данных имитационного моделирования с данными системы мониторинга переходных режимов.

Программное обеспечение реализовано в MATLAB. Работа с оборудованием системы мониторинга переходных режимов осуществляется по протоколу С37.118. Кроме того, программное обеспечение включает в себя имитационную модель двухобмоточного трансформатора в Simulink. Взаимодействие с пользователем происходит через графическое приложение (рисунок 44).

Работа программного обеспечения осуществляется следующим образом. Пользователь вводит через графическое приложение параметры протокола С37.118, параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора и параметры нагрузки. После через специальную клавишу осуществляет запуск процесса сбора данных (время сбора данных задает пользователь в параметрах протокола С37.118). По окончании сбора данных программное обеспечение обрабатывает полученные данные, после обработки данных, пользователь открывает через приложение имитационную модель двухобмоточного трансформатора и запускает процесс моделирования.

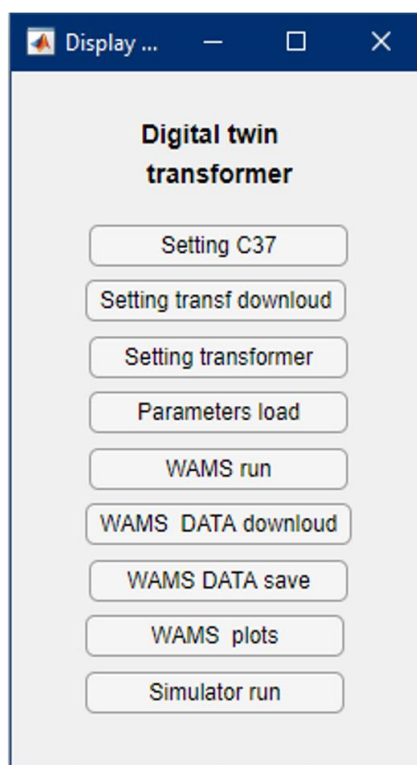


Рисунок 44 – Графическое приложение

В процессе моделирования на первичную обмотку имитационной модели подается напряжение, сгенерированное из полученных данных от системы мониторинга переходных режимов, т.е. значения синхронизированных векторных измерений: напряжения, фазного угла напряжения и частота сети на первичной обмотке трансформатора. При этом моделирование начинается в тот момент времени, когда фазный угол равен 0, для этого программа обработки данных определяет в какой момент времени фазный угол равен 0 и с этого момента времени начинается моделирование.

Входе моделирования, пользователь наблюдает на графиках в Simulink изменения, с равными интервалами по времени, значений синхронизированных векторных измерений имитационной модели трансформатора (ток, фазовый угол, напряжение на первичной и на вторичной обмотке) и изменения тех же значений синхронизированных векторных измерений полученных от системы мониторинга переходных режимов (ток, фазовый угол, напряжение на первичной и на вторичной обмотке).

Блок-схема работы программного обеспечения изображена на рисунке 45.

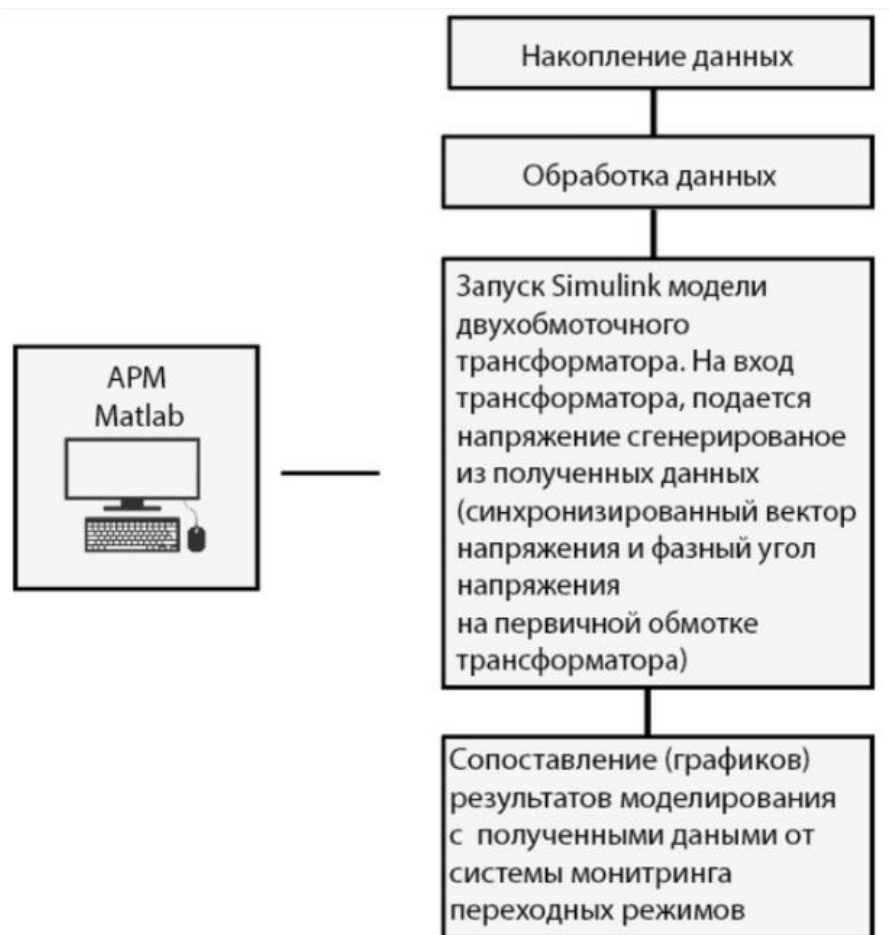


Рисунок 45 – Блок-схема работы программного обеспечения

3.4 Цифровая модель двухобмоточного трансформатора в Simulink

Разработанная цифровая модель двухобмоточного трансформатора в Simulink/MATLAB (приложение А) представляет собой электромагнитную Т-образную схему замещения двухобмоточного трансформатора изображенной на рисунке 74.

Из основных элементов в имитационной модели двухобмоточного трансформатора можно выделить следующие элементы:

- Блок «Solver Configurator» из библиотеки элементов SimScape (рисунок 46). Блок «Solver Configurator» используется для настройки решателей для моделей Simscape. Он позволяет настраивать параметры решателя для оптимизации производительности моделирования и точности результатов. В «Solver Configurator» шаг интегрирования настроен на значение $100 \cdot 10^{-6}$ секунд, тип решателя выбран Backward Euler.

Backward Euler — это неявный метод численного интегрирования дифференциальных уравнений. В отличие от явных методов, которые требуют знания значения функции на следующем шаге интегрирования, неявные методы используют значения на текущем и следующем шаге интегрирования для вычисления значения на следующем шаге. Является важным инструментом для моделирования физических процессов в различных областях науки и техники.

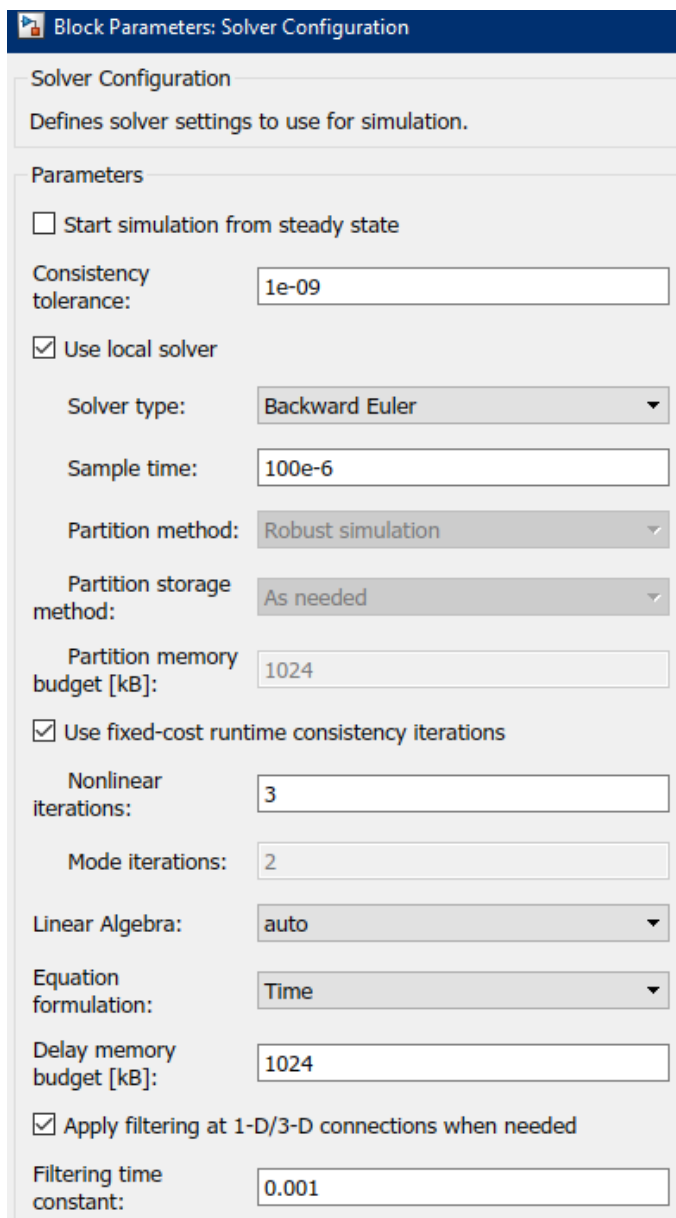


Рисунок 46 – Имитационная модель двухобмоточного трансформатора в Simulink/MATLAB

- Блок «Programmable Voltage Source». Programmable Voltage Source в Simscape — это блок, который позволяет создавать источник постоянного или переменного напряжения с программно управляемым значением напряжения. Он может быть использован в моделировании различных электрических систем, таких как источники питания, электронные схемы и другие. Блок позволяет задать различные параметры, такие как амплитуду, частоту, фазу, время нарастания и спада, а также задержку включения и выключения источника. Он также может быть использован для создания импульсных сигналов и других форм сигналов.

- Блок «Source» (рисунок 47). Задаёт параметры генерируемого напряжения блоком «Programmable Voltage Source», передавая ему раз в 20 мс параметры амплитуды и частоту. Значения параметров амплитуды и частоту получают в результате опроса системы мониторинга переходных режимов.

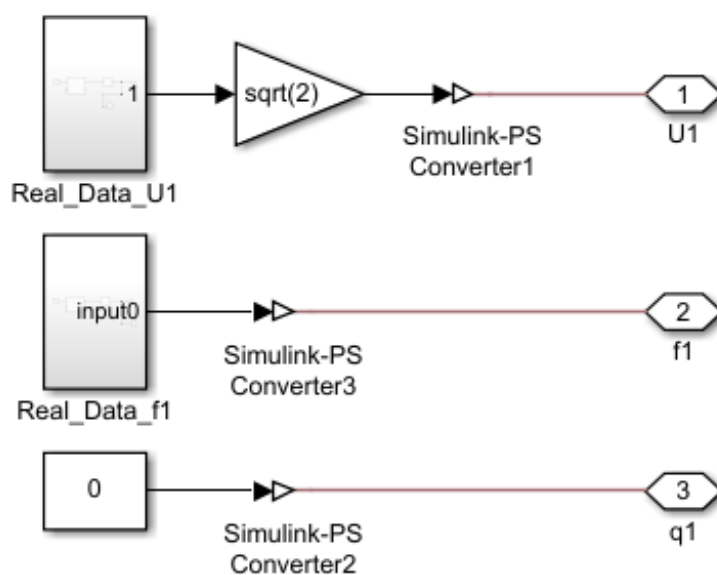


Рисунок 47 – Блок «Source»

Непосредственно в блоке «Source» за это отвечает блок «Real_Data_U1» и «Real_Data_f1». Оба блока имеют одинаковую структуры и представлены на рисунке 48.

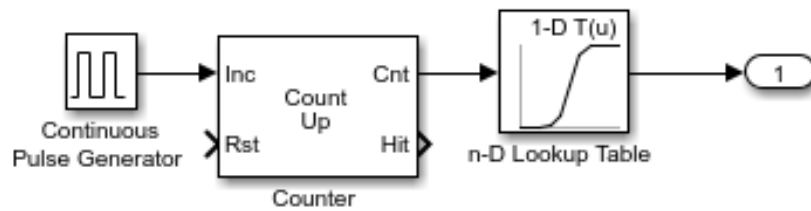


Рисунок 48 – Блок «Real_Data_U1» и «Real_Data_f1»

В данном блоке элемент «Continuous Pulse Generator» генерирует прямоугольный сигнал с дискретизацией 20 мс (рисунок 49). Элемент «Counter» является счетчиком, который подсчитывает входящие импульсы и передает их в элемент «n-D Lookup Table». На выходе элемента «n-D Lookup Table» появляется сигнал со значением равным номеру в массиве данных, указанных в параметрах элемента.

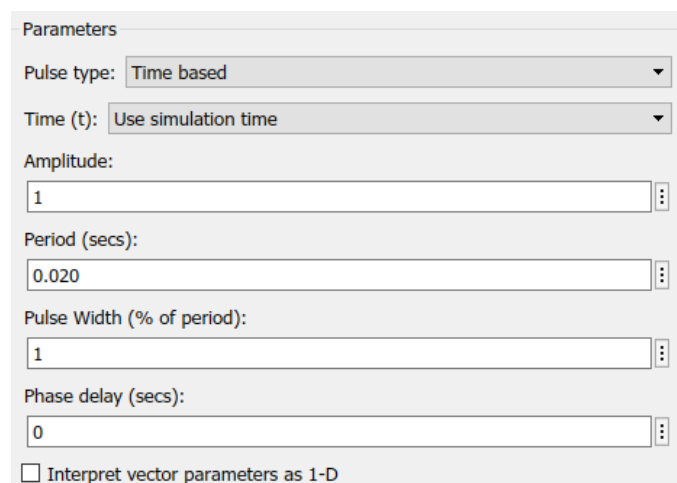


Рисунок 49 – Параметры элемента «Continuous Pulse Generator»

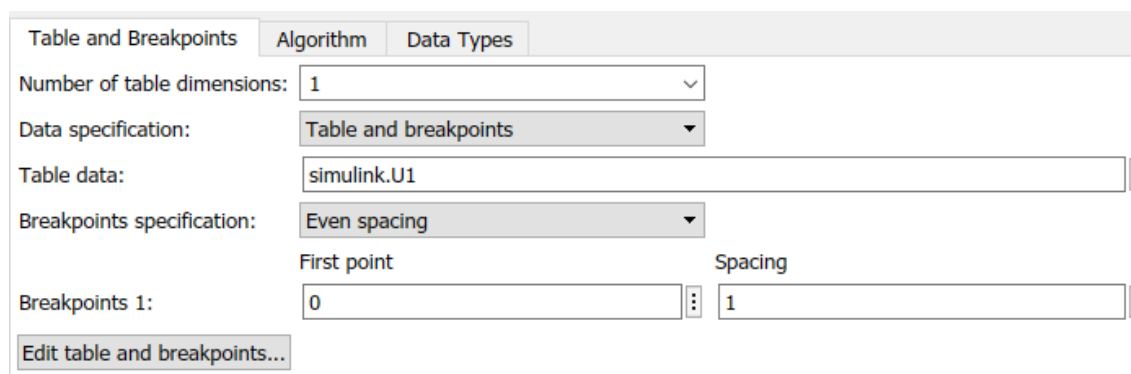


Рисунок 50 – Параметры элемента «n-D Lookup Table»

- Блоки «PMU» (рисунок 51). Представляют собой виртуальные устройства синхронизированных векторных измерений (PMU). Сами измерения производит элемент «PMU (PLL-Based, Positive-Sequence)» (рисунок 52). Его параметры приведены на рисунке 53.

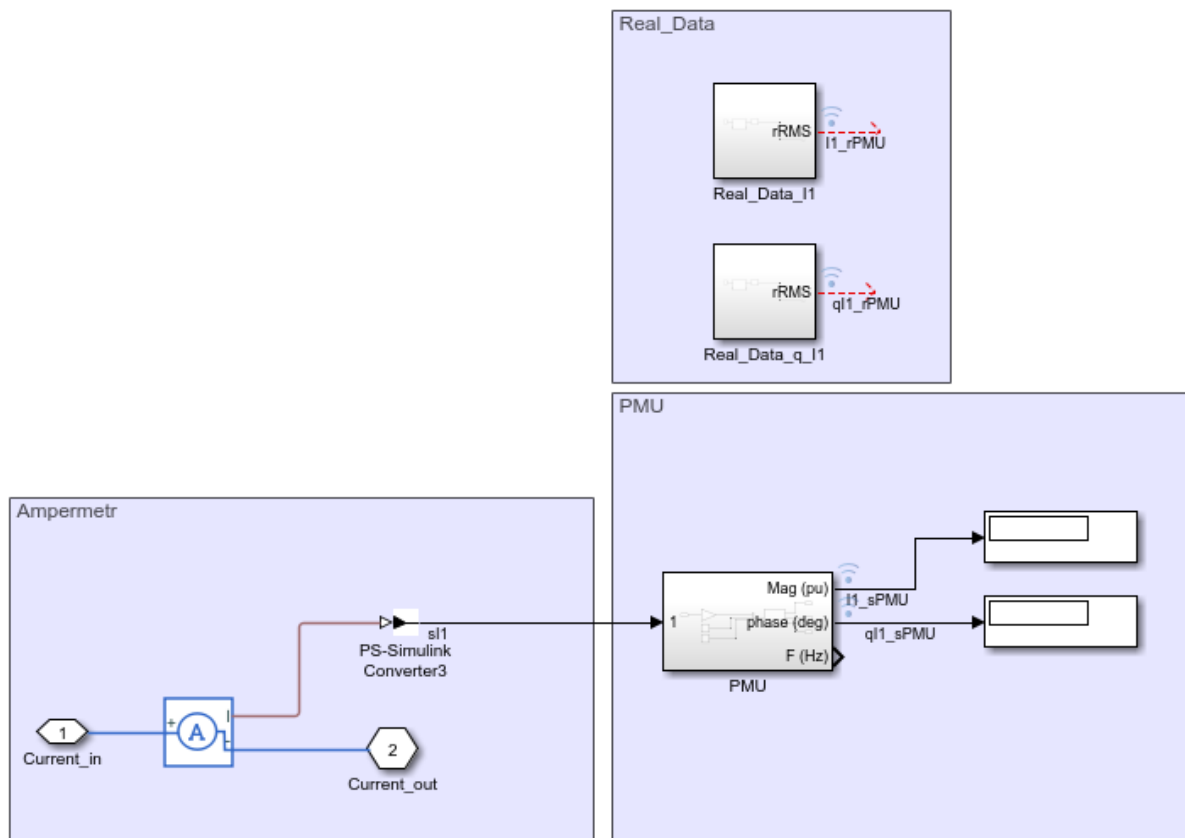


Рисунок 51 – Блок «PMU»

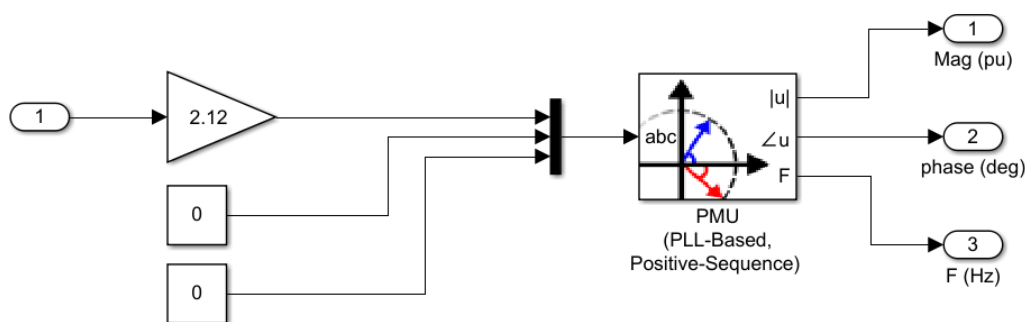


Рисунок 52 – Элемент «PMU (PLL-Based, Positive-Sequence)»

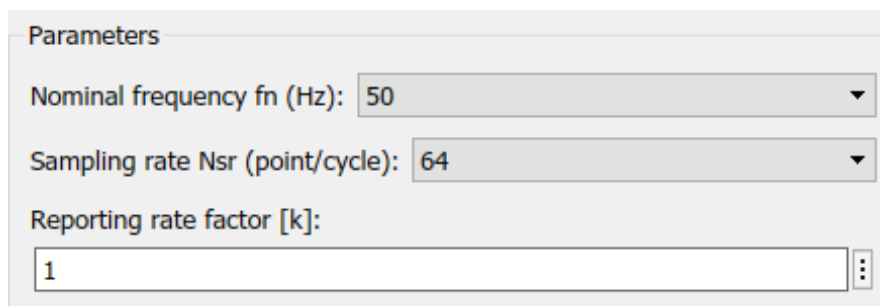


Рисунок 53 – Параметры элемента «PMU (PLL-Based, Positive-Sequence)»

- Блок «Lm» (Рисунок 54). Представляет собой индуктивность ветви намагничивания. При работе с цифровым двойником пользователь может выбрать тип представления ветви индуктивность, либо это будет статическое расчетное представление, либо зависимость индуктивности от напряжения в первичной обмотке трансформатора или зависимость магнитного потока от тока.

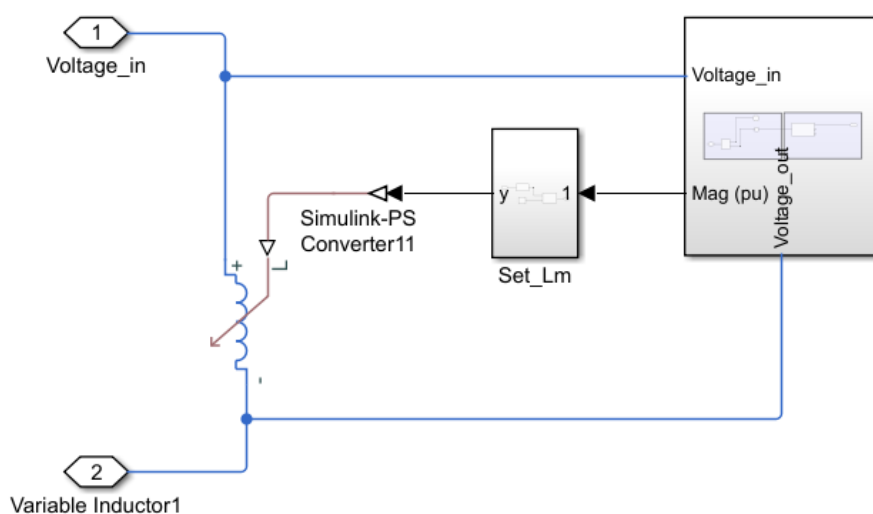


Рисунок 54 – Блок «Lm»

Блок «Set_Lm» (рисунок 55). В котором располагается функция (рисунок 56), которая в зависимости от ЭДС изменяет индуктивность ветви намагничивания.

Блок «Ideal Transformer» представляет собой идеальный трансформатор. В параметрах блока указывается коэффициент трансформации (рисунок 57).

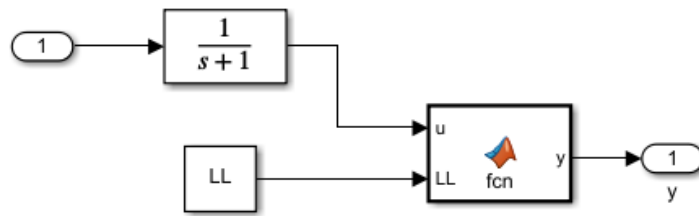


Рисунок 55 – Блок «Set_Lm»

```
function y = fcn(u,LL)
    u=fix(u);
    if u==0
        y = LL(1);
    else
        y = LL(u);
    end
```

Рисунок 56 – Блок «Set_Lm»

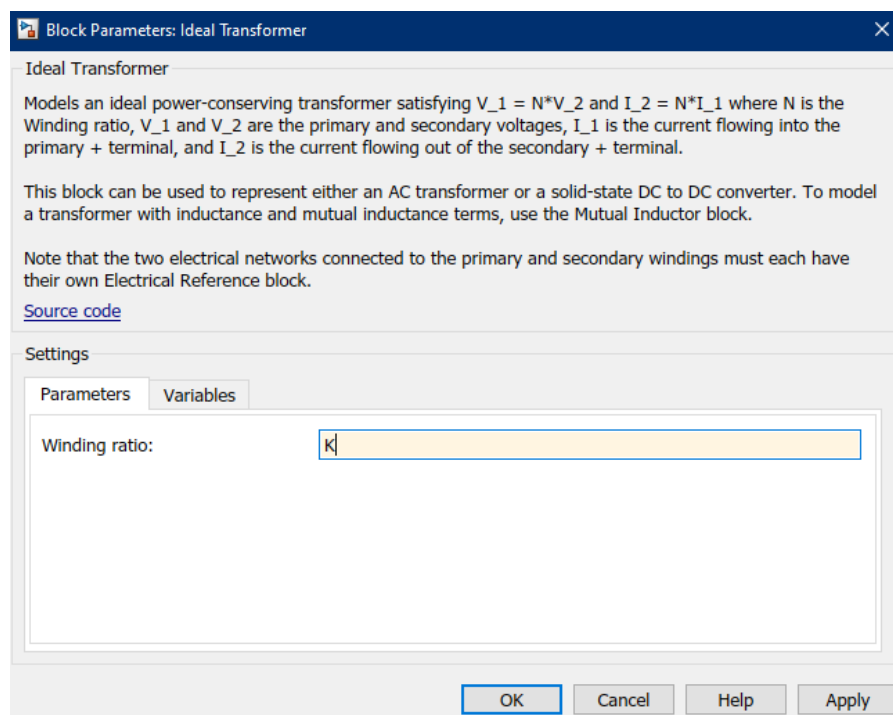


Рисунок 57 – Параметры блока «Ideal Transformer»

- Блоки «R1», «R2», «Rm», «Rz» представляют собой активное сопротивление.

- Блоки «L1», «L2», «Lz» представляют собой индуктивность.

3.5 Графическая оболочка программного обеспечения

Графическая оболочка разработана в MATLAB App Designer.

MATLAB App Designer — это инструмент для создания пользовательских интерфейсов (GUI) для приложений, которые могут быть запущены из MATLAB. App Designer позволяет создавать интерфейсы с помощью графического интерфейса пользователя (GUI), который позволяет создавать элементы управления, такие как кнопки, метки, поля ввода, таблицы и многое другое. Преимущество App Designer состоит в том, что он позволяет создавать интерфейсы без необходимости написания кода. Если требуется, можно добавлять пользовательский код на MATLAB в App Designer.

App Designer предлагает многочисленные инструменты и функции для создания красивых и функциональных пользовательских интерфейсов, таких как:

- Наборы элементов управления, которые могут быть легко настроены и изменены.
- Встроенные функции для обработки событий, таких как нажатие кнопки или изменение значения в поле ввода.
- Редактор макета, который позволяет быстро и легко настраивать расположение элементов управления.
- Встроенные функции для экспорта и импорта данных.
- Возможность создавать приложения, которые могут быть запущены независимо от MATLAB.

App Designer может быть использован для создания различных типов приложений, таких как приложения для обработки данных, визуализации данных, приложения для управления устройствами и многое другое.

App Designer может быть интегрирован со многими другими инструментами MATLAB, такими как Simulink, MATLAB Compiler и другие. Это позволяет создавать мощные и сложные приложения, которые могут быть запущены в MATLAB или экспортированы в отдельный выполняемый файл для использования вне среды MATLAB.

Главное окно графического приложения изображено на рисунке 13.

В главном окне клавиша «Setting C37» вызывает окно с настройками протокола C37.118 (рисунок 60).

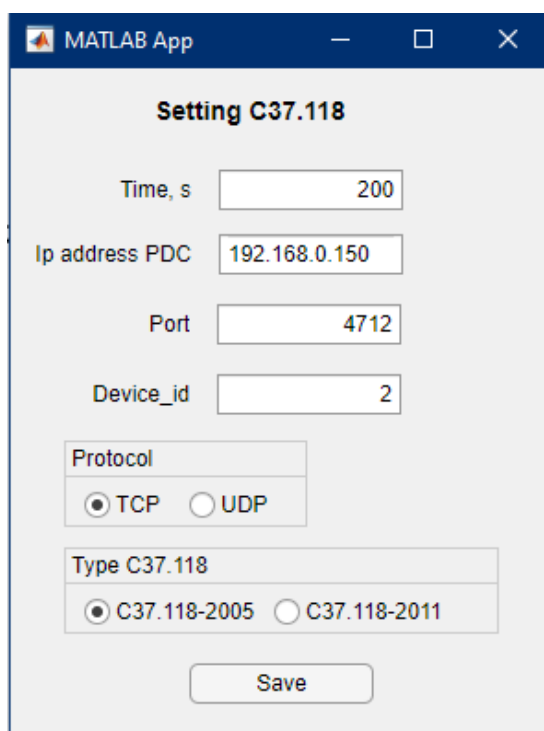


Рисунок 61 – Окно ««Setting C37»»

В нем пользователь может задать следующие параметры:

- «Time, s», время в секундах за которое собираются данные (синхронизированные векторные измерения) с системы мониторинга переходных режимов;
- «IP address PDC», IP адрес концентратора данных векторных измерений (PDC) ES-PDC;
- «Port», порт, идентификатор программы или процесса, которые обслуживают сетевые соединения на заданном сетевом адресе концентратора данных векторных измерений (PDC) ES-PDC;
- «Device_id», адрес, согласно протоколу C37.118, концентратора данных векторных измерений (PDC) ES-PDC;
- «Protocol», протокол транспортного уровня модели OSI;
- «Type C37.118», тип протокола C37.118.

Клавиша «Setting transf dowlound» позволяет загружать параметры схемы замещения трансформатора со стороннего файла.

Клавиша «Setting transformer» вызывает окно с параметрами схемы замещения трансформатора (рисунок 62).

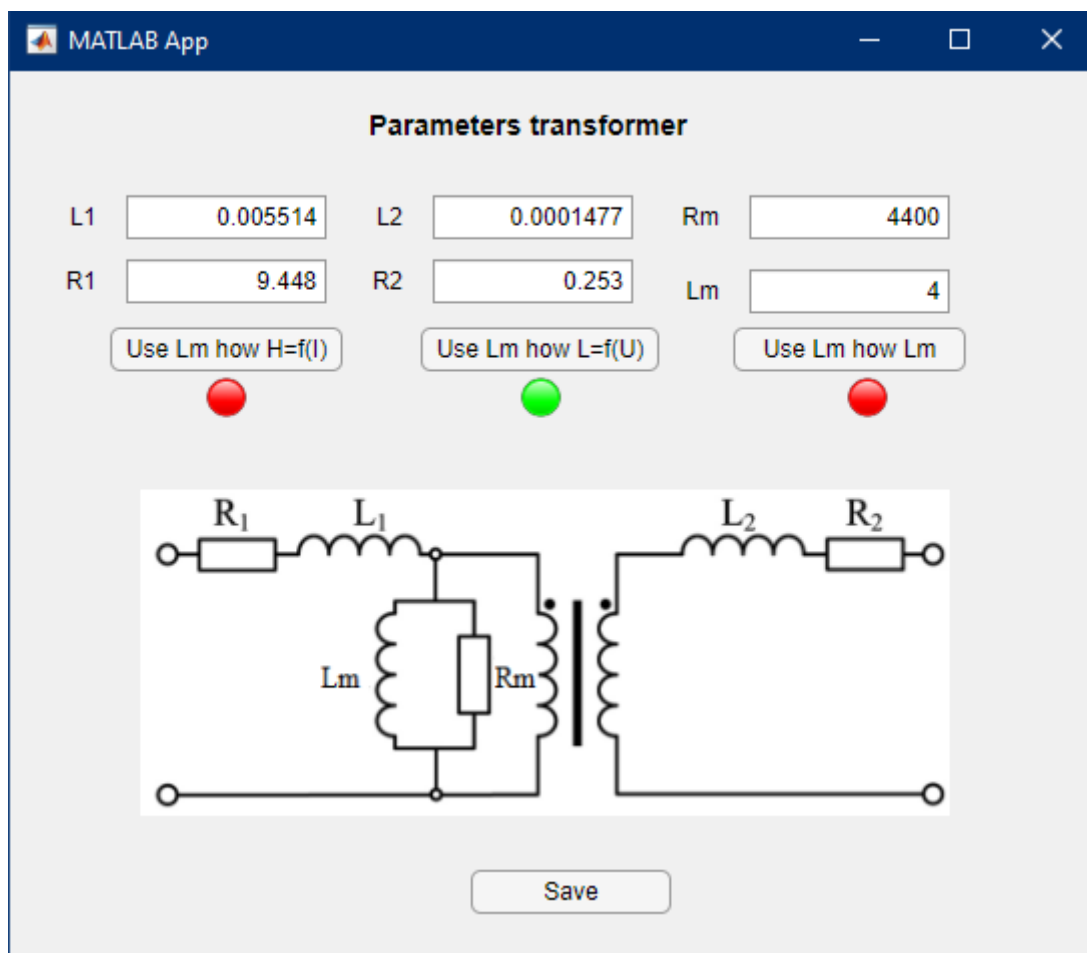


Рисунок 62 – Окно «Setting transformer»

В нем пользователь может задать следующие параметры:

- «L1», индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора в Гн;
- «L2», индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора в Гн;
- «R1», активное сопротивление первичной обмотки трансформатора в Ом;

- « R_2 », активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора в Ом;
- « R_m », активное сопротивление цепи намагничивания в Ом;
- « L_m », индуктивное сопротивление цепи намагничивания в Гн;
- Клавиша «Use L_m how $H=f(I)$ », вызывает окно для загрузки данных зависимости электрического тока от магнитного потока в сердечнике трансформатора и позволяет использовать эти данные для моделирования;
- Клавиша «Use L_m how $L=f(U)$ », вызывает окно для загрузки данных зависимости индуктивности от ЭДС в сердечнике трансформатора и позволяет использовать эти данные для моделирования;
- Клавиша «Use L_m how L_m » позволяет использовать индуктивное сопротивление цепи намагничивания « L_m » для моделирования;
- Клавиша «Save» сохраняет заданные параметры настройки схемы замещения трансформатора в конфигурационном файле.

Клавиша «Parameters load» в главном окне вызывает окно с параметрами нагрузки на вторичной обмотке трансформатора (рисунок 18).

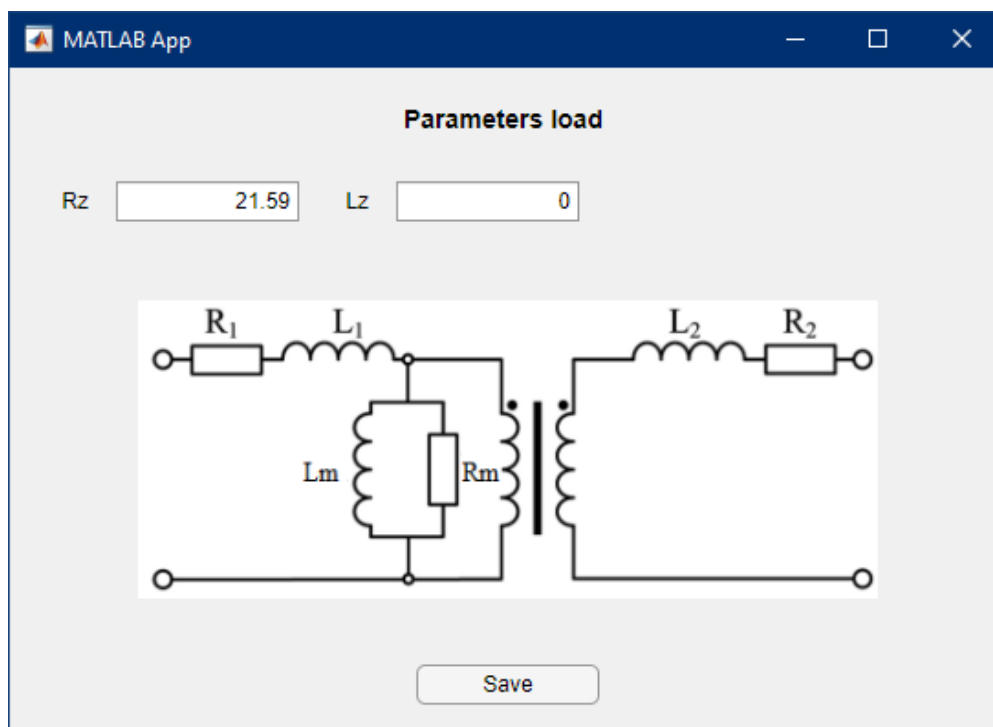


Рисунок 63 – Окно «Parameters load»

В нем пользователь может задать следующие параметры:

- «Rz», активное сопротивление нагрузки в Ом;
- «Lz», индуктивное сопротивление нагрузки в Гн.

Клавиша «WAMS run» в главном окне запускает процесс сбора данных с системы мониторинга переходных режимов.

Клавиша «WAMS DATA download» в главном окне позволяет загрузить в системы сохранённые данные, ранее собранные с системы мониторинга переходных режимов.

Клавиша «WAMS DATA save» в главном окне позволяет сохранить полученные данные от системы мониторинга переходных режимов в отдельный файл.

Клавиша «WAMS plots» в главном окне открывает окно, в котором можно открыть графическое представление полученных данных от системы мониторинга переходных режимов (рисунок 64).

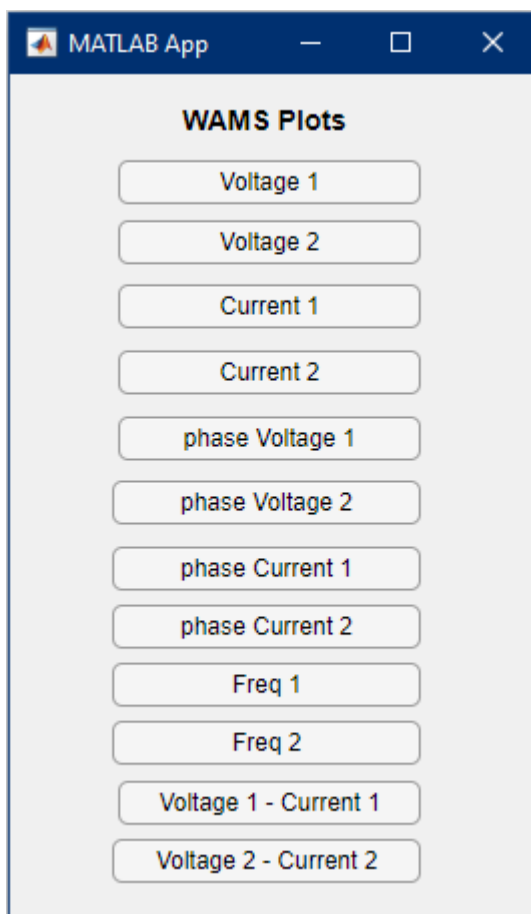


Рисунок 64 – Окно «WAMS plots»

В данном окне расположены следующие клавиши:

- «Voltage 1», открывает график изменения напряжения в вольтах на первичной обмотке трансформатора с течением времени в секундах;
- «Voltage 2», открывает график изменения напряжения в вольтах на вторичной обмотке трансформатора с течением времени в секундах;
- «Current 1», открывает график изменения силы тока в амперах в первичной обмотке трансформатора с течением времени в секундах;
- «Current 2», открывает график изменения силы тока в амперах в вторичной обмотке трансформатора с течением времени в секундах;
- «phase Voltage 1», открывает график изменения фазного угла напряжения на первичной обмотке с течением времени в секундах;
- «phase Voltage 2», открывает график изменения фазного угла напряжения на вторичной обмотке с течением времени в секундах;
- «phase Current 1», открывает график изменения фазного угла тока в первичной обмотке с течением времени в секундах;
- «phase Current 2», открывает график изменения фазного угла тока в вторичной обмотке с течением времени в секундах;
- «Freq 1», открывает график изменения частоты сети в первичной обмотке с течением времени в секундах;
- «Freq 2», открывает график изменения частоты сети в вторичной обмотке с течением времени в секундах;
- «Voltage 1 – Current 1», открывает график вольтамперной характеристики на первичной обмотке трансформатора;
- «Voltage 2 – Current 2», открывает график вольтамперной характеристики на вторичной обмотке трансформатора.

Клавиша «Simulator run» в главном окне открывает имитационную модель двухобмоточного трансформатора в имитационной среде Matlab/Simulink с параметрами, ранее заданными графическом приложении.

3.6 Вывод по третьей главе

Данная глава была посвящена разработке программного обеспечения для создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов на основе системы мониторинга переходных режимов. Был проведен анализ проблем при эксплуатации силовых трансформаторов, проанализирована статистика причин отказов силовых трансформаторов, по которой наиболее распространённым причинами отказов элементов силовых трансформаторов является изменения свойств конструкционных материалов и дефекты конструкции при изготовлении.

Из этого анализа сделан вывод, что необходимо интеллектуальная система мониторинга, основанная на алгоритмах машинного обучения и обученная при различных аварийных режимах работы трансформатора, которая выявила бы неисправность на раннем этапе. Уже на основании этого было решено, какие задачи должен выполнять цифровой двойник трансформатора. Это прежде всего верификация параметров схемы замещения трансформатора, т.е. проверка (с достаточно большой точностью) достоверности результатов расчёта параметров схемы замещения путем прямого сравнения реального объекта и цифровой модели при этом обеспечивая двухстороннюю информационную связь (цифровая модель трансформатора на вход получает такой же точно воспроизводящий синусоидальный сигнал, с такими же мгновенными значениями напряжения, частоты сети, фазового угла).

Программное обеспечение для создание цифровых двойников было решено разрабатывать под оборудование системы мониторинга переходных режимов. Так данная технология набирает популярность и все чаще стала использоваться для мониторинга энергосистемы, а также позволяет «бесшовное» внедрение в производство цифрового двойника трансформатора.

В итоге было разработано программное обеспечение для создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов, которая работает с системой мониторинга переходных режимов и включает в себя цифровую модель, графическую оболочку и другие дополнительные функции.

4 СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

При помощи разработанного программного обеспечения был создан цифровой двойник однофазного двухобмоточного трансформатора с номинальным напряжением на первичной обмотке – 220 В, напряжением на вторичной обмотке – 36 В и полной мощностью 250 ВА. Фотография цифрового двойника двухобмоточного трансформатора представлена на рисунке 65.

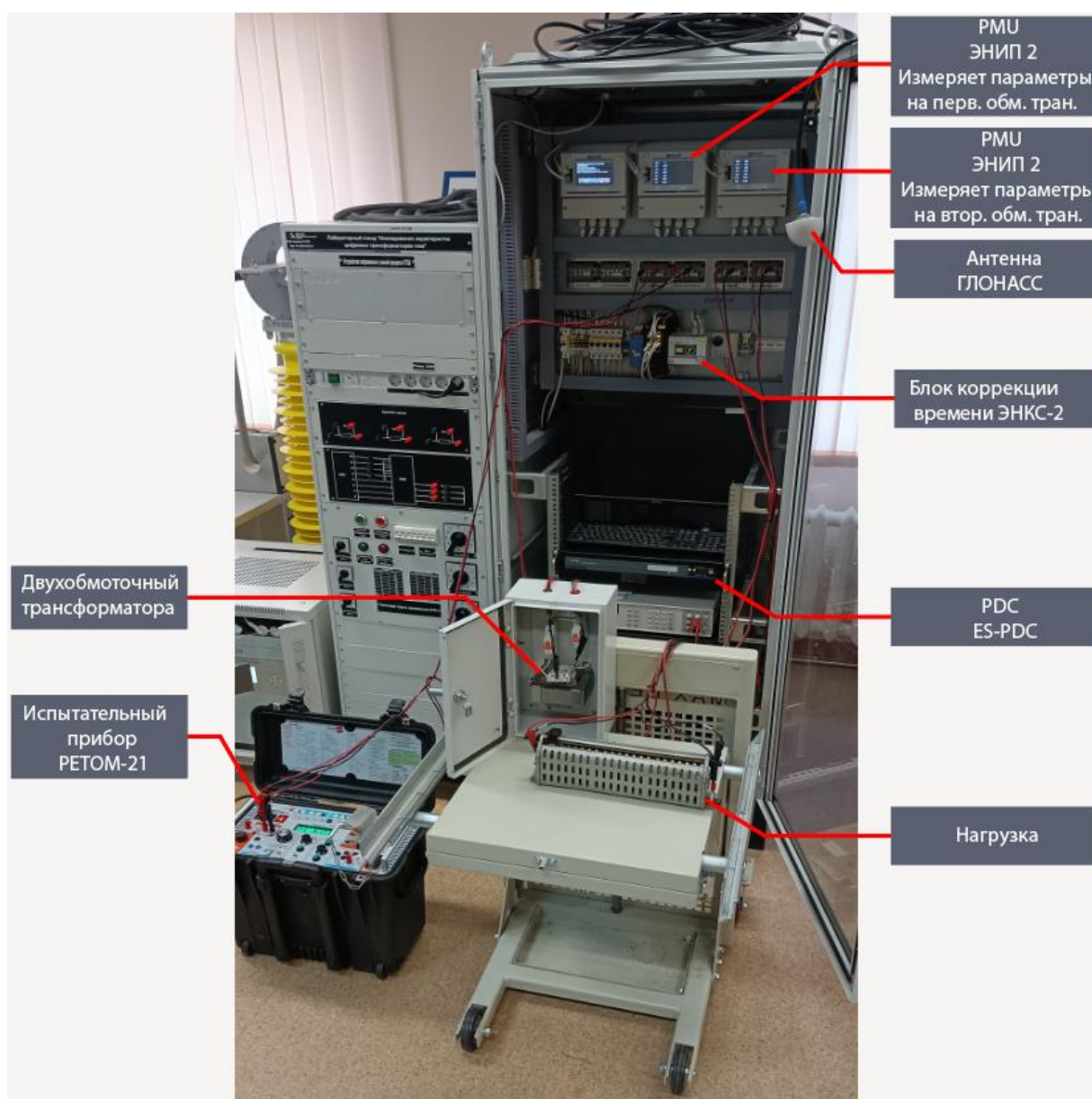


Рисунок 65 – Фотография цифрового двойника

4.1 Структурная схема цифрового двойника двухобмоточного трансформатора

Структурная схема созданного цифрового двойника представлена на рисунке 66 и состоит из:

- «АРМ МАТЛАБ», автоматизированное рабочее место (далее – АРМ) с установленным ПО МАТЛАБ, через данный АРМ производится управление цифровым двойником через графическое приложение и осуществляется сбор данных от системы мониторинга переходных режимов;

- системы мониторинга переходных режимов, к измерительным приборам которой подключается первичная и вторичная обмотка двухобмоточного трансформатора.

Система мониторинга переходных режимов состоит из оборудования производства инженерного центра «Энергосервис»:

- два устройства синхронизированных векторных измерений (PMU) ЭНИП 2 (рисунок 67);

- концентратор данных векторных измерений (PDC) ES-PDC (рисунок 19), собирает данные с PMU и передает на АРМ, прием данных с PMU, как и передача на АРМ осуществляется по протоколу С37.118;

- блок коррекции времени ЭНКС-2 (рисунок 68), ЭНКС-2 получает сигналы от навигационных спутниковых систем с помощью антенны ГЛОНАСС/GPS, синхронизация по времени приборов PMU осуществляется по протоколу IRIG-B (интерфейс передача данных RS-485), синхронизация по времени PDC и АРМ осуществляется по протоколу SNTP (интерфейс передача данных Ethernet).



- Рисунок 68 – Блок коррекции времени ЭНКС-2



Рисунок 67 – Концентратор данных векторных измерений (PDC) ES-PDC

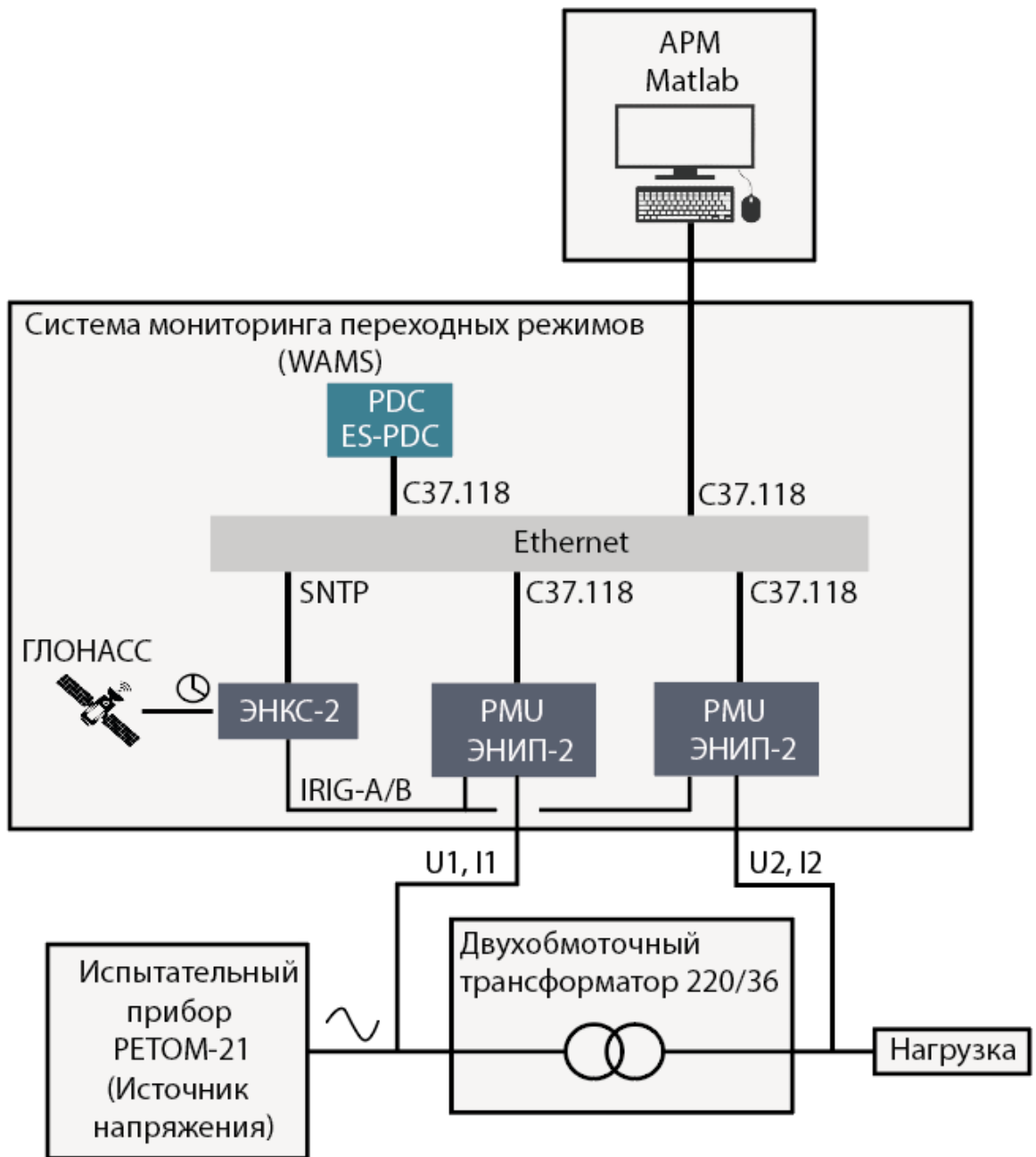


Рисунок 66 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса

4.2 Настройка цифрового двойника

Перед использованием аппаратно-программного комплекса цифрового двойника необходимо осуществить предварительную настройку. Основные этапы настройки цифрового двойника проиллюстрированы на рисунке 69.



Рисунок 70 – Основные этапы настройки цифрового двойника

4.3 Конфигурация оборудования системы мониторинга переходных режимов

Конфигурация оборудования системы мониторинга переходных режимов и настройка протокола С37.118 компании «Энергосервис» производилась в специализированном ПО компании «Энергосервис» «ES Конфигуратор» (рисунки 71, 72, 73).

PMU конфигурировались таким образом, чтобы значения параметров электрической сети передавались на PDC. В свою очередь PDC конфигурировался для передачи данных на АРМ.

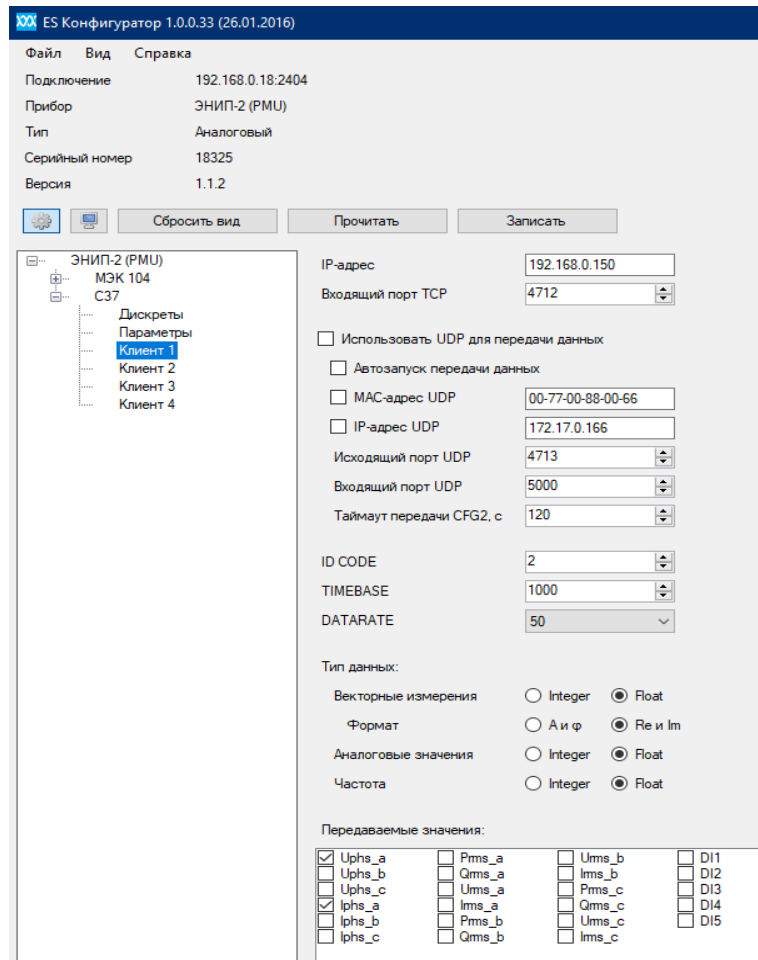


Рисунок 71 – Конфигурация РМУ ЭНИП-2, предназначенный для измерения параметров эл. сети на первичной обмотке

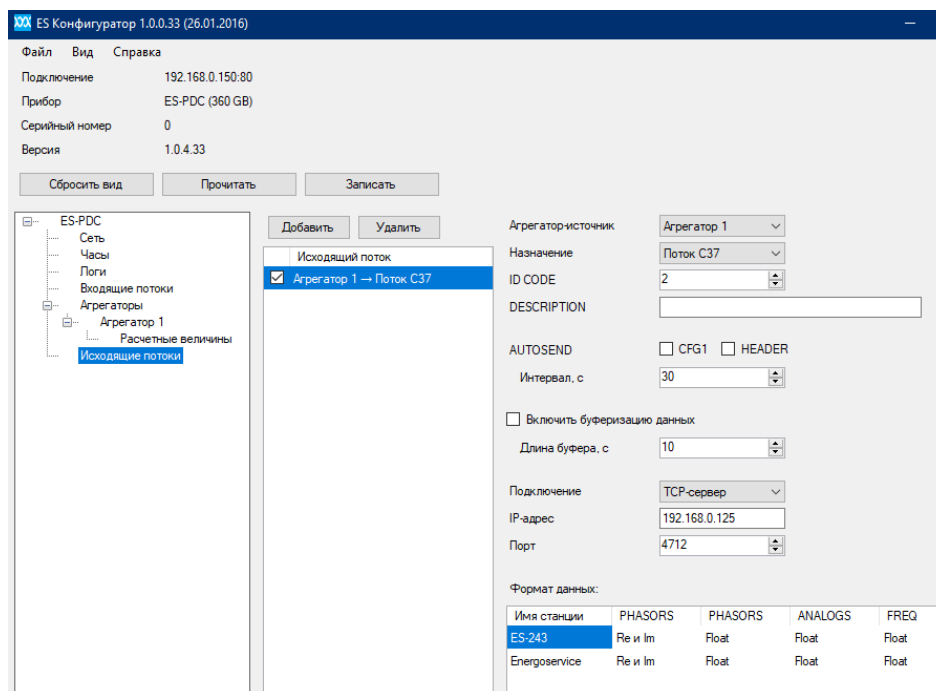


Рисунок 73 – Конфигурация PDC ES-PDC

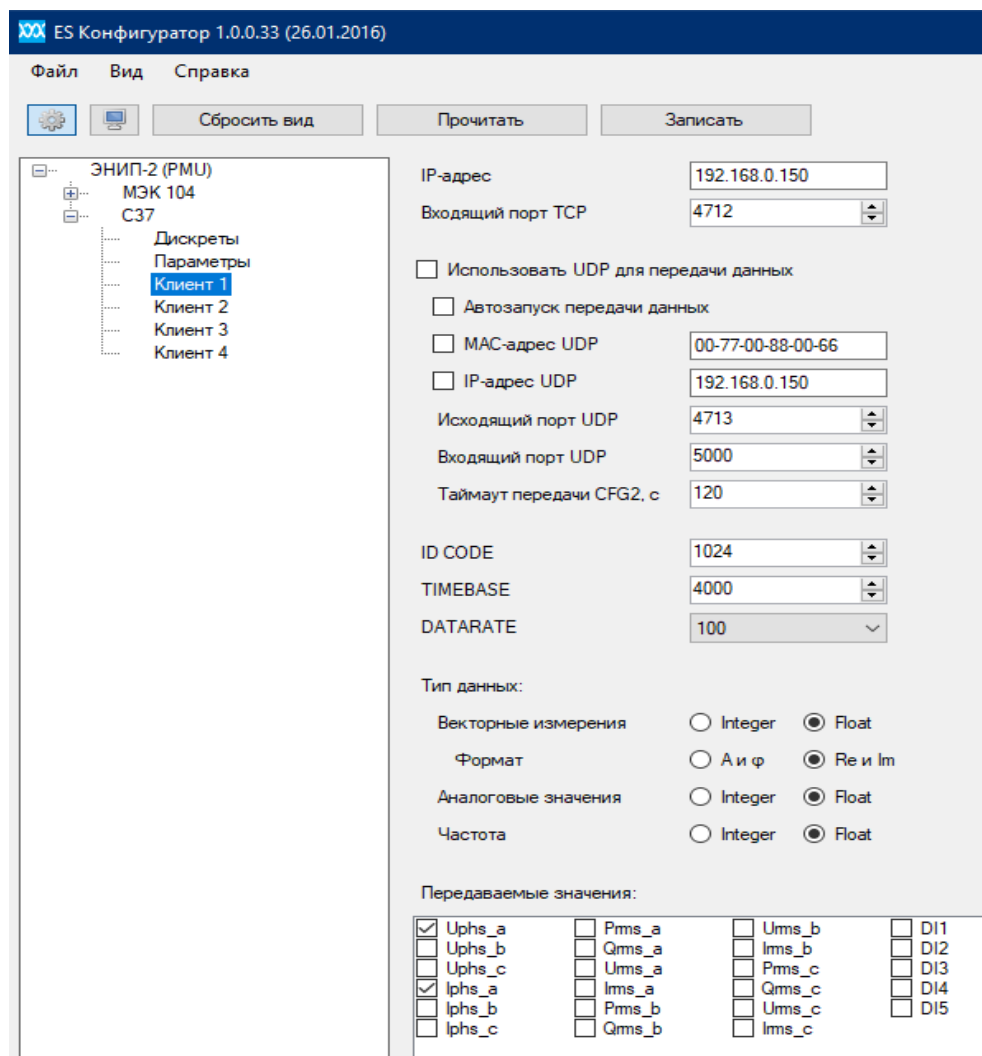


Рисунок 72– Конфигурация PMU ЭНИП-2, предназначенный для измерения параметров эл. сети на вторичной обмотке

4.4 Расчет параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора

Для разработки имитационной модели в MATLAB/Simulink, необходимо расчет параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора. Электромагнитная Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора является наиболее распространенной схемой замещения и используется в большинстве случаев. В этой схеме одна обмотка трансформатора (обычно это первичная обмотка) соединена непосредственно с источником питания, а другая обмотка (вторичная) используется для подключения нагрузки. Таким образом, обмотки трансформатора соединены в форме буквы «Т» (рисунок 74).

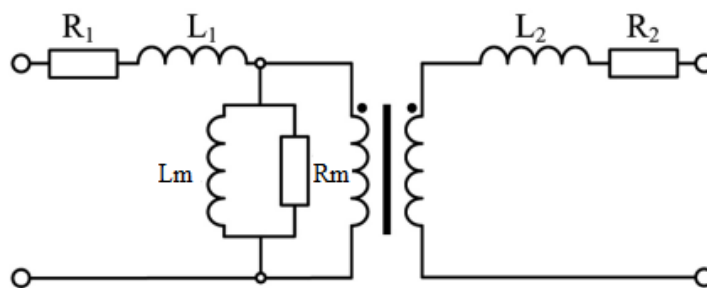


Рисунок 74— Электромагнитная Т-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора

Электромагнитная Т-образная схема замещения трансформатора, включает следующие элементы: R_1 и R_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора; L_1 и L_2 — индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора; R_m — активное сопротивление цепи намагничивания; L_m — индуктивное сопротивление цепи намагничивания.

Сопротивления $R_{1(2)}$ и $L_{1(2)}$ соответственно учитывают потери активной мощности в каждой из обмоток и воздействия полей рассеивания, обусловленных протеканием токов нагрузки.

Сопротивление R_m определяет величину потерь активной мощности в магнитопроводе трансформатора от основного магнитного поля и, соответственно, в массивных металлических элементах трансформатора от полей рассеяния.

Индуктивностью L_m можно учитывать нелинейность характеристики намагничивания материала и насыщение сердечника трансформатора [12].

Определить параметры схемы замещения для любого трансформатора можно по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Параметры исследуемого двухобмоточного трансформатора приведены в таблице 7. Результаты опытов холостого хода и короткого замыкания приведены в таблице 8

Таблица 7 - Параметры исследуемого двухобмоточного трансформатора

Тип	Мощность S_H , кВА	Напряжение обмотки, В		КПД, % не менее	Относительное напряжение короткого замыкания U_s	Габаритные размеры, мм	Вес, кг
		$U_{ВН}$, ВН	$U_{НН}$, НН				
ОСО 0,25- УХЛ3	0,25	220	36	0,89	6%	150x140x110	5,2

Таблица 8 - Результаты опытов холостого хода и короткого замыкания

Наименование параметра	Обозначение параметра	Расчетное значение
Номинальное напряжение на первичной обмотке, В	$U_{ВН}$	220
Ток холостого хода, А	I_o	0,269
Мощность холостого хода, Вт	P_o	11
Номинальный ток на первичной обмотке, А	$I_{НОМ}$	1,136
Напряжение короткого замыкания на первичной обмотке, В	U_s	21,83
Мощность короткого замыкания на первичной обмотке, Вт	P_s	24,4

В начале расчета определяются номинальный ток и коэффициент трансформации по напряжению:

$$I_{НОМ} = \frac{S_H}{U_{ВН}} \quad (3)$$

где S_H — номинальная мощность трансформатора; $U_{ВН}$ — номинальная величина напряжения первичной обмотки трансформатора.

Коэффициент трансформации:

$$K = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} \quad (4)$$

где $U_{НН}$ — номинальная величина напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Определяем активное сопротивление ветви намагничивания (R_m) и индуктивность ветви намагничивания (L_m) трансформатора из опыта холостого хода.

Косинус угла холостого хода:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{U_{H1} \cdot I_o} \quad (5)$$

Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$R_m = \frac{U_{H1}/I_o}{\cos \varphi_o} \quad (6)$$

Индуктивность ветви намагничивания:

Определяем активные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора $R_{1(2)}$, индуктивные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора $L_{1(2)}$ из опыта короткого замыкания.

Косинус угла при коротком замыкании:

$$\cos \phi_s = \frac{P_s}{U_s \cdot I_s} \quad (7)$$

Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора:

$$R_1 = \frac{U_s}{I_H \cdot \cos \varphi_s \cdot 0,5} \quad (8)$$

Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора:

$$R_2 = \frac{R_1}{K^2} \quad (9)$$

Реактивные сопротивления первичной обмотки трансформатора:

$$L_1 = \frac{U_s}{I_H} \cdot \frac{\sin \varphi_s \cdot 0,5}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (10)$$

Реактивные сопротивления вторичной обмотки трансформатора:

$$L_2 = \frac{L_1}{K^2} \quad (11)$$

Расчет проводился в MATLAB, листинг скрипта приведен в приложение Б.

Результаты расчета приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Расчетные значения параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора

Наименование параметра	Обозначение параметра	Расчетное значение
Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, Ом	R_1	9,4477
Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, Ом	R_2	0,2530
Индуктивность первичной обмотки трансформатора, Гн	L_1	0,0055
Индуктивность вторичной обмотки трансформатора, Гн	L_2	0,00014766
Активное сопротивление ветви намагничивания, Ом	R_m	4400
Индуктивность ветви Намагничивания, Гн	L_m	2,6495

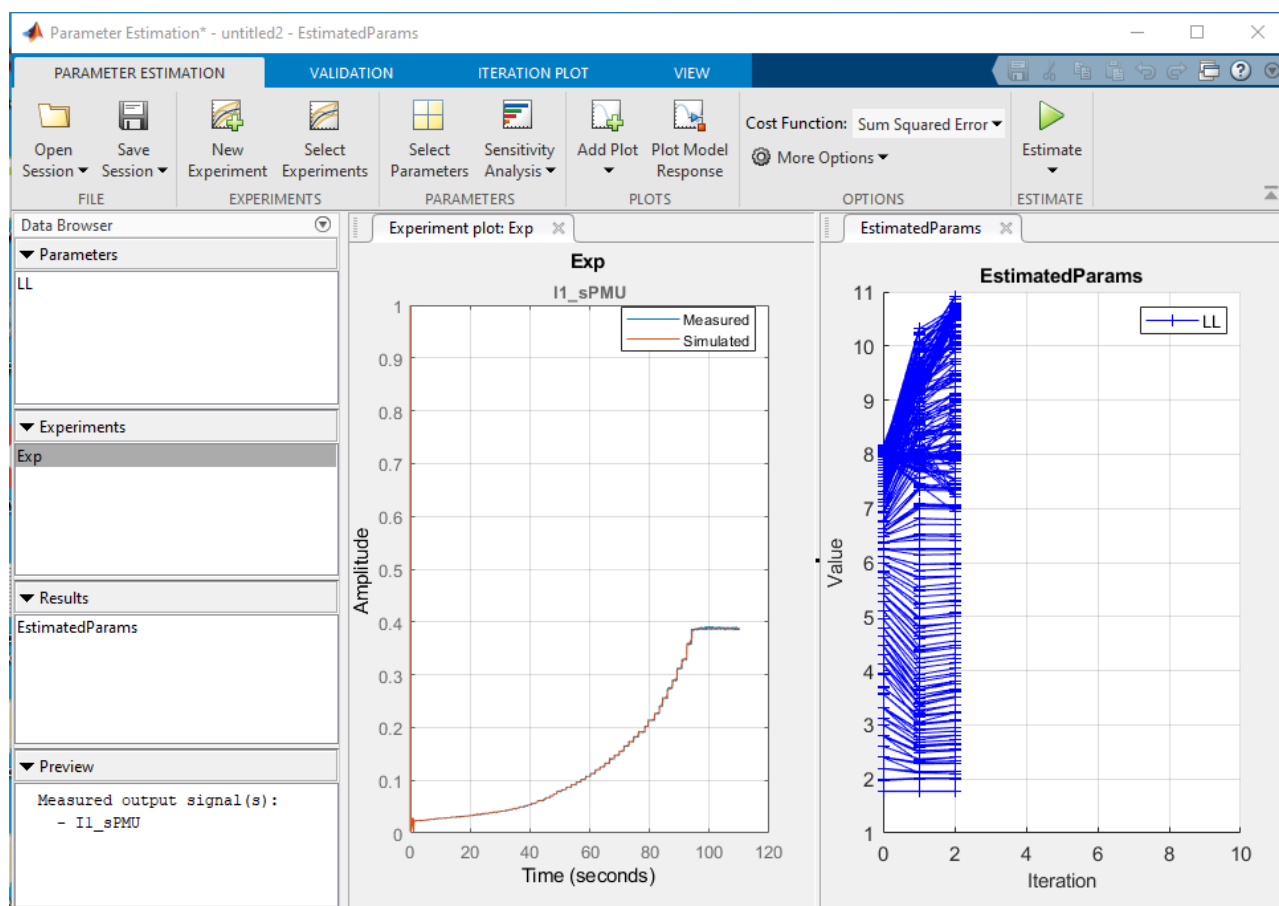


Рисунок 75 – Инструмент «Parameter estimation», который применялся определения зависимости индуктивности ветви намагничивания от напряжения в первичной обмотке

4.5 Настройка программного обеспечения цифрового двойника

Сетевые настройки соответствуют рисунку 61. Параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора ранее рассчитанные в главе 4.4 соответствуют рисунку 62.

4.6 Демонстрация работы цифрового двойника

В этой главе далее будет продемонстрирована работа цифрового двойника и проведены следующие три эксперимента:

1) Эксперимент с активной нагрузкой. К вторичной обмотке двухобмоточного трансформатора будет подключена нагрузка, на первичную обмотку трансформатора будет подано напряжение с помощью испытательного прибора РЕТОМ-21 в диапазоне от 30 В до 240 В и обратно с 240 В до 30 В.

2) Эксперимент в режиме холостого хода. Трансформатор будет работать в режиме холостого хода, на первичную обмотку трансформатора будет подано напряжение с помощью испытательного прибора РЕТОМ-21 в диапазоне от 30 В до 240 В и обратно с 240 В до 30 В.

3) Эксперимент в режиме короткого замыкания. Трансформатор будет работать в режиме короткого замыкания, на первичную обмотку трансформатора будет подано напряжение с помощью испытательного прибора РЕТОМ-21 в диапазоне от 8 В до 21 В и обратно с 21 В до 8 В.

4.7 Эксперимент с активной нагрузкой

В качестве нагрузки к вторичной обмотке трансформатора подключен реостат с активным сопротивлением 21.59 Ом и пренебрежительно малым индуктивным сопротивлением, принятым за нуль (рисунок 43). Параметры нагрузки соответствуют рисунку 76.

Нажатием клавишей «WAMS run» в главном окне, происходит сбор данных с системы мониторинга переходных режимов (рисунок 77). На испытательном приборе РЕТОМ-21 напряжение будет изменяться в диапазоне от 30 В до 240 В и обратно.

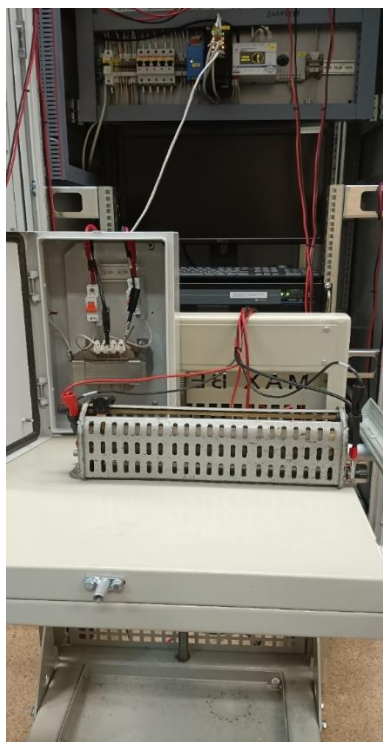


Рисунок 76– Реостат, подключенный к вторичной обмотке трансформатора

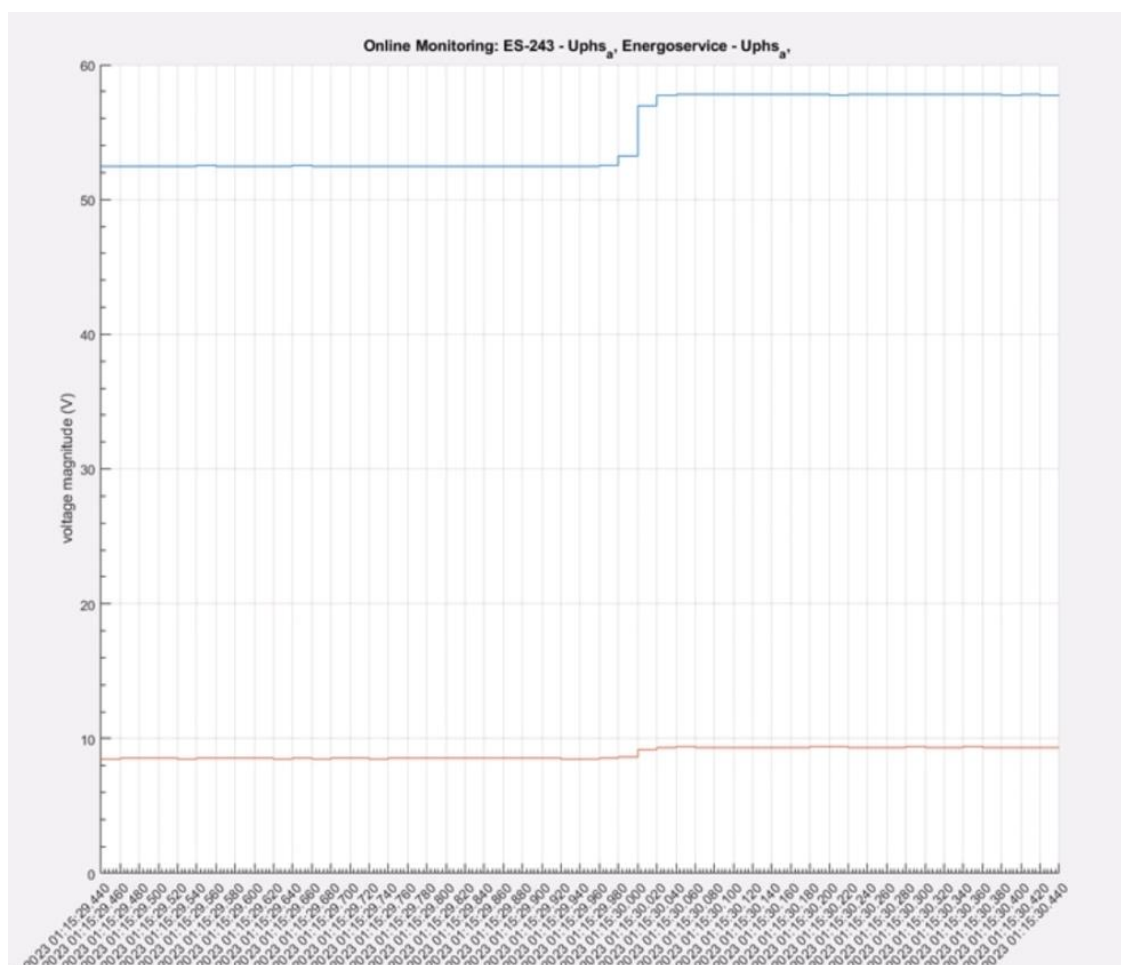


Рисунок 77 – Сбор данных с системы мониторинга переходных режимов

После сбора данных, данные обрабатываются и сохраняются во временной памяти программы.

Через окно вызовов графиков «WAMS plots» (рисунок 64) можно открыть графики полученных данных от системы мониторинга переходных режимов. Графики представлены на рисунках 78- 89.

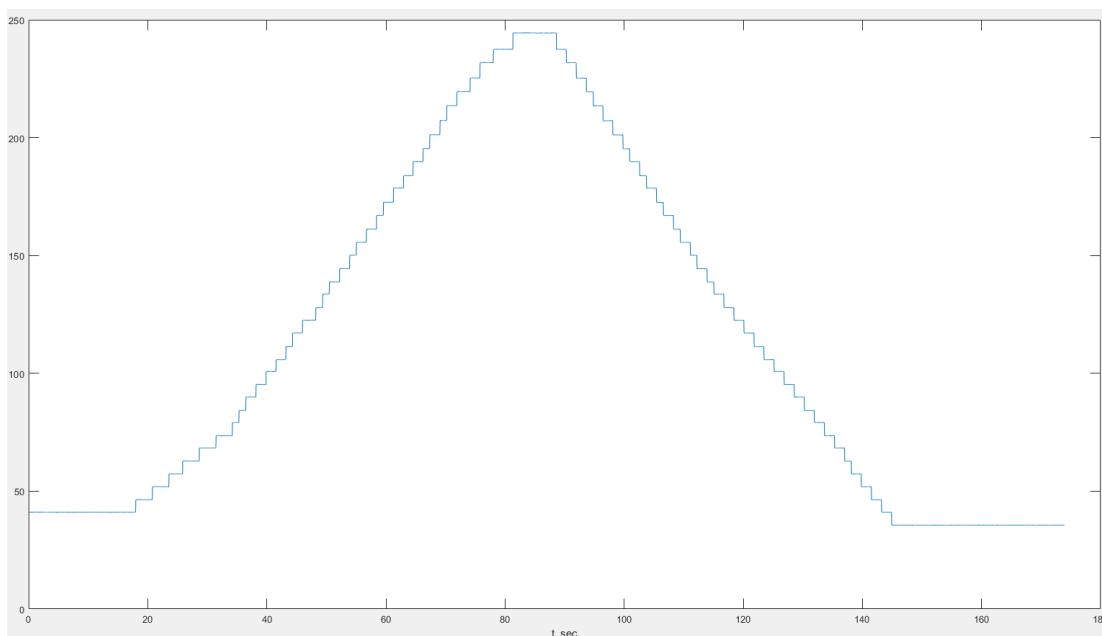


Рисунок 78 – График изменения напряжения на первичной обмотке трансформаторе с течением времени

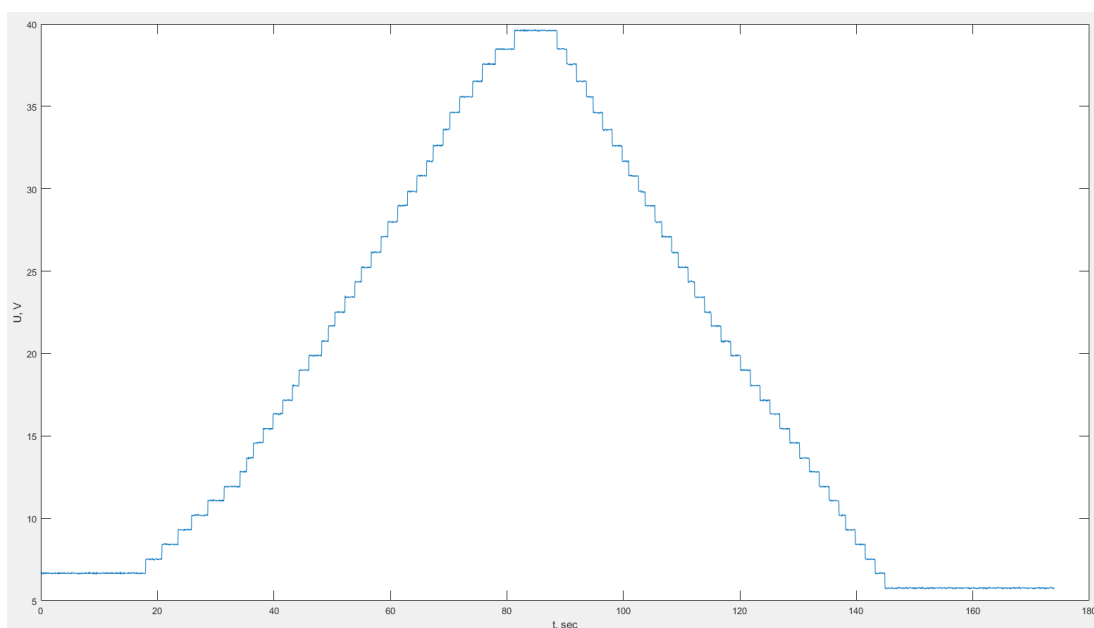


Рисунок 79– График изменения напряжения на вторичной обмотке трансформаторе с течением времени

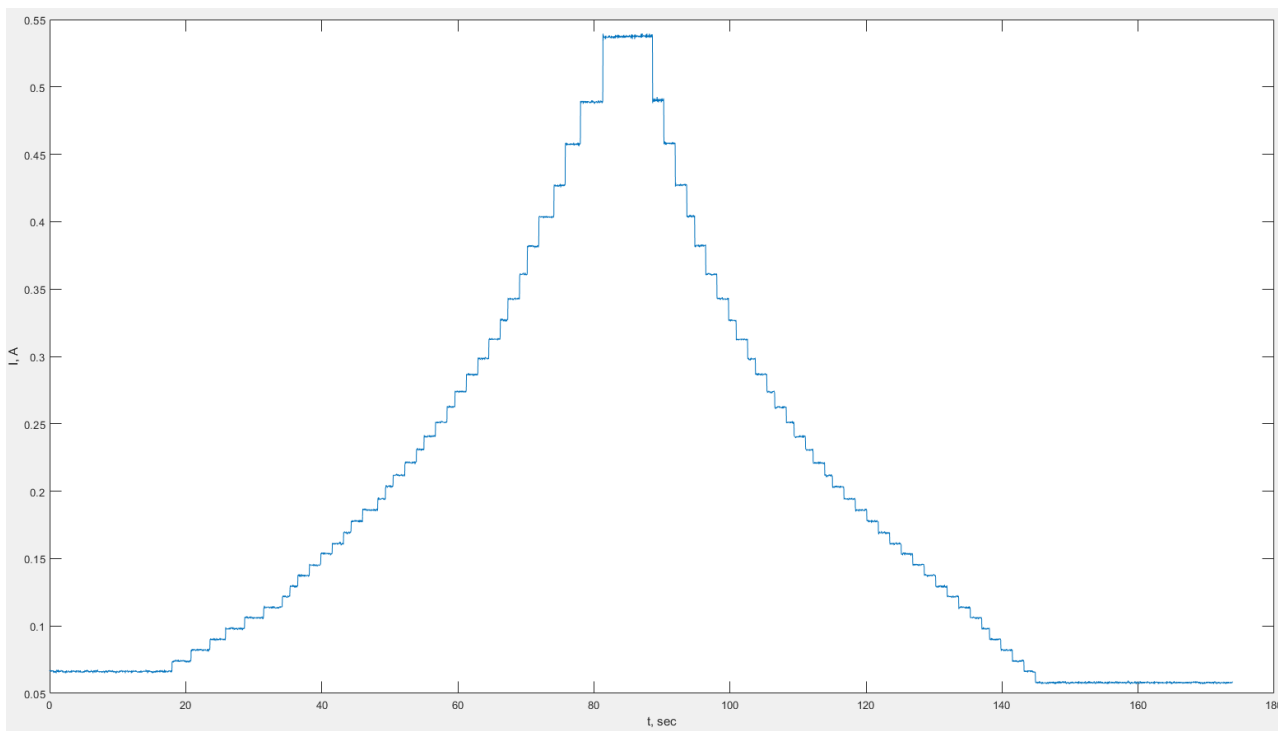


Рисунок 80 – График изменения силы тока в первичной обмотке трансформатора с течением времени

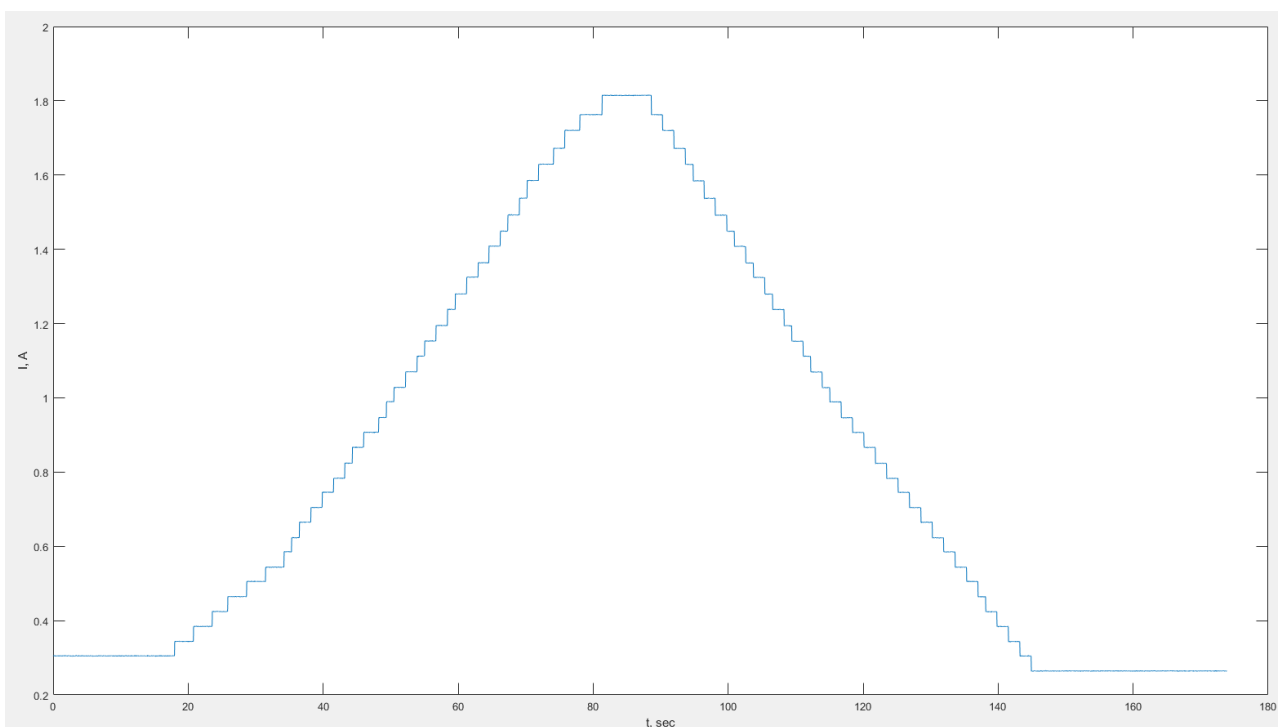


Рисунок 81 – График изменения силы тока в вторичной обмотке трансформатора с течением времени

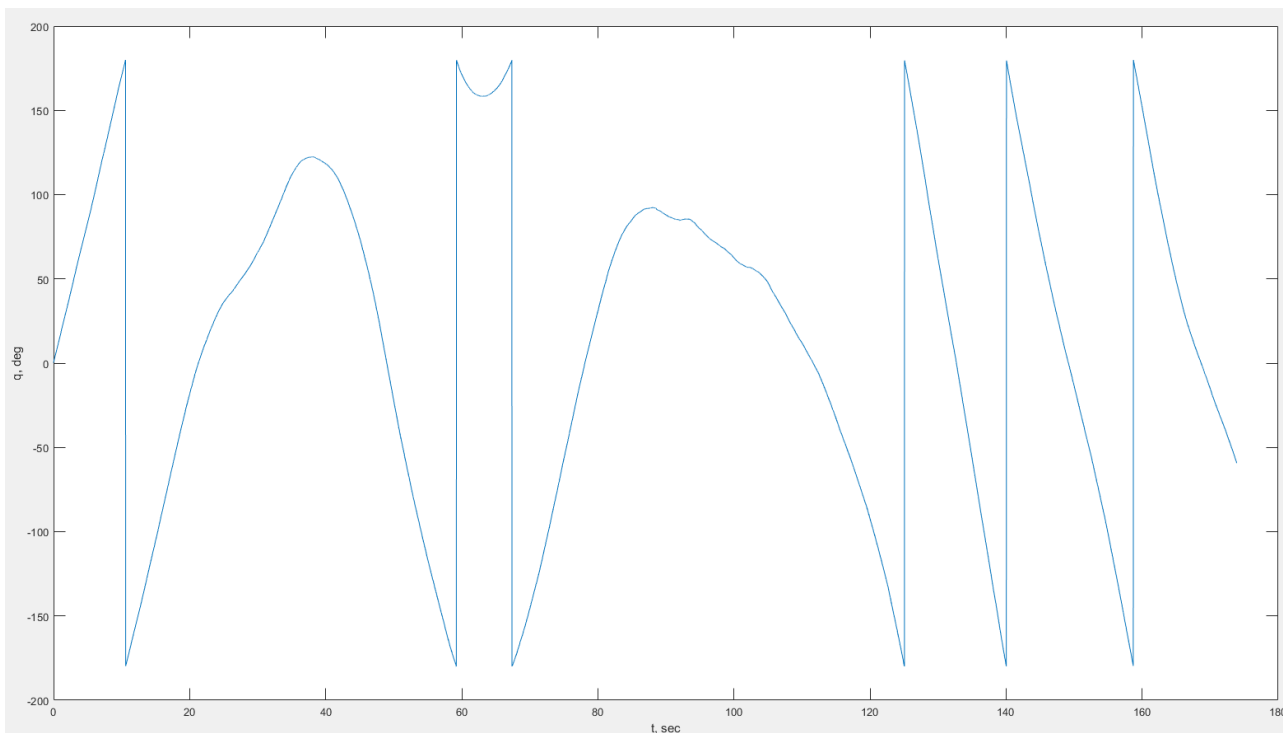


Рисунок 82 – График изменения фазного угла напряжения на первичной обмотке трансформатора с течением времени

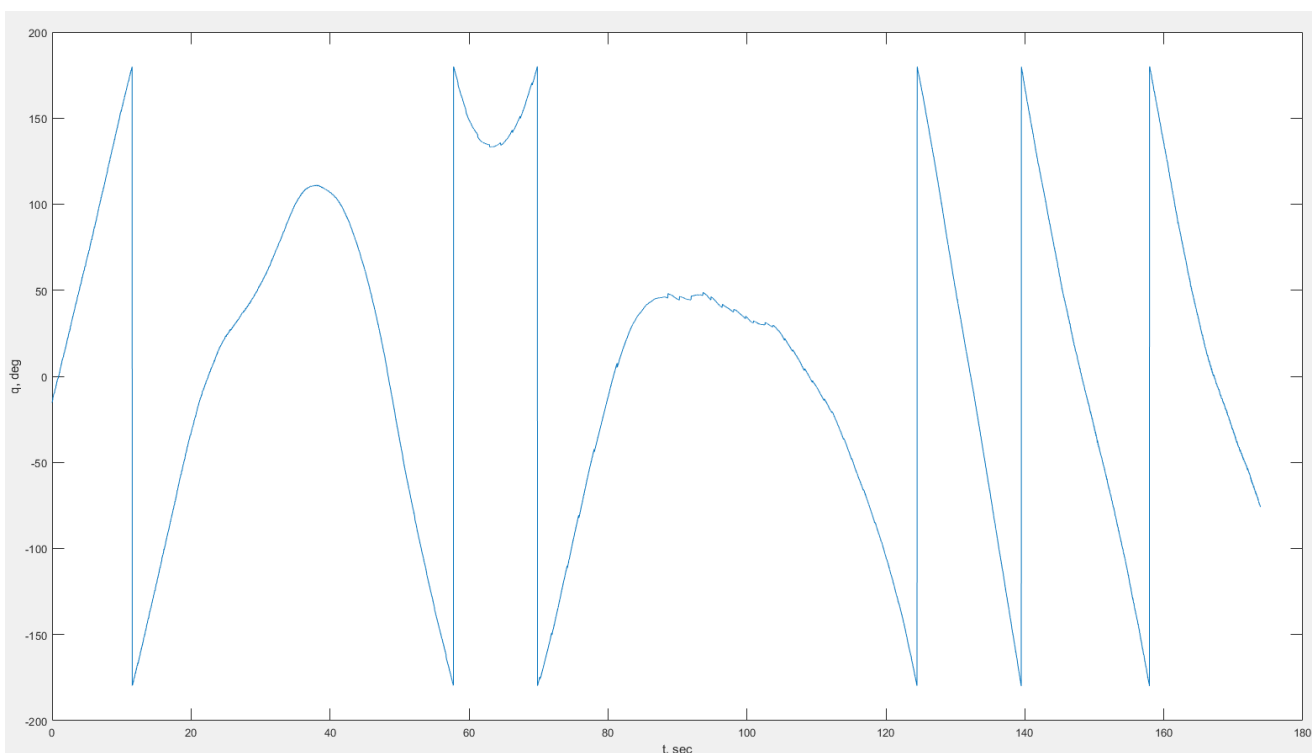


Рисунок 83 – График изменения фазного угла напряжения на вторичной обмотке трансформатора с течением времени

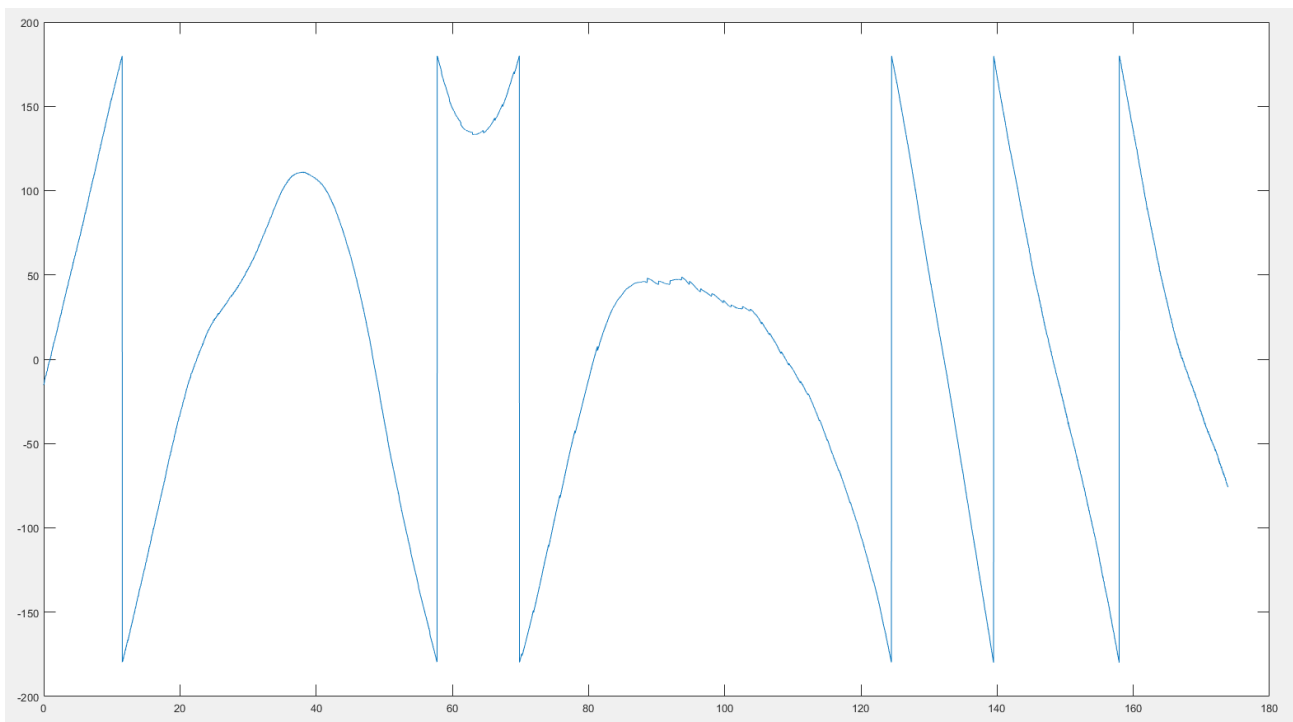


Рисунок 84– График изменения фазного угла тока в первичной обмотке трансформаторе с течением времени

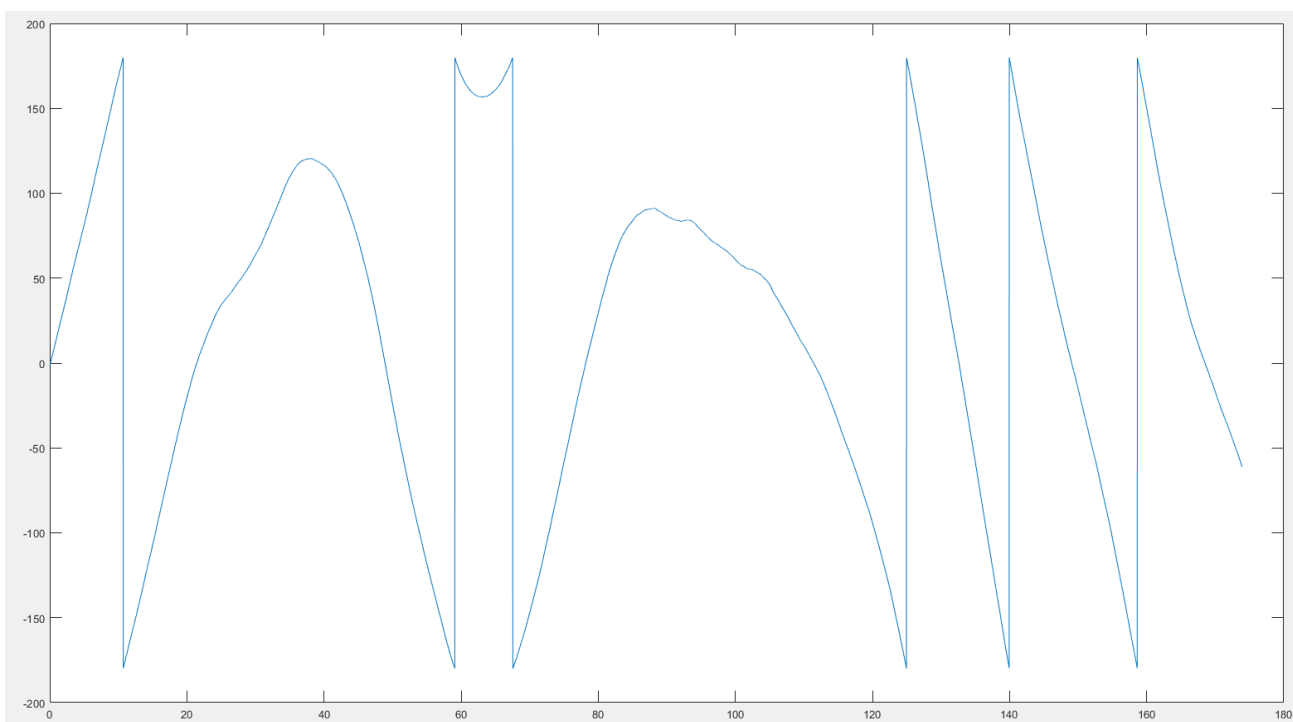


Рисунок 85 – График изменения фазного угла тока в вторичной обмотке трансформаторе с течением времени

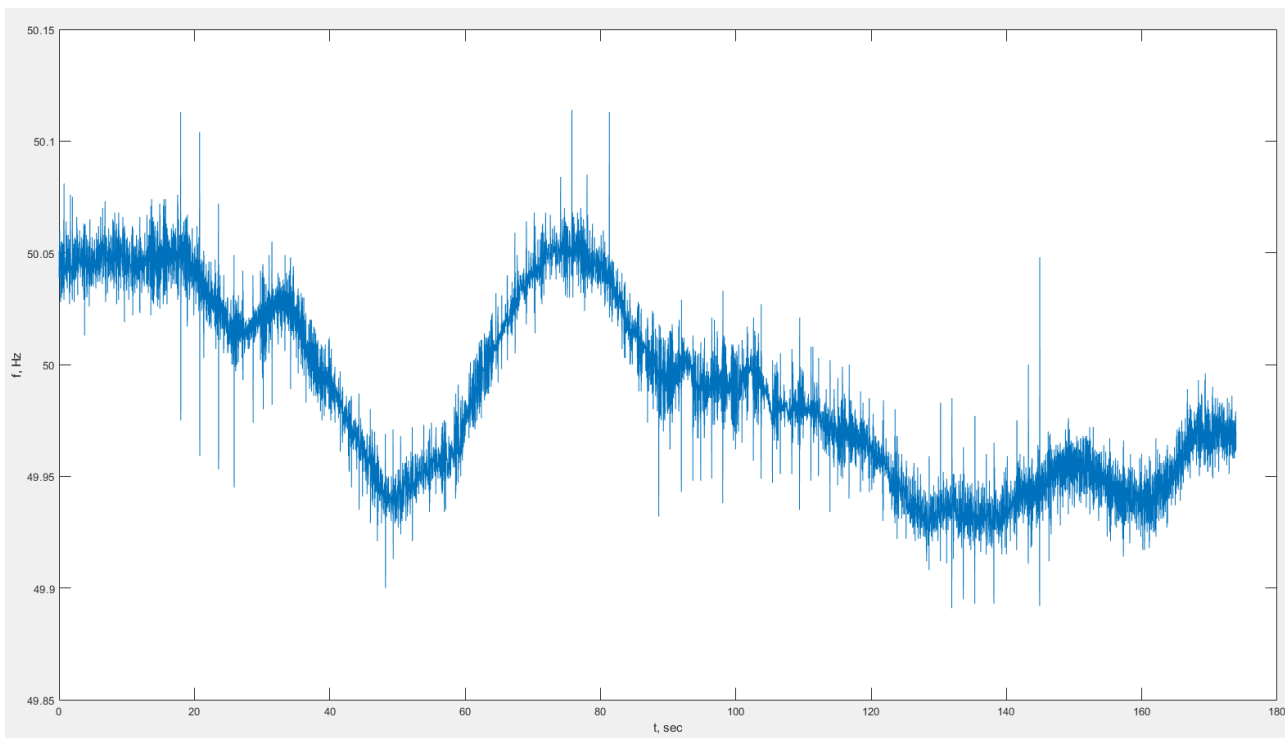


Рисунок 86– График изменения частоты сети в первичной обмотке трансформатора с течением времени

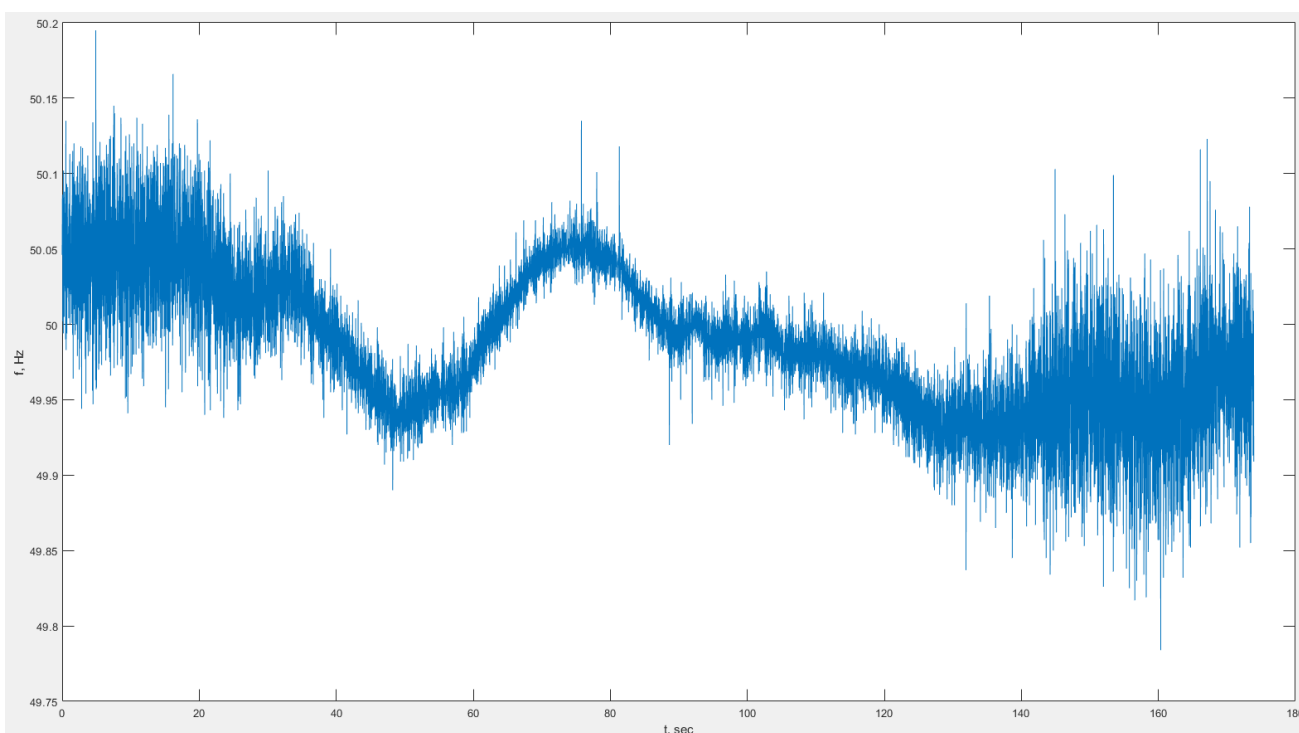


Рисунок 87 – График изменения частоты сети в вторичной обмотке трансформатора с течением времени

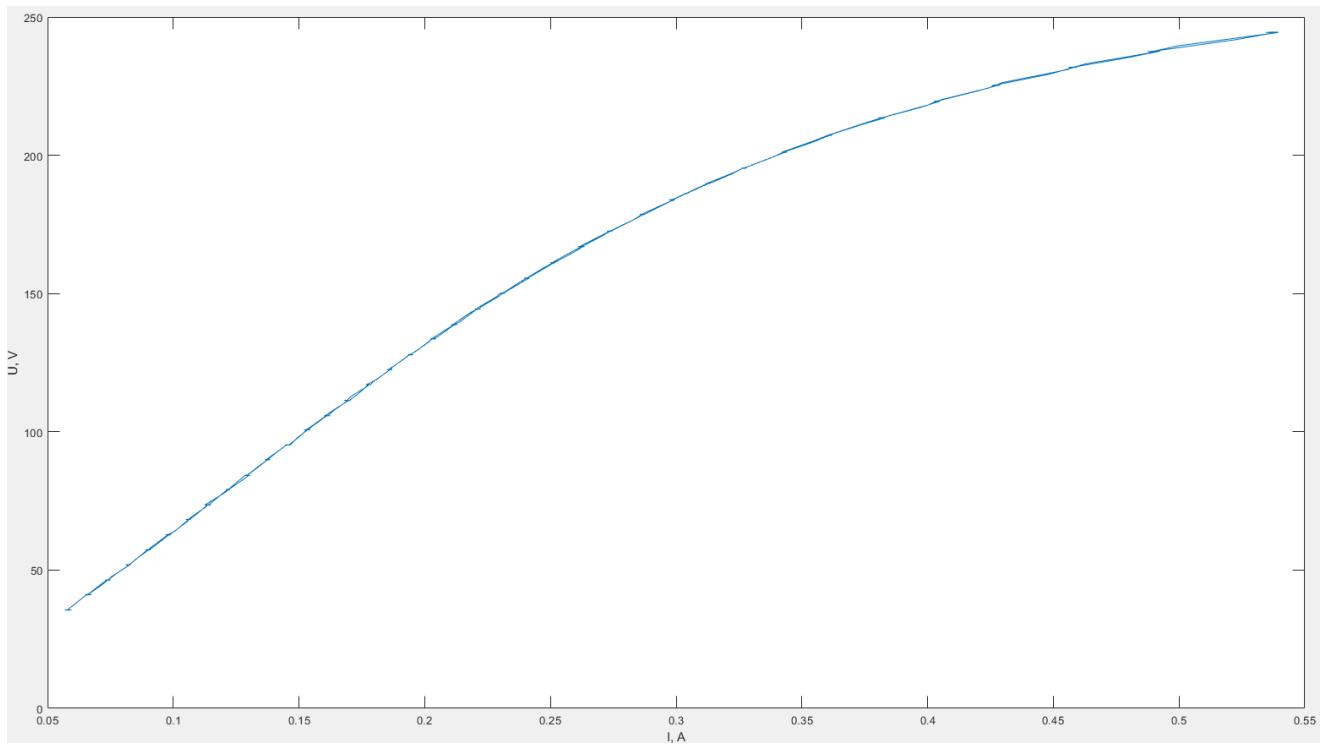


Рисунок 88 – Вольт-амперная характеристика на первичной обмотке трансформатора

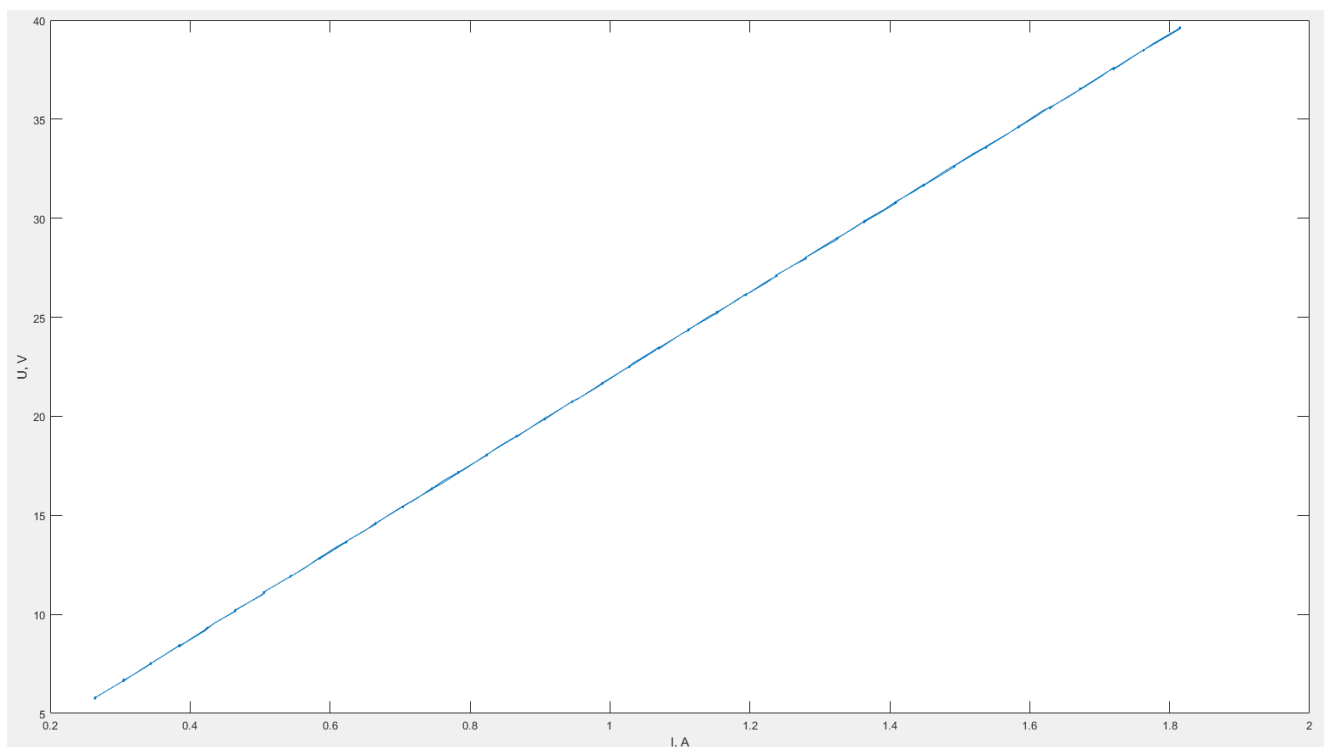


Рисунок 89 – Вольт-амперная характеристика на вторичной обмотке трансформатора

Затем нажатием на клавишу «Simulator run» открывается имитационная модель двухобмоточного трансформатора в Simulink (приложение А) с параметрами схемы замещения и параметрами нагрузки, введёнными в окне параметров схемы замещения трансформатора «Parameters transformer» (рисунок 62) и окне параметров нагрузки «Parameters load» (рисунок 63). Моделирование запускается вручную через клавишу «Пуск» в Simulink. Время моделирования соответствует заданному времени сбора данных с системы мониторинга переходных режимов в окне настроек протокола С37 «Setting 37.118» (рисунок 61).

После завершения моделирование в Simulink в окне «Data inspector» можно посмотреть и сравнить выходные параметры цифрового двойника, а именно:

- Ток в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 90);
- Ток в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 91);
- Напряжение на вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 92);
- Фазовый угол тока в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 93);
- Фазовый угол тока в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 94).

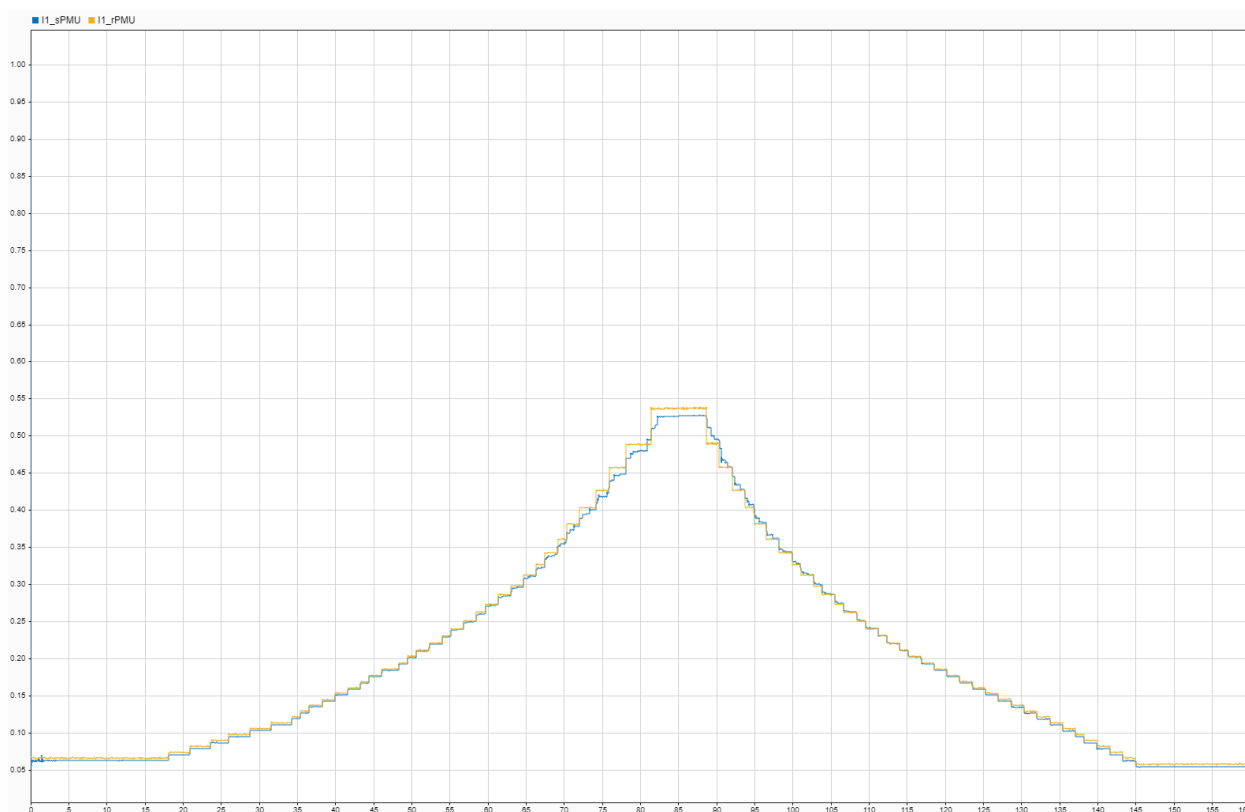


Рисунок 90 – Ток в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (желтая линия) и его имитационной модели (синяя линия)

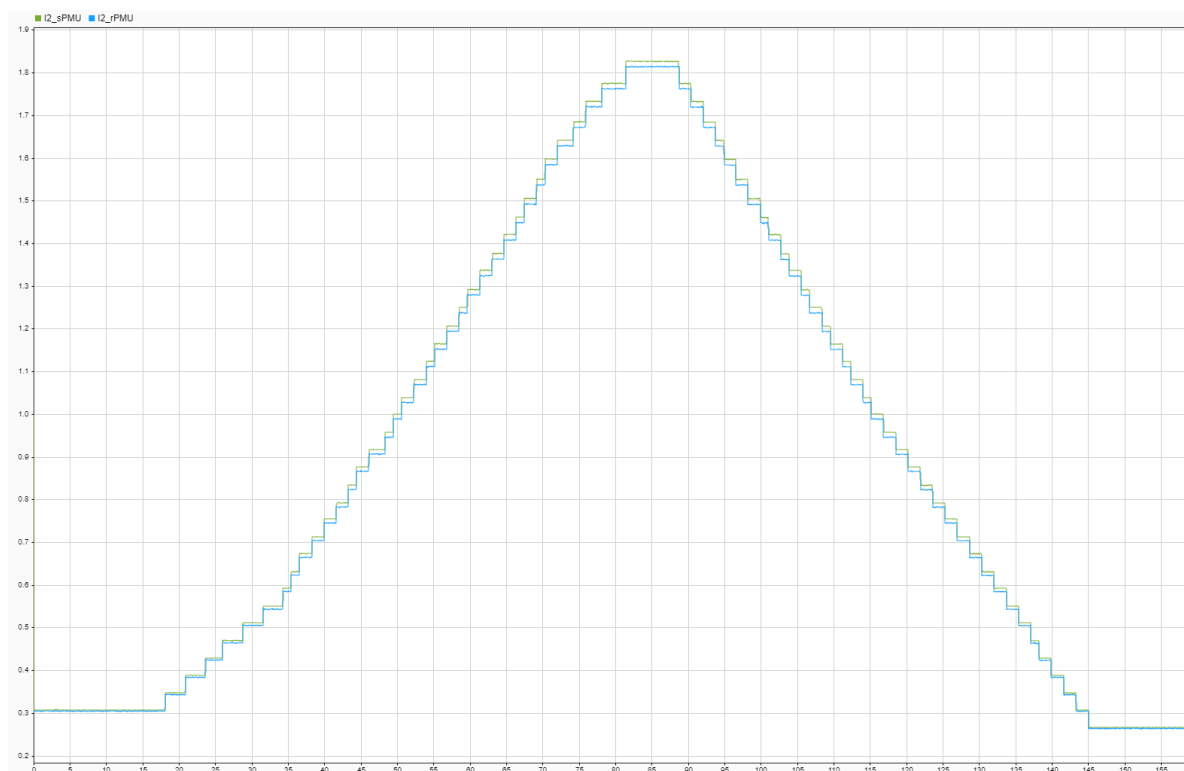


Рисунок 91 – Ток в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (синяя линия) и его имитационной модели (зеленая линия)

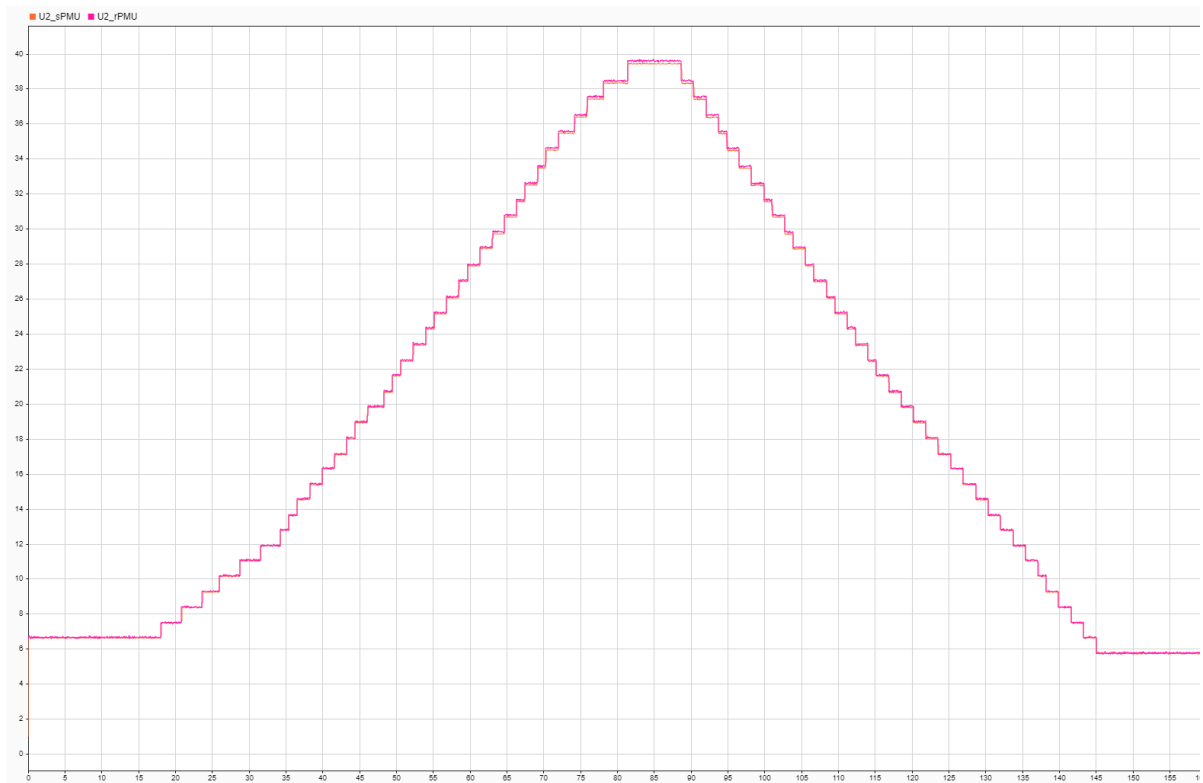


Рисунок 92 – Напряжение на вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (красная линия) и его имитационной модели (оранжевая линия)

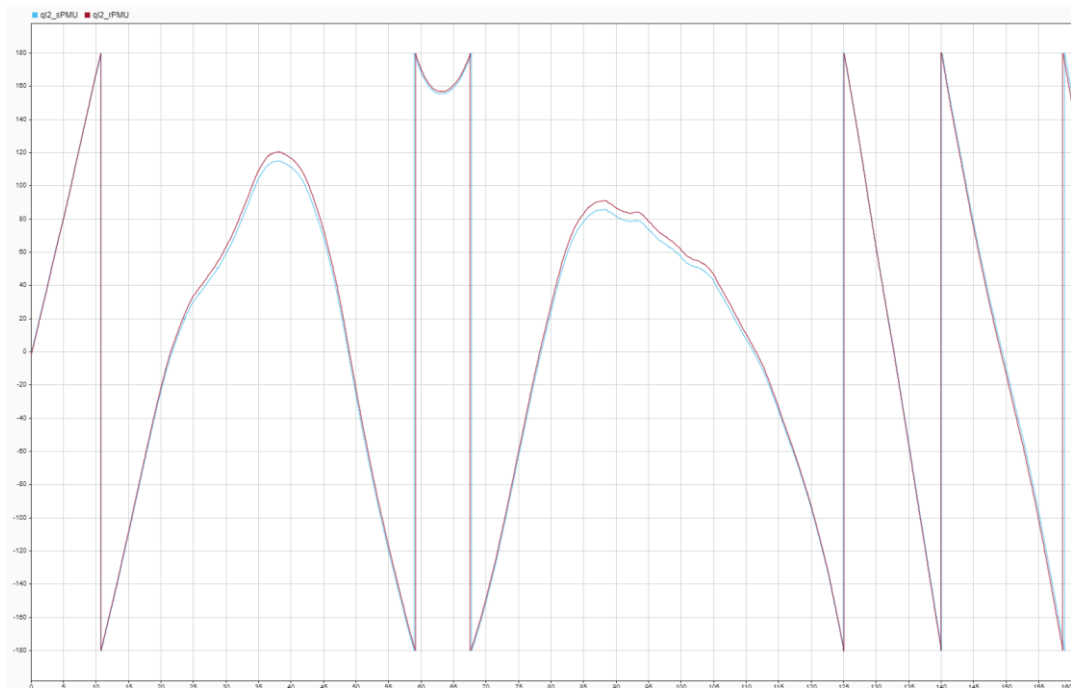


Рисунок 93 – Фазовый угол тока в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (голубая линия) и его имитационной модели (красная линия)

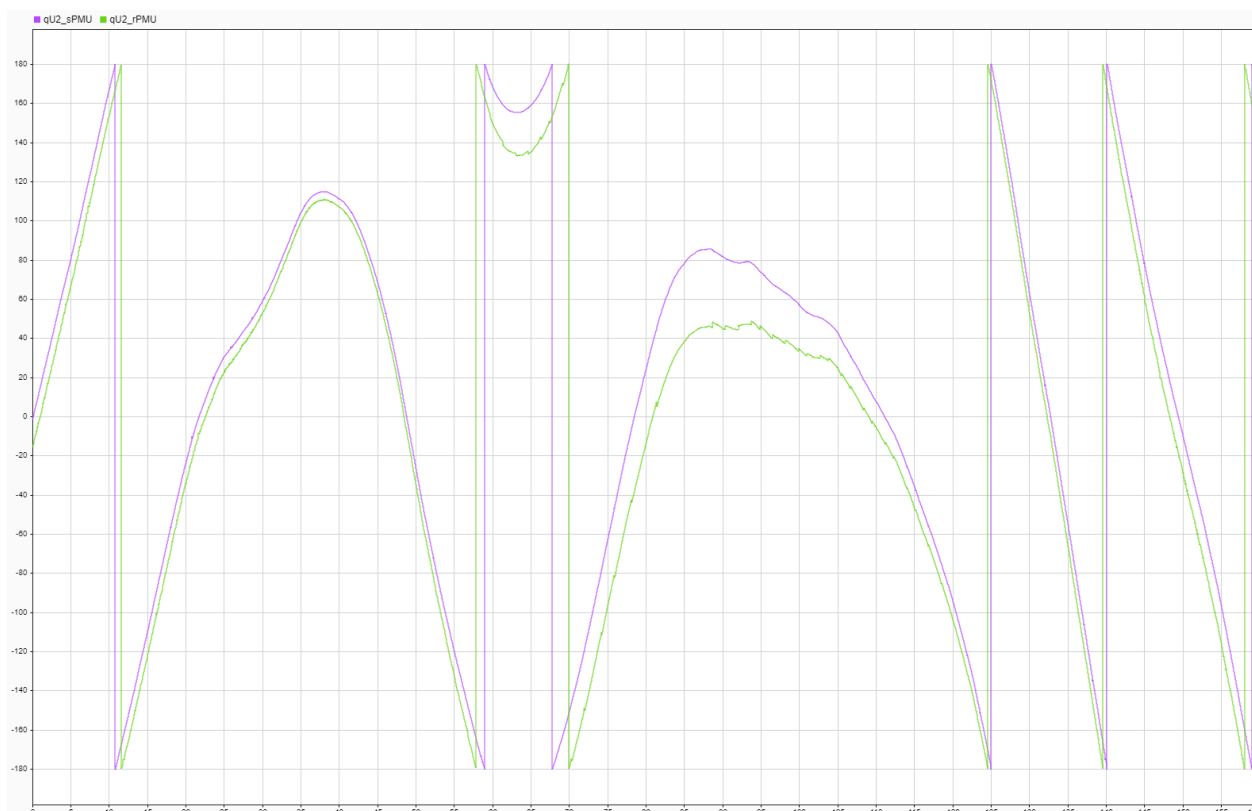


Рисунок 94 – Фазовый угол тока в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (красная линия) и его имитационной модели (оранжевая линия)

Результаты эксперимента с активной нагрузкой представлены в таблице 10.

Таблица 10 - Результаты эксперимента с активной нагрузкой

Наименование параметра	Максимальное расхождение между показанием реального трансформатора и его имитационной модели	Единицы измерения
Ток в первичной обмотке	0,02	Амперы
Ток в вторичной обмотке	0,02	Амперы
Напряжение в вторичной обмотке	1	Вольты
Фазовый угол тока в первичной обмотке	10	Градусы
Фазовый угол тока в вторичной обмотке	35	Градусы

4.8 Эксперимент в режиме холостого хода

Вторичная обмотка трансформатора разомкнута. Параметры нагрузки в программной обеспечении цифрового двойника соответствуют рисунку 95.

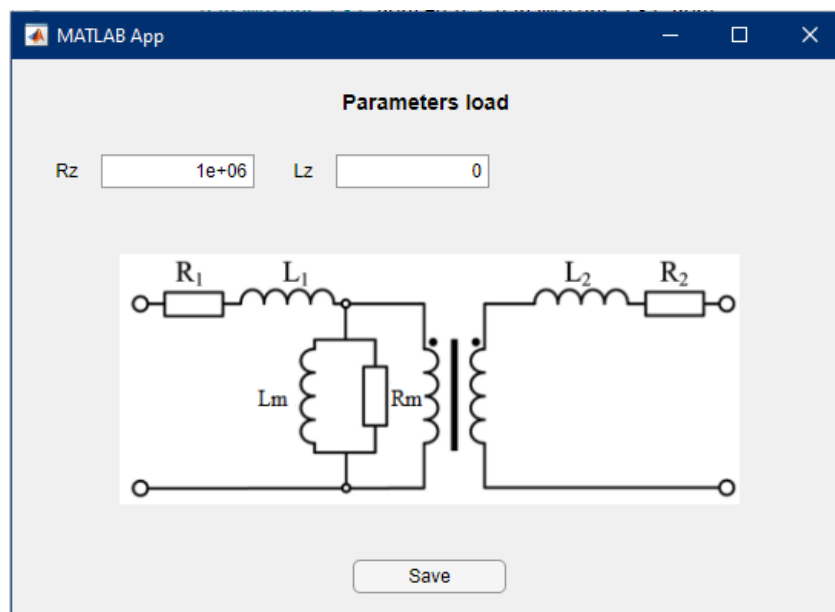


Рисунок 95– Параметры нагрузки в программной обеспечении цифрового двойника

Графики полученных данных от системы мониторинга переходных режимов. Графики представлены на рисунках 96- 104.

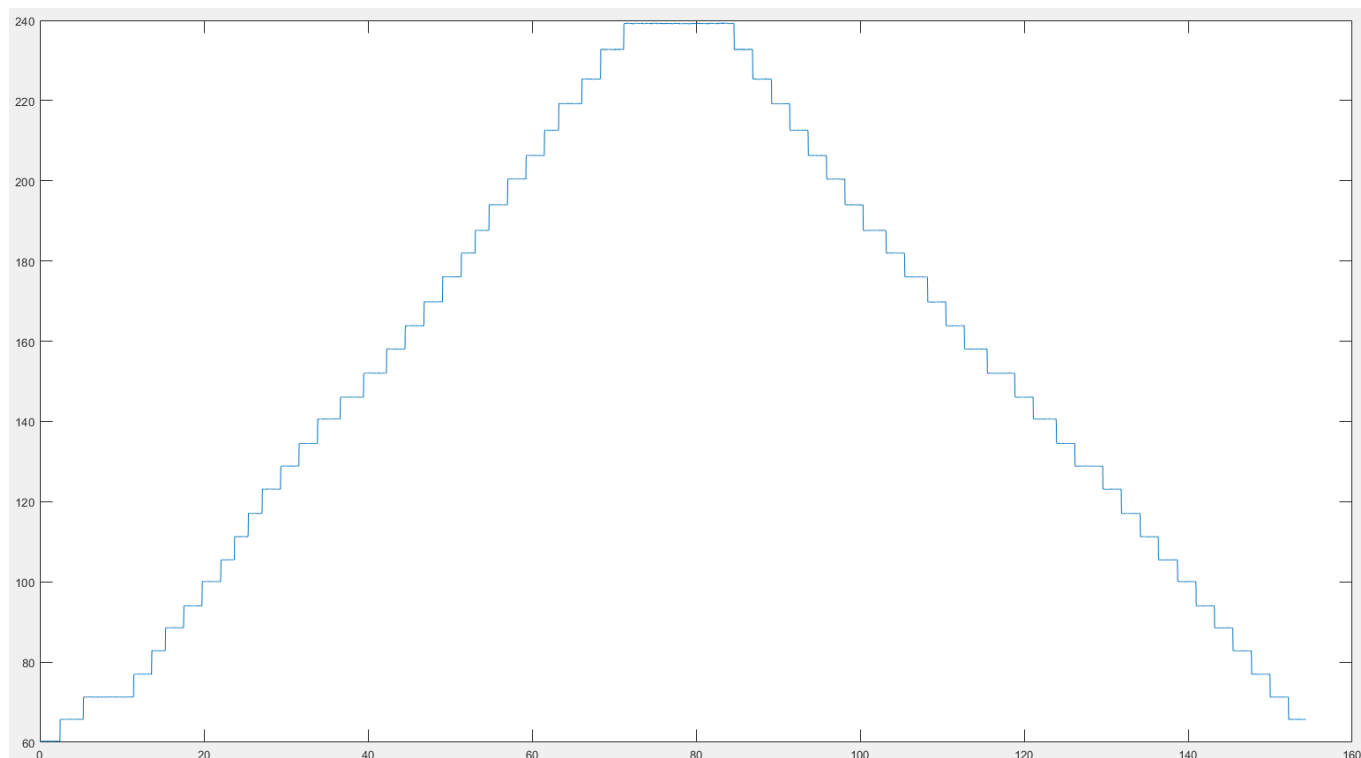


Рисунок 97– График изменения напряжения на первичной обмотке трансформаторе с течением времени

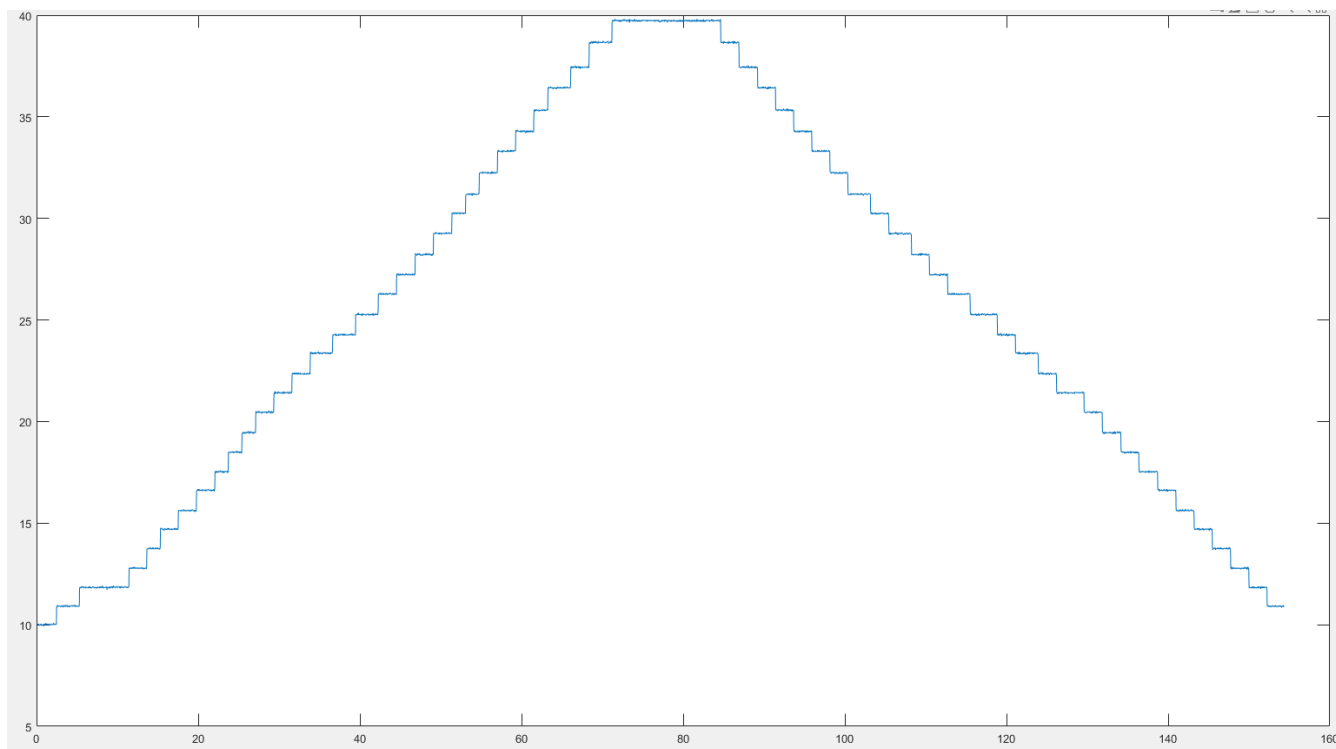


Рисунок 98– График изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора с течением времени

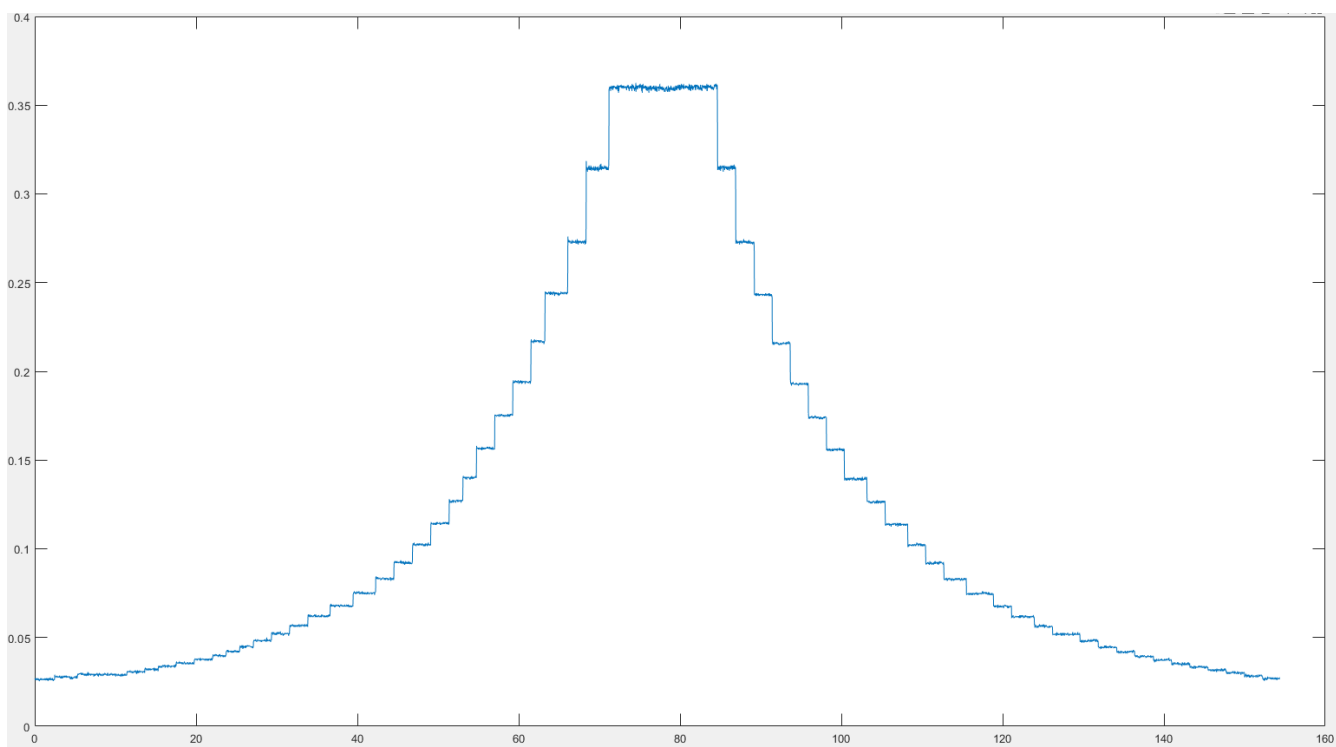


Рисунок 99– График изменения силы тока на первичной обмотке трансформатора с течением времени

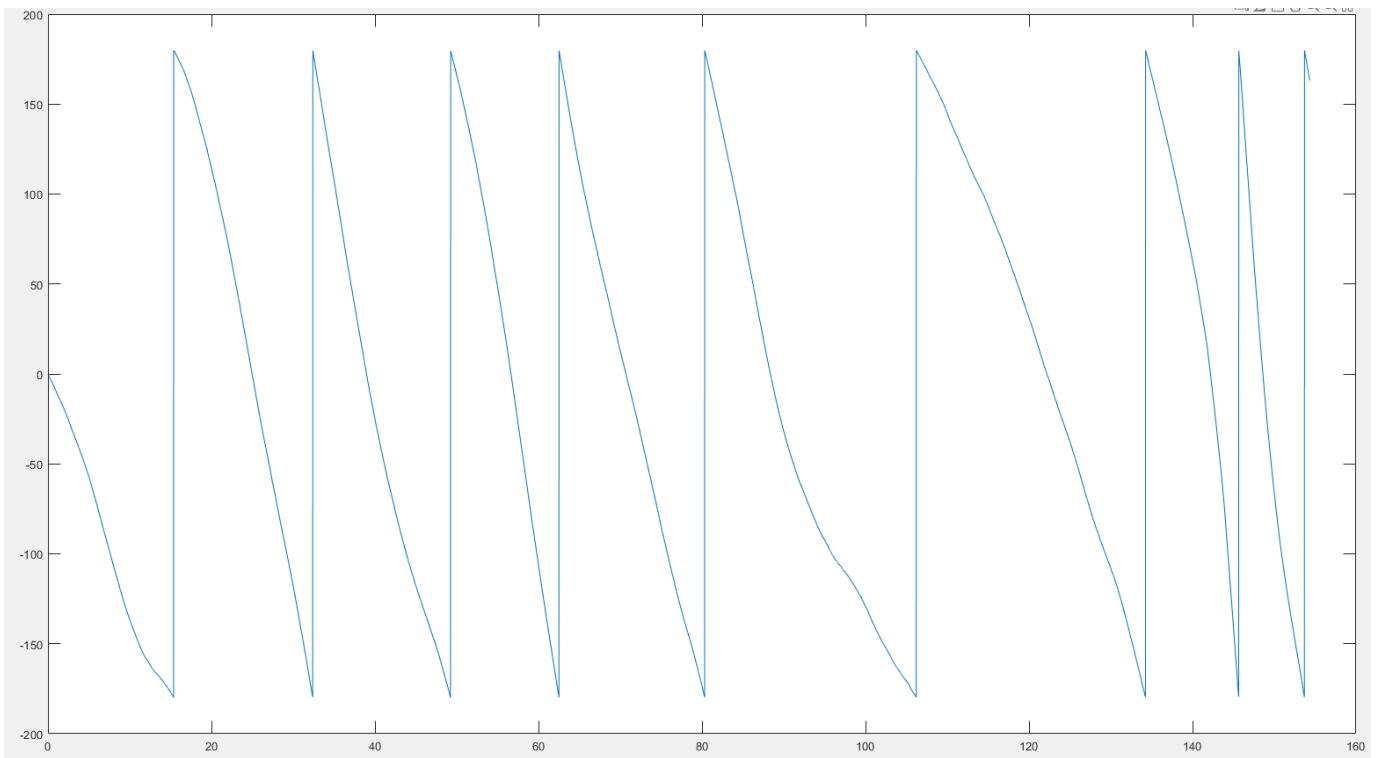


Рисунок 100 – График изменения фазного угла напряжения на первичной обмотке трансформатора с течением времени

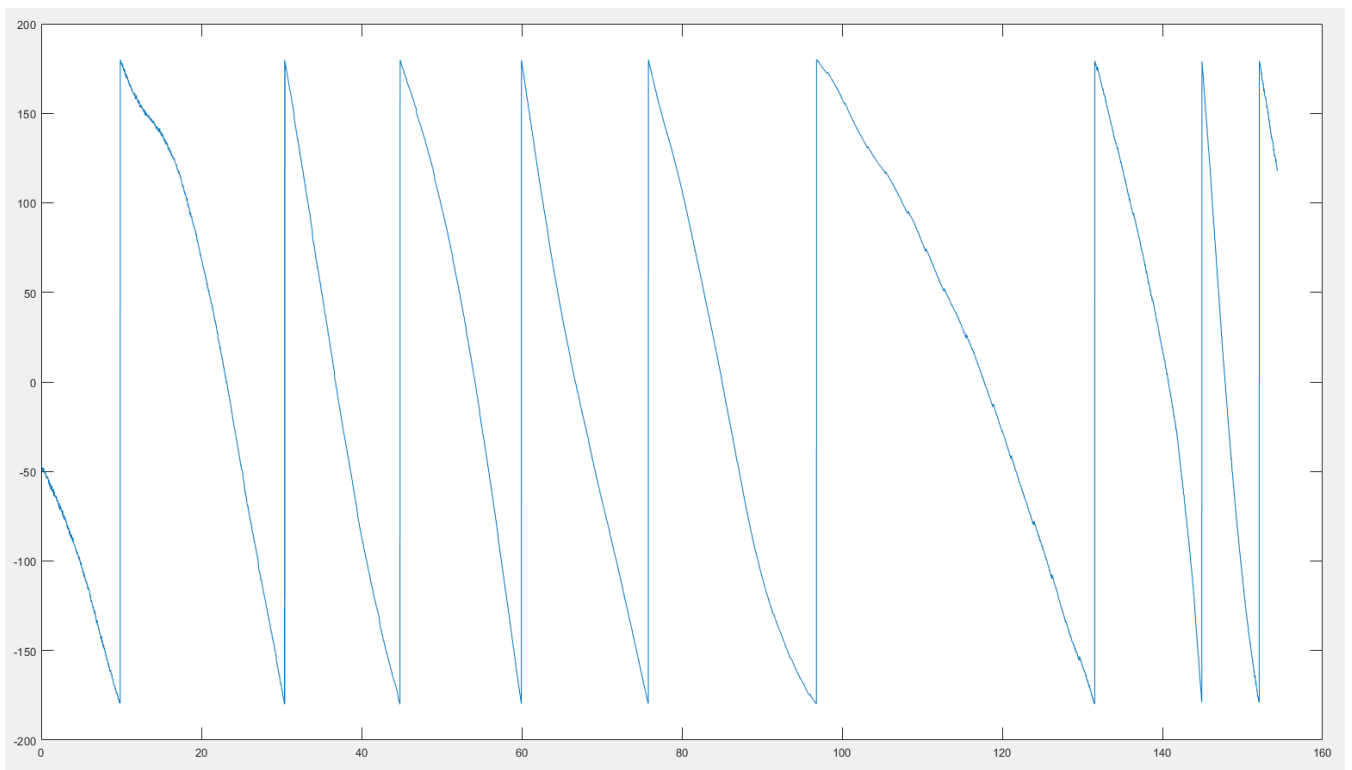


Рисунок 101 – График изменения фазного угла напряжения на вторичной обмотке трансформатора с течением времени

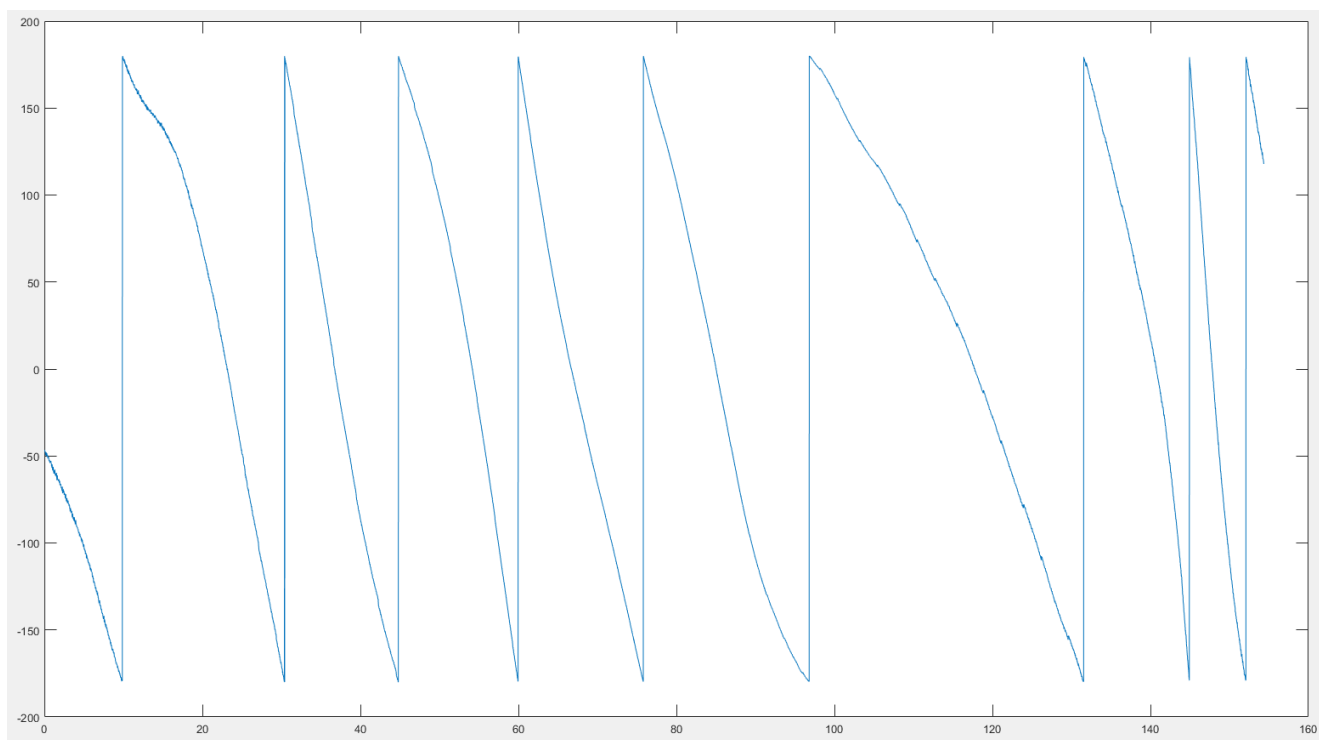


Рисунок 102 – График изменения фазного угла тока в первичной обмотке трансформатора с течением времени

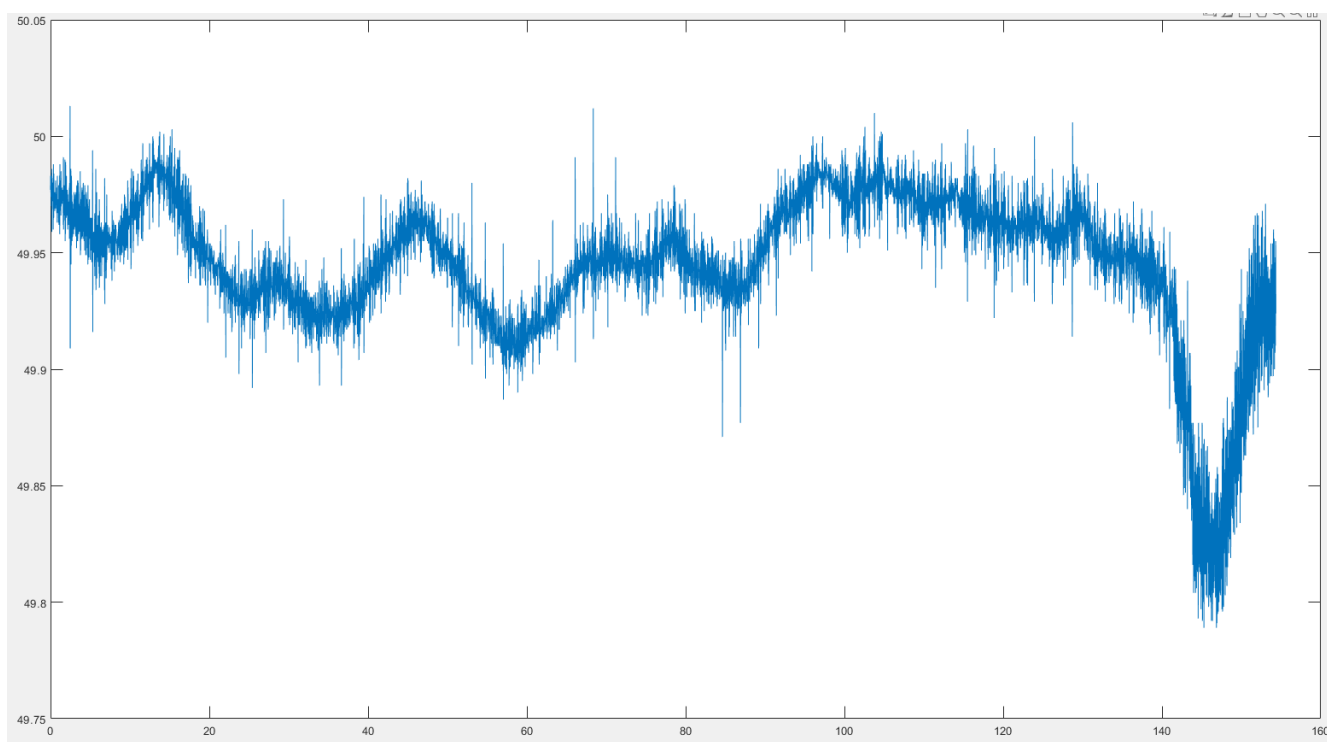


Рисунок 103 – График изменения частоты сети в первичной обмотке трансформатора с течением времени

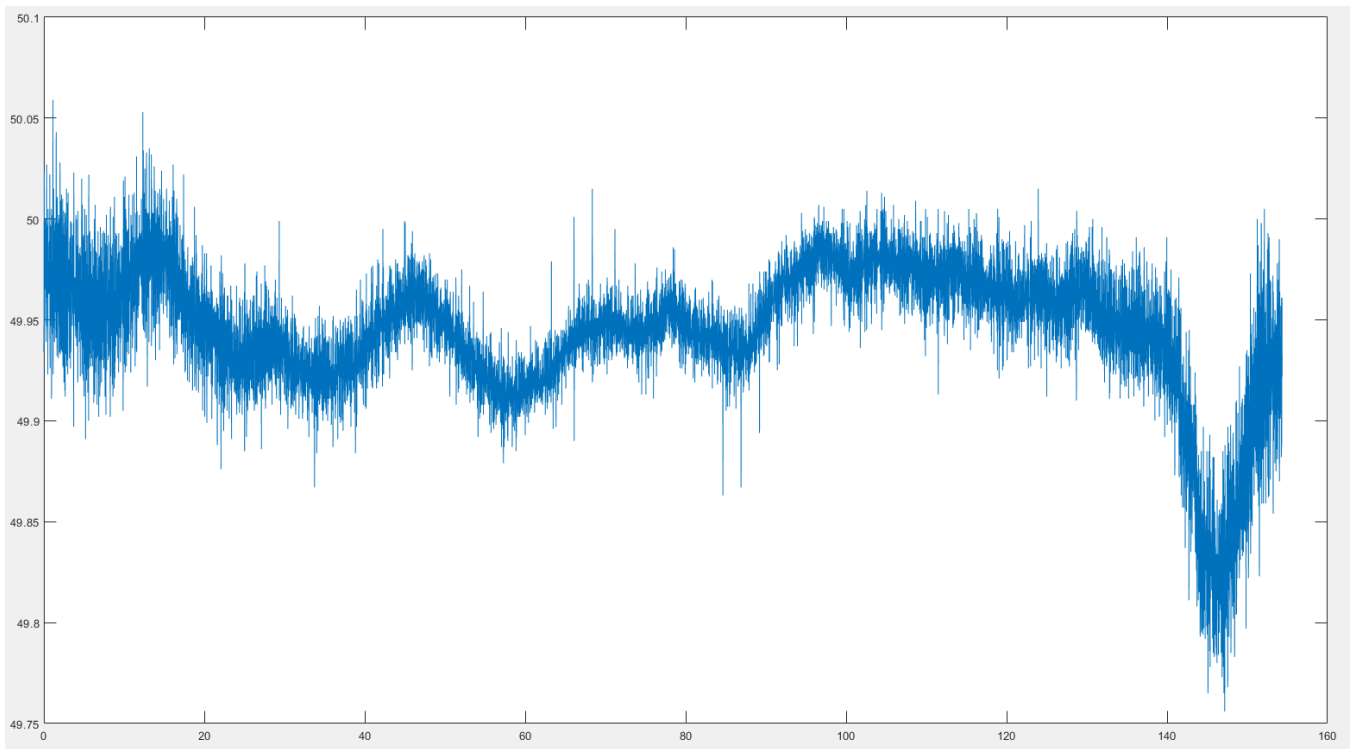


Рисунок 104 – График изменения частоты сети в вторичной обмотке трансформатора с течением времени

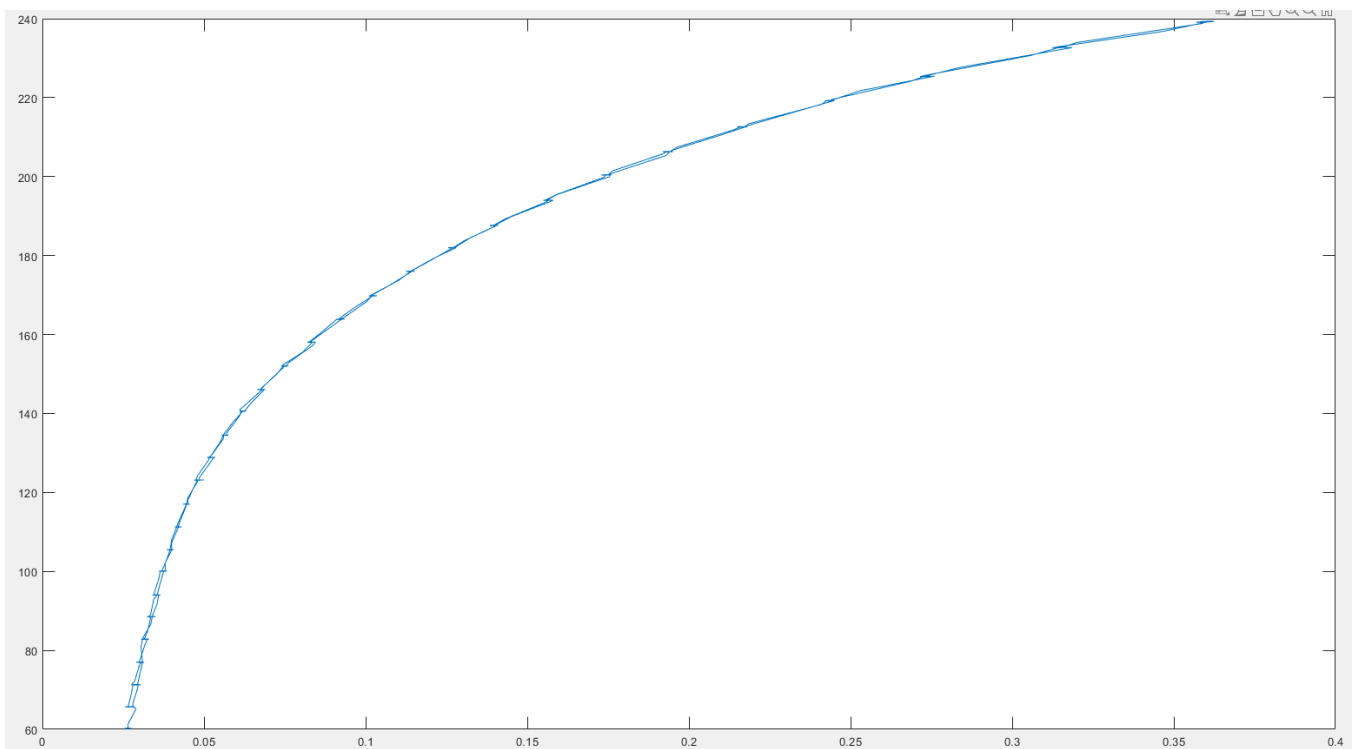


Рисунок 105 – Воль-амперная характеристика на первичной обмотке трансформатора

После завершения моделирование в Simulink в окне «Data inspector» можно посмотреть и сравнить выходные параметры цифрового двойника, а именно:

- Ток в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 106);
- Напряжение на вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 107);
- Фазовый угол тока в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 108);
- Фазовый угол тока в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 109).

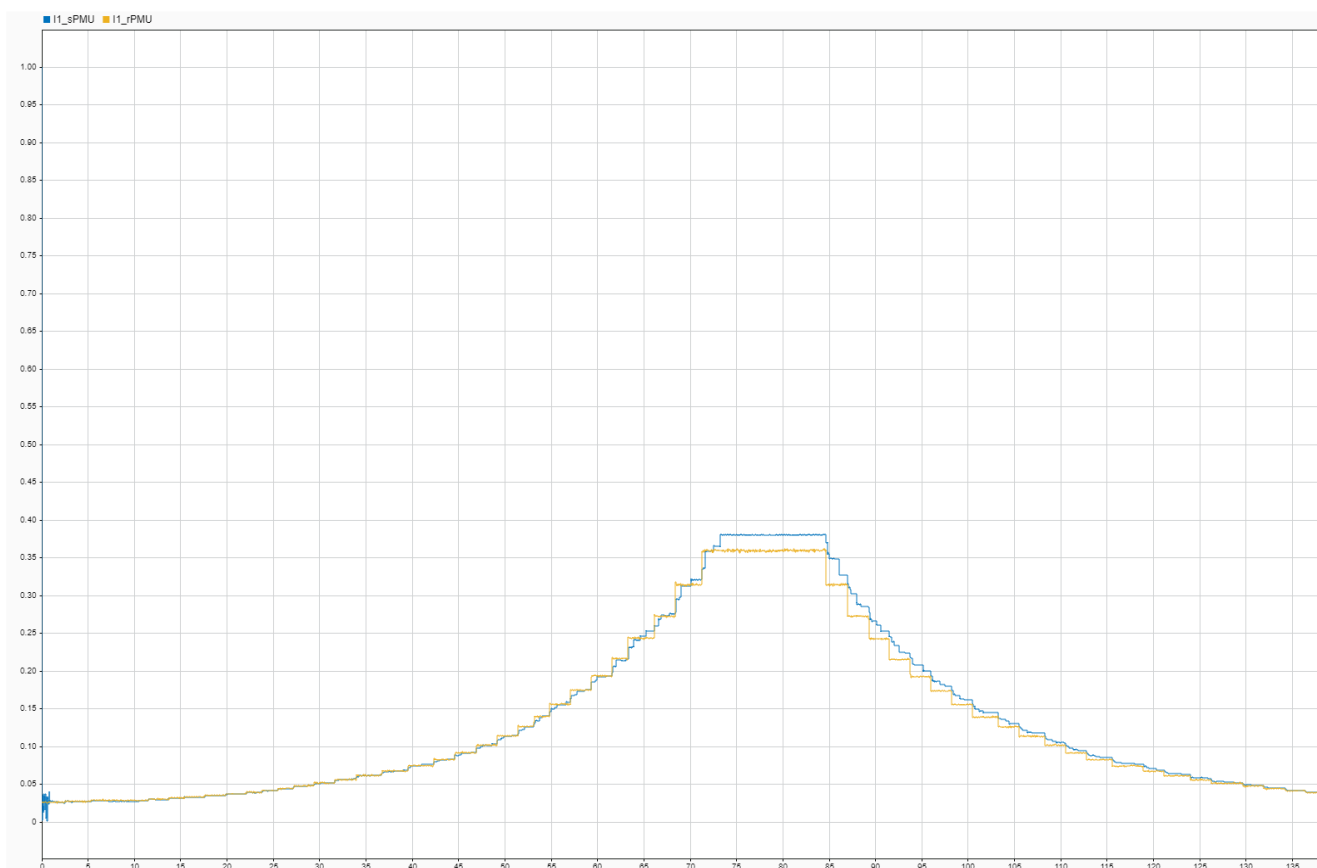


Рисунок 106 – Ток в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (желтая линия) и его имитационной модели (синяя линия)



Рисунок 107 – Напряжение на вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (красная линия) и его имитационной модели (оранжевая линия)

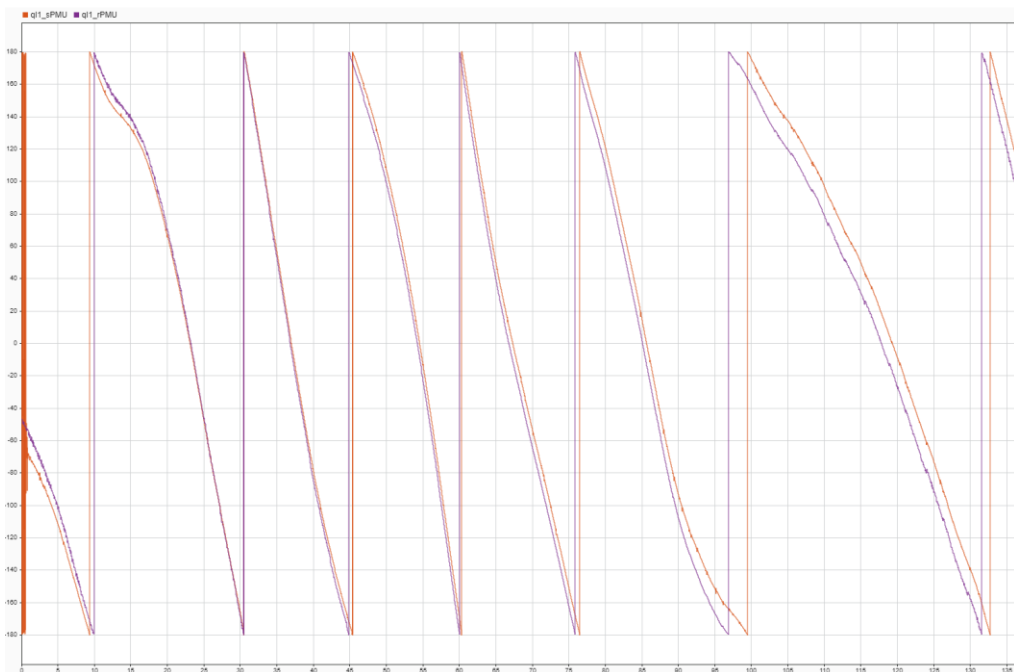


Рисунок 108 – Фазовый угол тока в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (голубая линия) и его имитационной модели (красная линия)

Результаты эксперимента в режиме холостого хода представлены в таблице 11.

Таблица 11 - Эксперимента в режиме холостого хода

Наименование параметра	Максимальное расхождение между показанием реального трансформатора и его имитационной модели	Единицы измерения
Ток в первичной обмотке	0,03	Амперы
Напряжение в вторичной обмотке	1	Вольты
Фазовый угол тока в первичной обмотке	20	Градусы

4.9 Эксперимент в режиме короткого замыкания

Вторичная обмотка трансформатора замкнута на коротко. Параметры нагрузки в программной обеспечении цифрового двойника соответствуют рисунку 109.

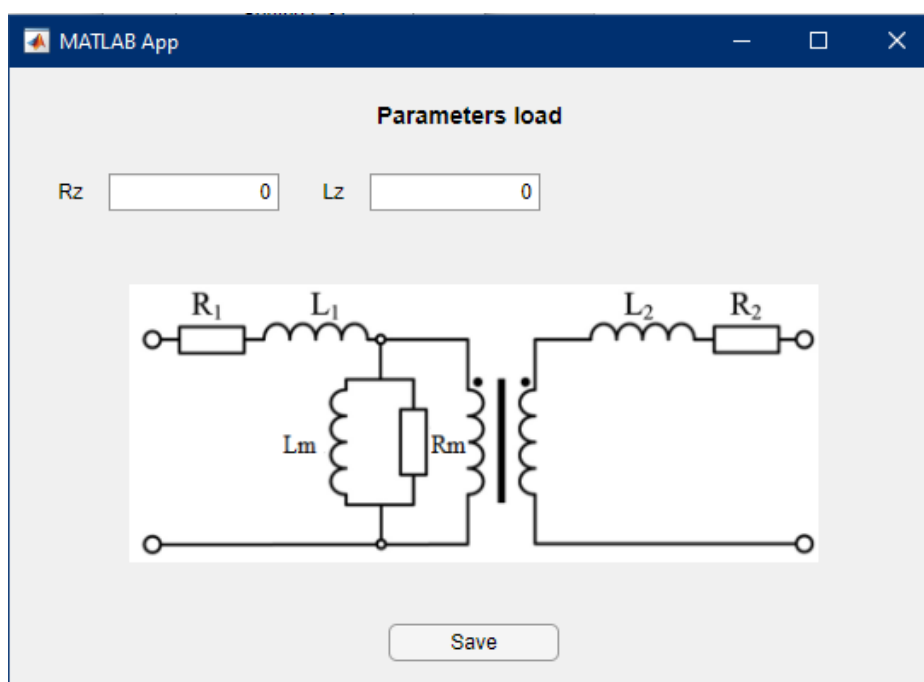


Рисунок 109– Параметры нагрузки в программной обеспечении цифрового двойника

Графики полученных данных от системы мониторинга переходных режимов. Графики представлены на рисунках 110- 115.

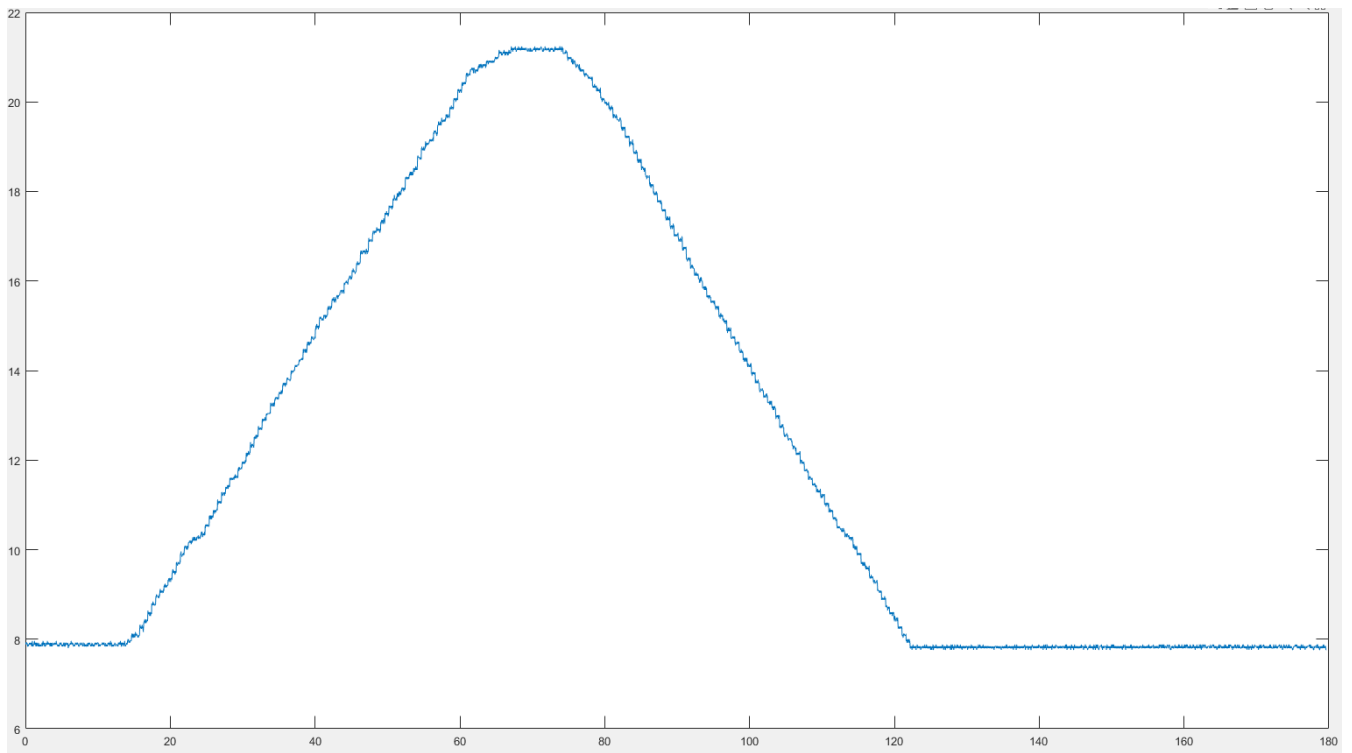


Рисунок 110– График изменения напряжения на первичной обмотке трансформатора с течением времени

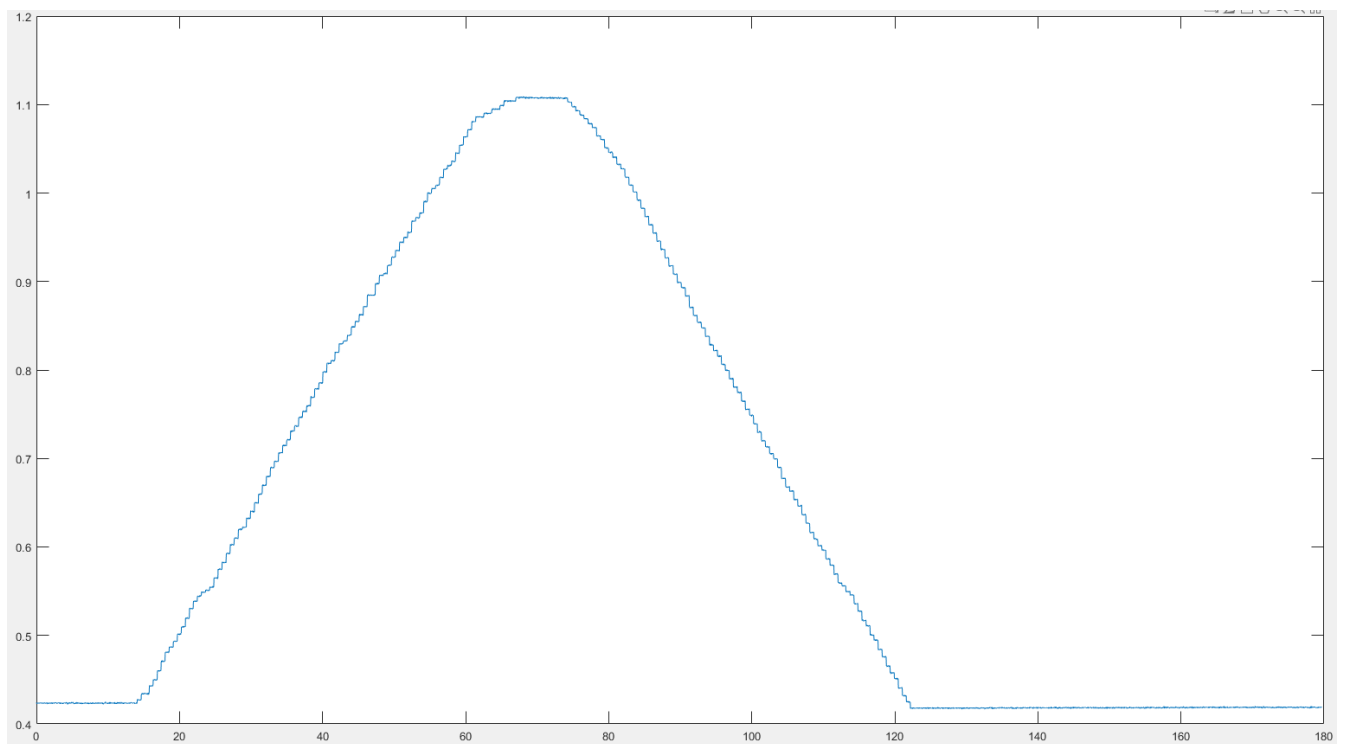


Рисунок 111– График изменения силы тока на первичной обмотке трансформатора с течением времени

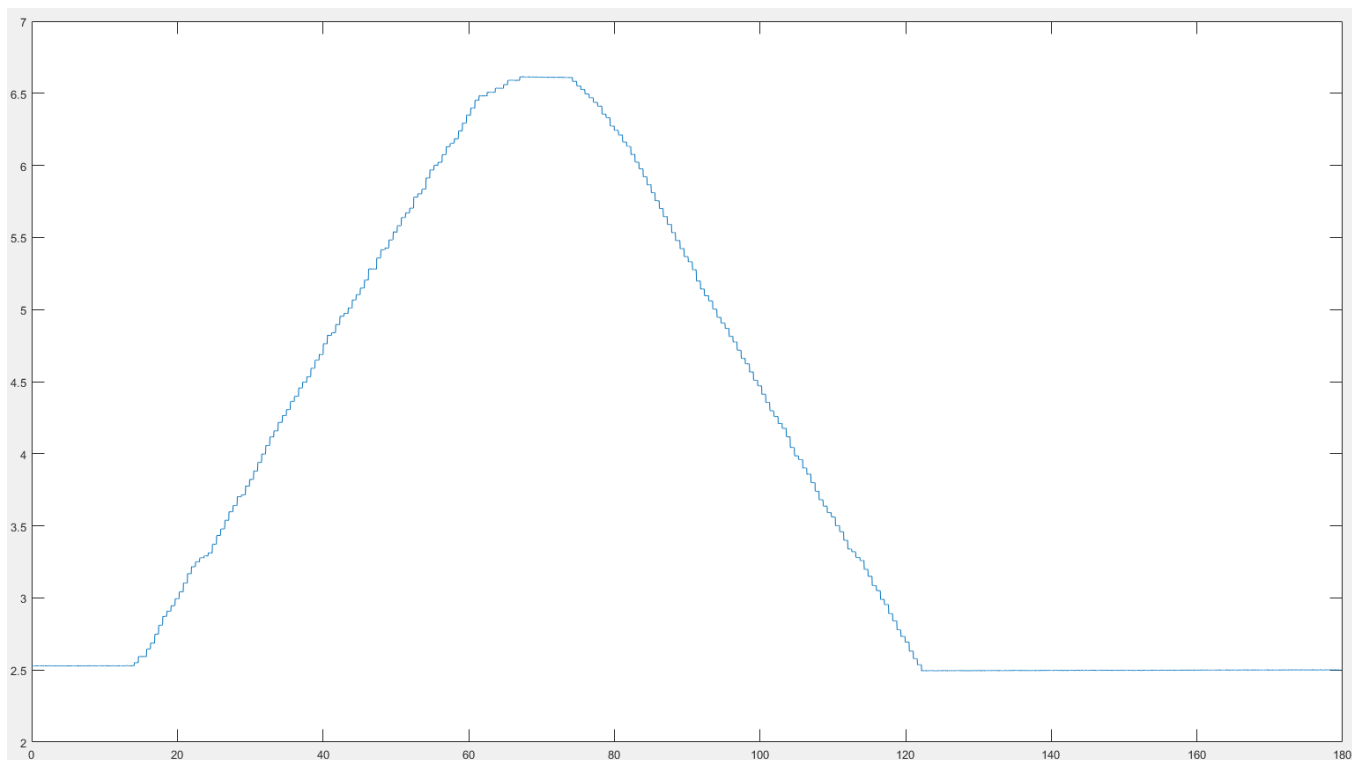


Рисунок 112 – График изменения силы тока на вторичной обмотке трансформатора с течением времени

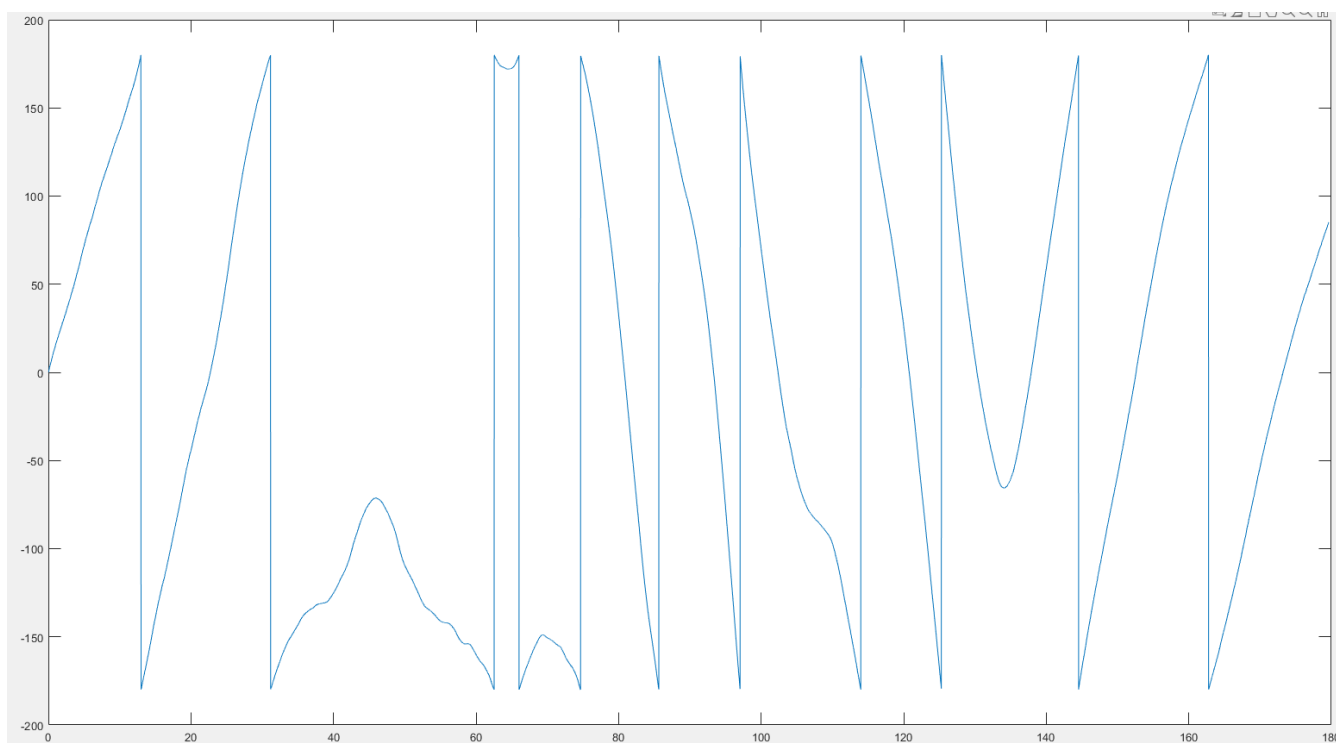


Рисунок 113 – График изменения фазного угла напряжения на первичной обмотке трансформатора с течением времени

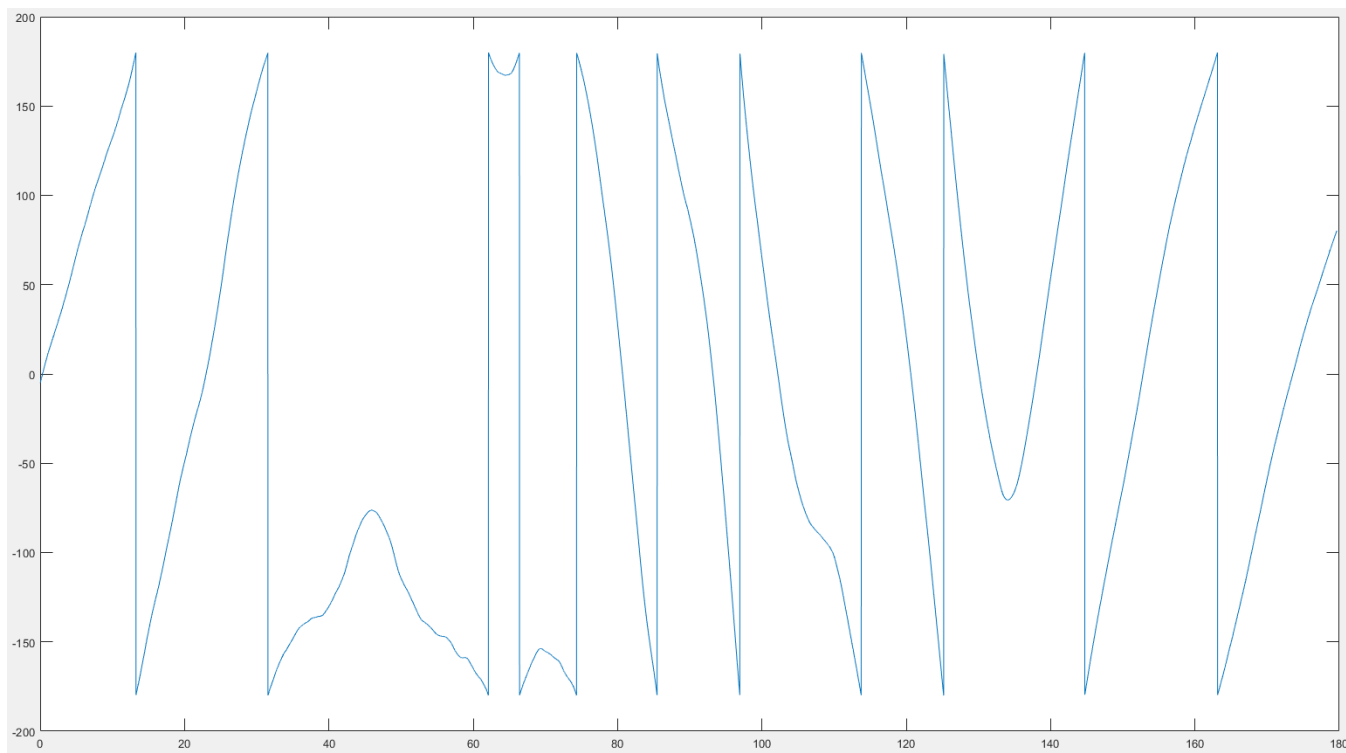


Рисунок 114 – График изменения фазного угла тока в первичной обмотке трансформатора с течением времени

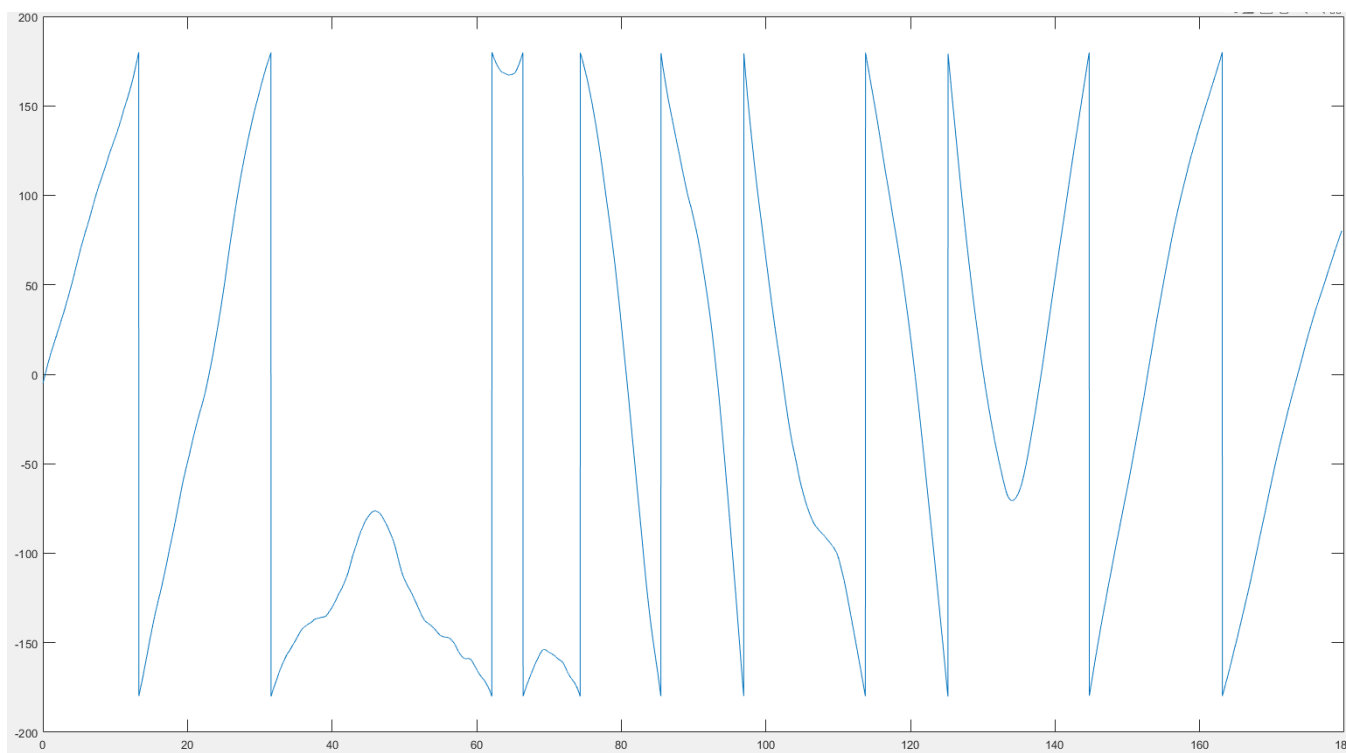


Рисунок 115 – График изменения фазного угла тока в вторичной обмотке трансформатора с течением времени

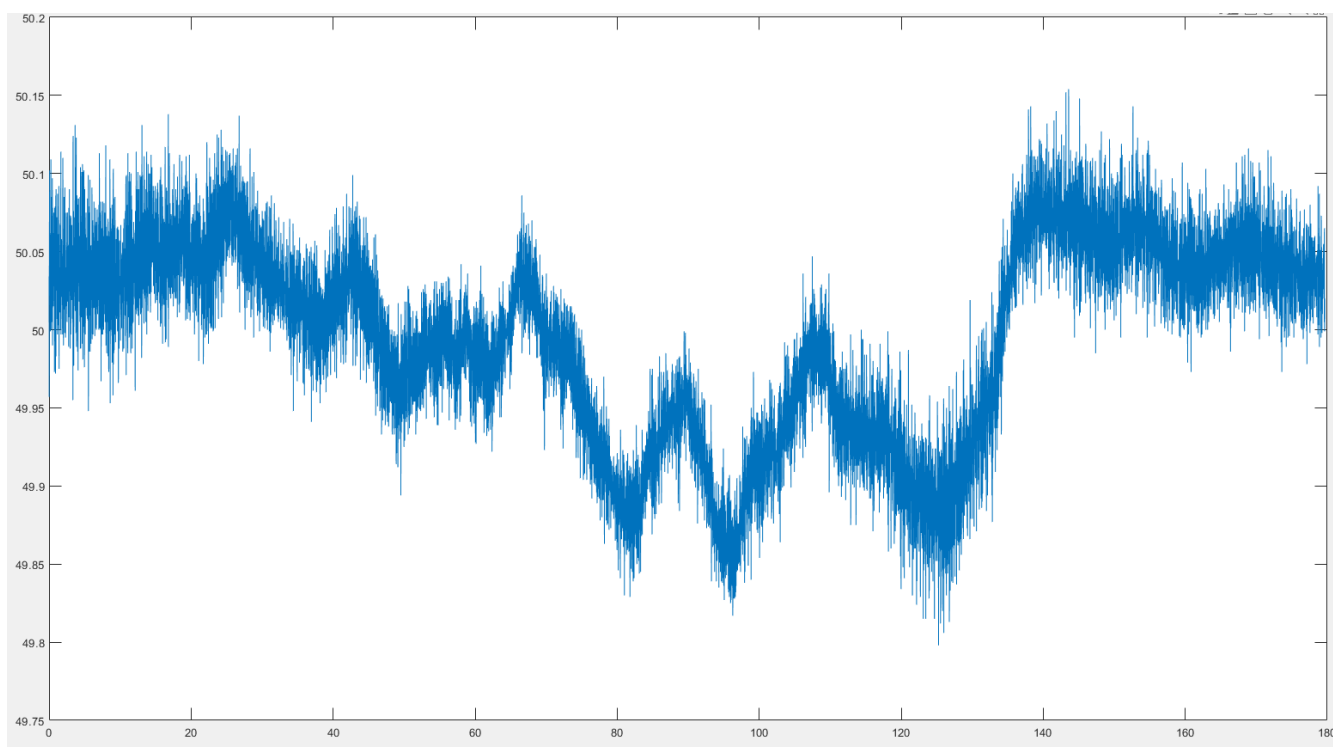


Рисунок 116– График изменения частоты сети в первичной обмотке трансформаторе с течением времени

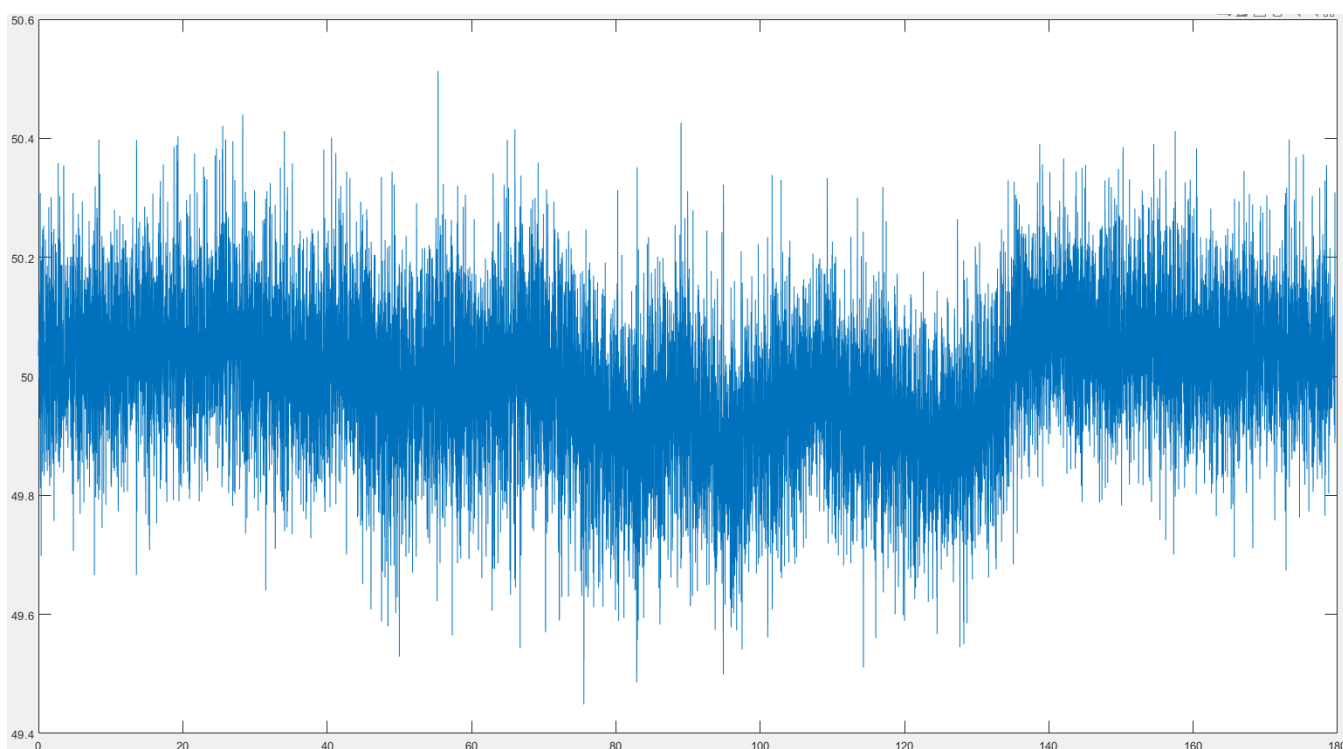


Рисунок 117 – График изменения частоты сети в вторичной обмотке трансформаторе с течением времени

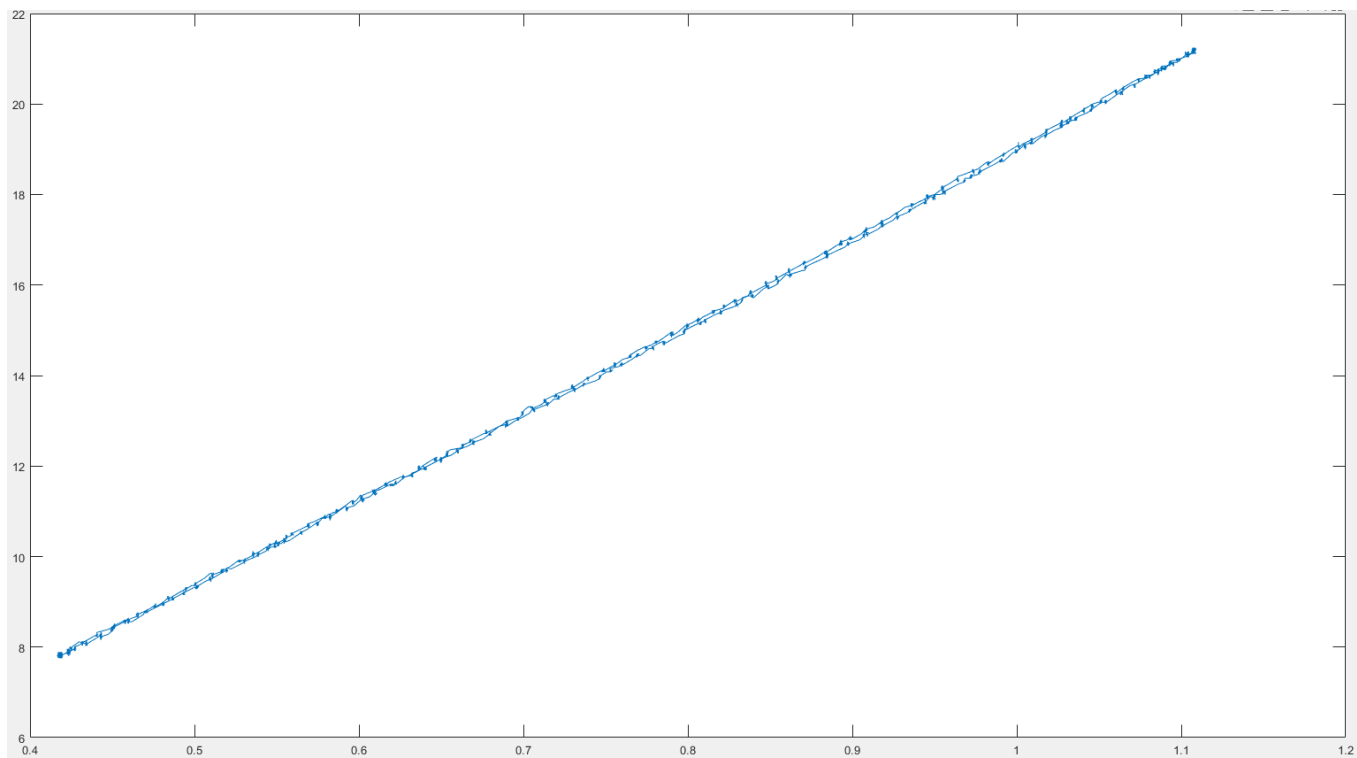


Рисунок 118 – Вольт-амперная характеристика на первичной обмотке трансформатора

После завершения моделирование в Simulink в окне «Data inspector» можно посмотреть и сравнить выходные параметры цифрового двойника, а именно:

- Ток в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 119);
- Ток в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 120);
- Фазовый угол тока в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 121);
- Фазовый угол тока в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора и его имитационной модели (рисунок 122).

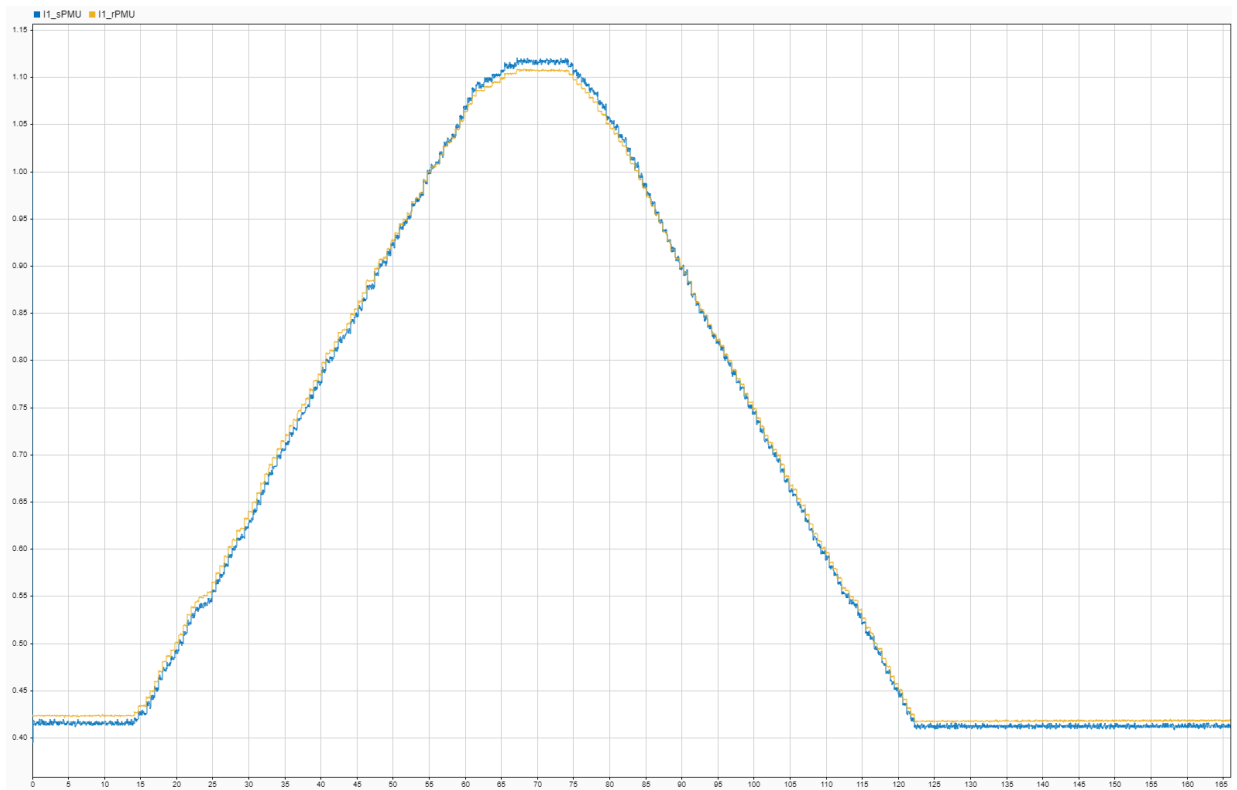


Рисунок 119 – Ток в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (желтая линия) и его имитационной модели (синяя линия)

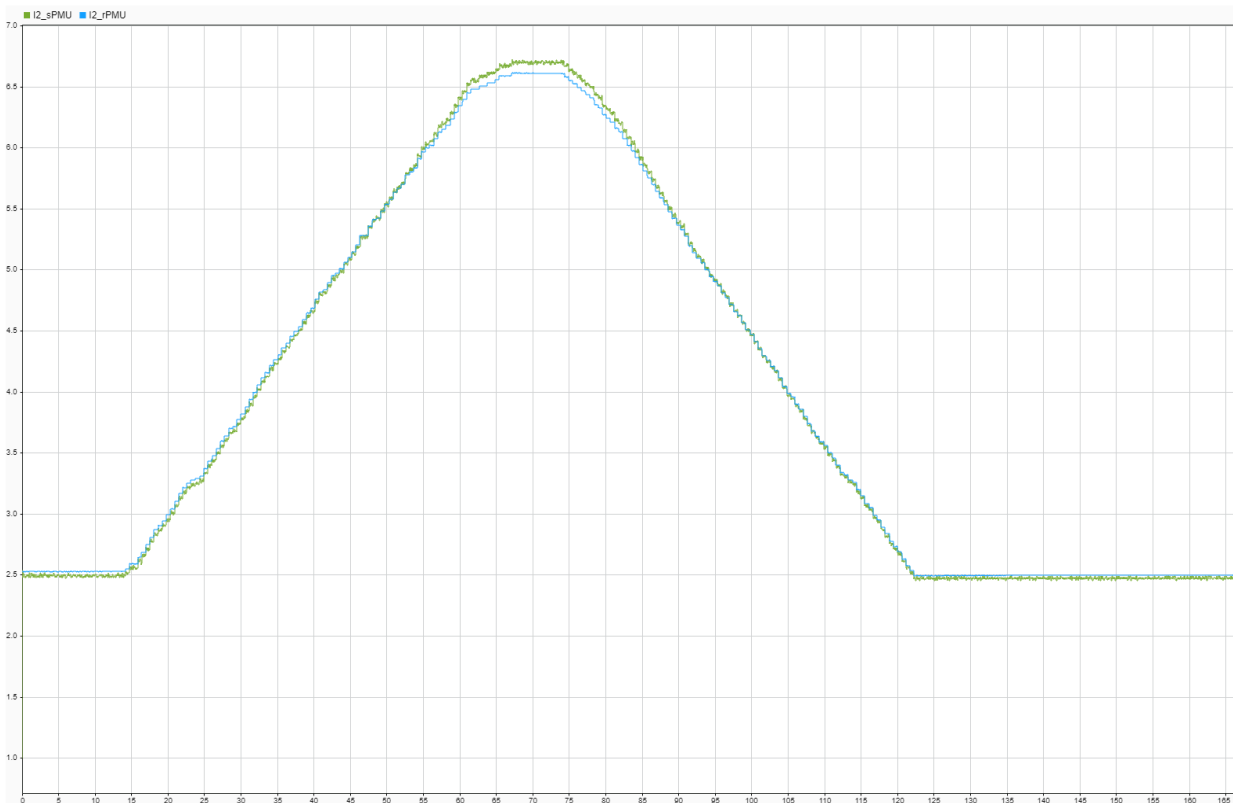


Рисунок 120 – Ток в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (синяя линия) и его имитационной модели (зеленая линия)

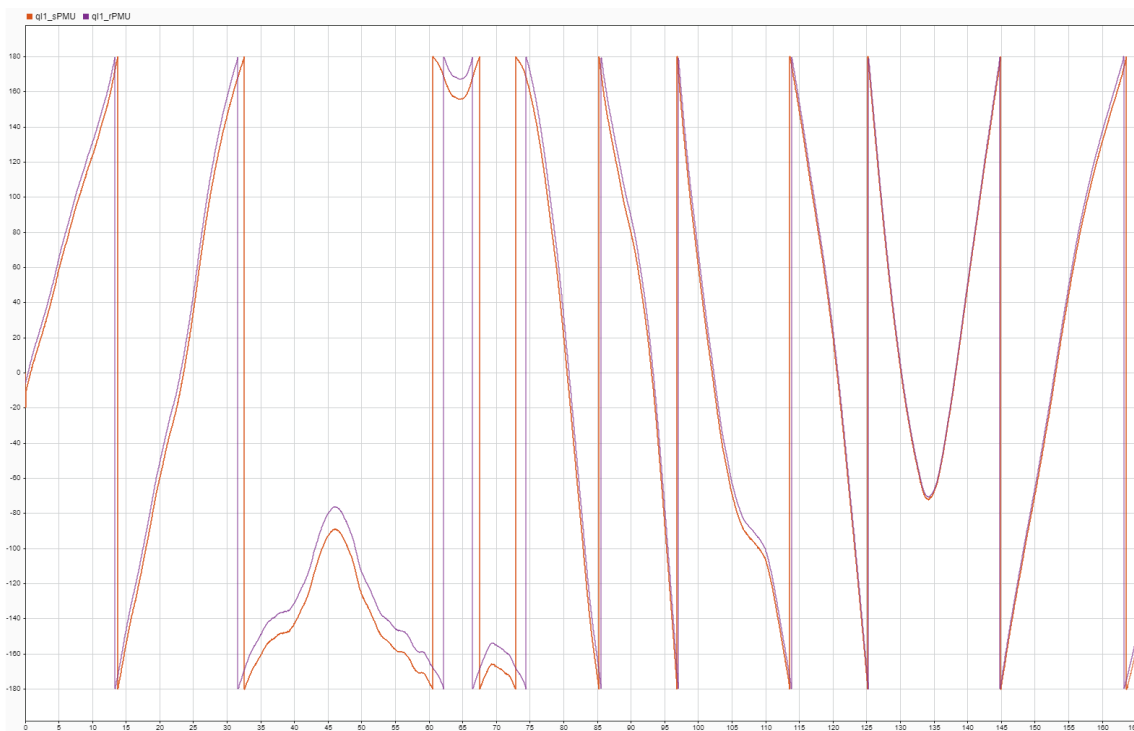


Рисунок 121 – Фазовый угол тока в первичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (голубая линия) и его имитационной модели (красная линия)

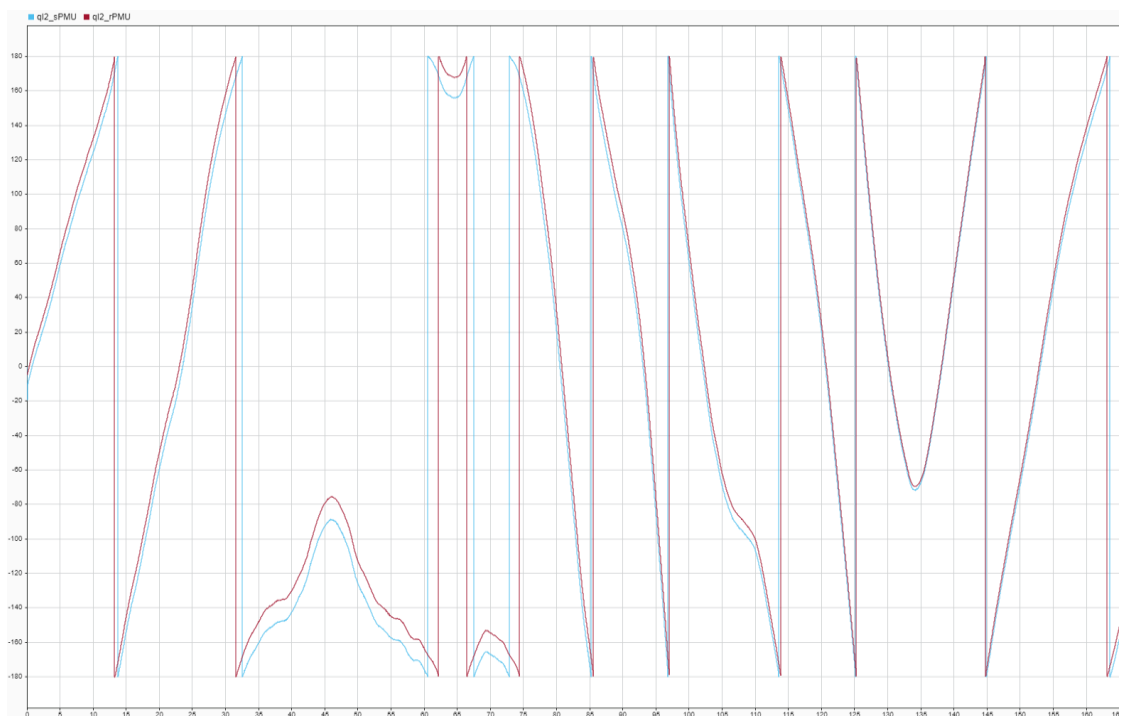


Рисунок 122 – Фазовый угол тока в вторичной обмотке реального двухобмоточного трансформатора (красная линия) и его имитационной модели (оранжевая линия)

Результаты эксперимента с активной нагрузкой представлены в таблице 12.

Таблица 12 - Результаты эксперимента с активной нагрузкой

Наименование параметра	Максимальное расхождение между показанием реального трансформатора и его имитационной модели	Единицы измерения
Ток в первичной обмотке	0,02	Амперы
Ток в вторичной обмотке	0,2	Амперы
Фазовый угол тока в первичной обмотке	20	Градусы
Фазовый угол тока в вторичной обмотке	20	Градусы

4.10 Вывод по четвертой главе

По результатам моделирования приведенных в таблице 3,4,5 точность моделирования достаточно высока и максимальное расхождение между показанием реального трансформатора и его имитационной модели не превышает 5%, что указывает на то, что реальные параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора соответствуют рассчитанным параметрам указанных в таблице 9.

Полученный цифровой двойник двухобмоточного трансформатора позволил точно верифицировать параметры схемы замещения трансформатора, о чем говорят результаты моделирования цифровой модели трансформатора при работе его в режиме холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.

В дальнейшем полученный цифровой двойник можно использовать для моделирования работы трансформатора при различных аварийных режимах и неисправностях, например при межвитковом замыкании, и получить необходимые данные для обучения алгоритмов машинного обучения в «умных» системах мониторинга по выявлению межвитковых замыканий в трансформаторе (рисунок 89).

Тем самым цифровой двойник может применяться для получения данных работы, необходимых для систем предсказания отказов и предсказательного технического обслуживания, которые используют методы машинного обучения, которые в свою очередь обучаются на этих данных.

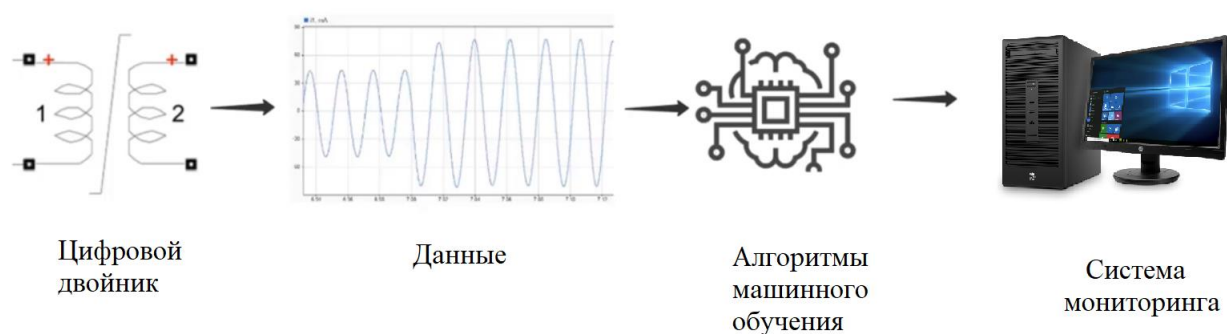


Рисунок 123 – Процесс обучения алгоритмов машинного обучения «умных» системах мониторинга по выявлению межвитковых замыканий

Так же при помощи цифрового двойника можно при длительной эксплуатации трансформатора контролировать отклонение параметров схемы замещения, сравнивая ранние результаты моделирования трансформатора с более новыми полученными данными от системы мониторинга переходных режимах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе была поставлена и достигнута цель, заключающаяся в разработки и получение готовых к работе экземпляров цифровых двойников КРУ 10 кВ и двухобмоточного трансформатора, разработаны методы создания цифровых двойников электроэнергетических объектов.

Данная цель достигнута путем разработки и использования цифровой модели КРУ 10 кВ, SCADA системы КРУ 10 кВ. Для создания цифрового двойника двухобмоточного трансформатора разработано специальное программного обеспечения, которое позволяет создавать цифровые двойники двухобмоточных трансформаторов на основе системы мониторинга переходных режимов.

Разработанный цифровой двойник КРУ 10 кВ может быть использован в целях повышения надежности энергосистемы и предотвращения аварийных и предаварийных ситуаций на подстанции путем обнаружения рассогласований диспетчером параметров электрической сети реального объекта и цифровой модели. Стоит отметить, что данный цифровой двойник КРУ 10 кВ будет полезен для тех предприятий, на которых заранее известно, какая будет конечная нагрузка или на предприятии будет реализована диспетчеризация, где будет осуществлен контроль нагрузки при помощи коммутационного оборудования (изменения положения выключателей, положение – автоматический выключатель).

Разработанное программное обеспечение для создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов на основе системы мониторинга переходных режимов позволит создавать цифровые двойники для точной верификации параметров схемы замещения двухобмоточных трансформаторов. В дальнейшем полученный цифровой двойник можно использовать для моделирования работы трансформатора при различных аварийных режимах и неисправностях, например при межвитковом замыкании, и получить необходимые данные для обучения алгоритмов машинного обучения в «умных» системах мониторинга, которые могут вывить дефект трансформатора на ранней стадии, например межвитковое

замыкание. Тем самым цифровой двойник может применяться для получения данных работы, необходимых для систем предсказания отказов и предсказательного технического обслуживания, которые используют методы машинного обучения, которые в свою очередь обучаются на этих данных.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Произведен анализ подходов к разработке цифровых двойников, по результатам анализа разработаны новые подходы к разработке цифровых двойников в электроэнергетике.

2. Исследован опыт разработки цифровых двойников за рубежом и в России. Результаты исследования послужили ориентиром при разработке цифровых двойников КРУ 10 кВ и двухобмоточного трансформатора.

3. Разработана структурная схемы цифрового двойника КРУ 10 кВ.

4. Разработана цифровой модель КРУ 10 кВ.

5. Разработана система управления (SCADA) КРУ 10 кВ, которая позволяет управлять исполнительными механизмами, отображать на мнемосхемах параметры электрической сети реального объекта и цифровой модели.

6. Цифровой двойник КРУ 10 кВ протестирован при различных воздействиях на реальный объект (изменения напряжений на фазе А, В,С , изменения токов в фазах А, В, С, изменение положения выключателя, имитация короткого замыкания путем изменения положения заземляющих ножей). Эксперименты показали приемлемые показатели точности цифровой модели относительно реального объекта.

7. Разработано программное обеспечение для создание цифровых двойников двухобмоточных трансформаторов на основе системы мониторинга переходных режимов.

8. Разработана цифровая модель двухобмоточного трансформатора.

9. Произведена настройка оборудования системы мониторинга переходных режимов.

10. Рассчитаны параметры Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора путем проведения опытов холостого хода и короткого замыкания

11. Цифровой двойник двухобмоточного трансформатора протестирован при работе под нагрузкой, в режиме холостого хода, в режиме короткого замыкания. По результатам моделирования приведенных в таблице 3,4,5 точность моделирования достаточно высока и максимальное расхождение между показанием реального трансформатора и его имитационной модели не превышает 5%, что указывает на то, что реальные параметры схемы замещения двухобмоточного трансформатора соответствуют рассчитанным параметрам указанных в таблице 9.

Основные результаты работы:

1. Разработан и получен готовый к работе экземпляр цифрового двойника КРУ 10 кВ.
2. Разработан и получен готовый к работе экземпляр цифрового двойника двухобмоточного трансформатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ю. В. Мясоедов, О. Ю. Саяпин. Идентификация математической модели объектов управления каскадного контура регулирования температуры водородного реактора установки получения гелия на Амурском ГПЗ // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов : Сборник трудов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Благовещенск, 24–25 ноября 2022 года. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2022. – С. 8-13. – EDN BYFMVM.
2. Ю. В. Мясоедов, О. Ю. Саяпин. Описание спецификации цифровой подстанции, формирование SSD-файла // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Благовещенск, 24–25 ноября 2022 года. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2022. – С. 23-30. – EDN YEPLVP.
3. Семенова К.В., Тихонов А.И., Подобный А.В. Разработка цифровых двойников распределительных трансформаторов для оценки пожарной опасности трансформаторных подстанций / Современные пожаробезопасные материалы и технологии, сборник материалов IV международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 202, ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС России, 2020. – С. 268 – 271.
4. Md. Mhamud Hussen Sifat, Safwat Mukarrama Choudhury, Sajal K. Das a, Md. Hafiz Ahamed a, S.M. Muyeen b, Md. Mehedi Hasan, Md. Firoj Ali, Zinat Tasneem, Md. Manirul Islam, Md. Robiul Islam, Md. Faisal R. Badal a, Sarafat H. Abhi, Subrata K. Sarker, Prangon Das, Towards electric digital twin grid: Technology and framework review. Energy and AI.
5. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering.
6. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт РФ. –

М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021
– Дата утверждения 16.09.2021.

7. Kazuo Muto, Yosuke Ueki, Nobuo Namura, Norio Takeda. Digital twin for load monitoring of wind turbine blade. Industrial AI blog.

8. Левин В.М. Диагностика и эксплуатация оборудования электрических сетей. НГТУ – 311 с.

9. Сайт Инженерный центр «Энергосервис». Синхронизированные векторные измерения [Электронный ресурс] режим доступа URL: <https://dzen.ru/a/X9yTbnIAeA3hCV36/>(дата обращения - 10.03.2023)

10. ГОСТ 8.567-2014 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения времени и частоты. Термины и определения» – 41 с.

11. Стандарт Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных Векторных измерений. Нормы и требования РАЗРАБОТАН: акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» / СТО 59012820.29.020.011-2016, Москва – 37 с

12. А.В. Дед. Расчет параметров Simulink модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов. Омский научный вестник №3 (153) 2017 г.

13. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 2012. – 592 с.

14. Методические указания по устройству энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России № 277 от 30.06.2003. – М. : НЦ ЭНАС, 2014.-10 с.

15. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций / Б.Н. Неклепаев. – 5-е изд., доп. – М. : Энергоатомиздат, 2013. – 608 с.

16. Савина, Н.В. Электрические сети в примерах и расчетах: учебное пособие./ Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.Н. Дудченко – Благовещенск : Издательство Амурск. гос. ун-т, 2012. – 238с.

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

18. . Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2012. – 964 с.
19. Houser E.A., Schwindt B.W. water quality systems for steam generating plants – Beckman Instruments, Inc., Fullerton, California, 1971.
20. РД 34.20.501-95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: СПО ОРГРЭС, 1996. — 288с.
21. Cycle chemistry guidelines for fossil plants: All volatile treatment. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1996.T1– 105041.
22. Cycle chemistry guidelines of fossil plants: Oxygenated treatment. Electric. Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1994.T1– 102285.
23. Cycle chemistry guidelines for fossil plants: Phosphate treatment for drum units. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1996.TR – 103665.
24. D.O. Clarkson, P.E. Wigglesworth, Cycle chemistry improvement program at PublicServicecompany of Colorado, IV conference EPR1, USA, p 223-232.
25. Безруков Н.С. Интегрированные системы проектирования и управления// Курс лекций
26. Безруков Н.С., Миринова К.В. Создание тренажера по обслуживанию магистральной теплосети с помощью OPC технологии и SCADA TeraceMode. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Материалы IV Всероссийск. науч.–тех. конф. с межд. участ. – Благо- вещенск: АмГУ, 2013. – С. 420-424.
27. Рыбалев А.Н. Программируемые логические контроллеры и аппаратура управления: лабораторный практикум часть 4.
28. Сайт Matlab.Exponenta[Электронный ресурс] режим доступаURL: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/>(дата обращения - 5.02.2023)
29. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников.- М. : Высшая школа, 2010. – 416 с.

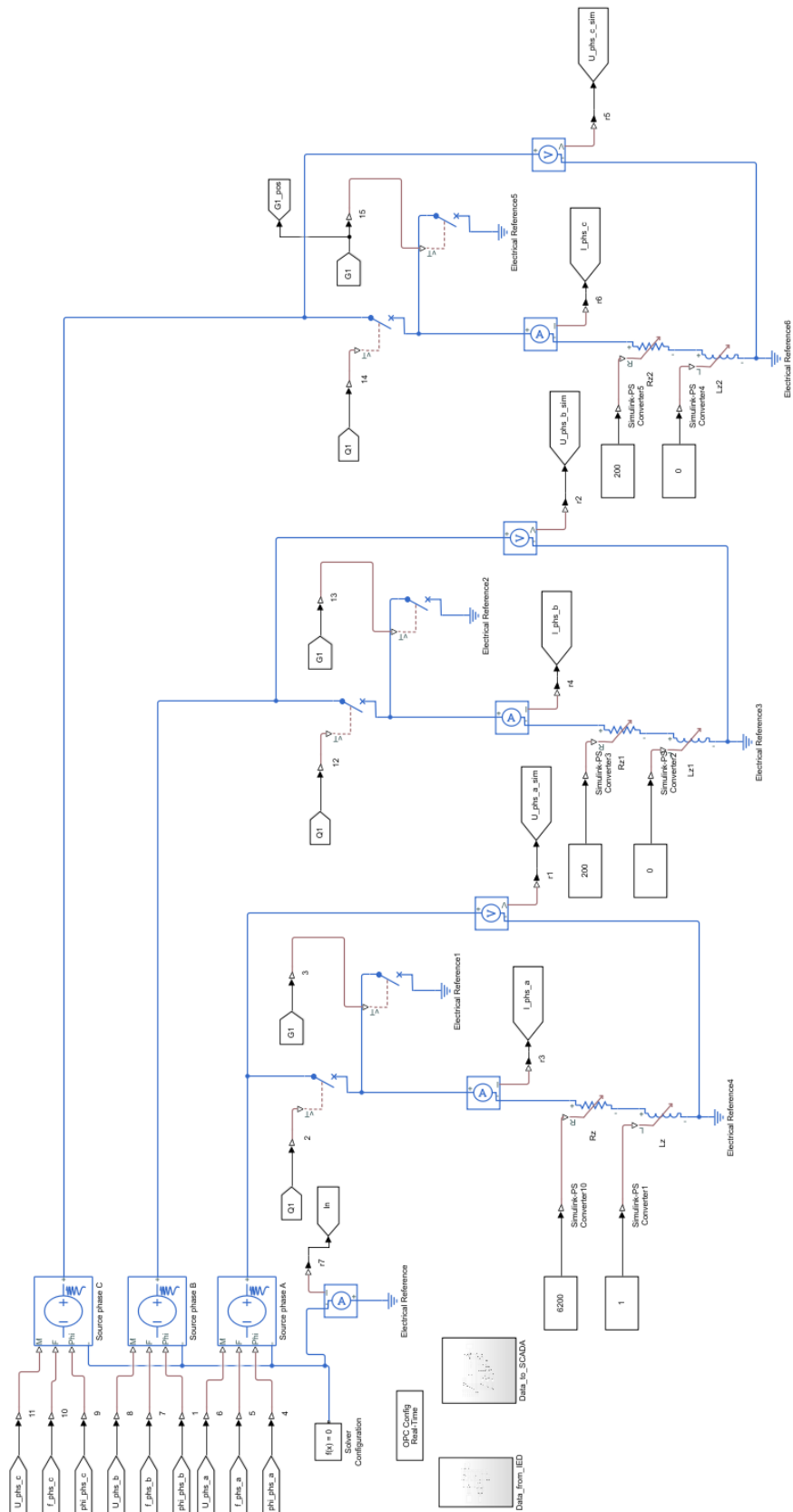
30. 2 Козлов, А.Н. Электромеханические переходные процессы в электрических системах. Учебно-методическое пособие к курсовому проектированию / А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.С. Степанов. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2013. – 112 с.
31. Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. Пособие / Ю.А. Куликов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, («Учебники НГТУ»), 2006. – 284 с.
32. Степанов, А.С. Электромеханические переходные процессы в электрических системах: Методические указания / А.С. Степанов.– Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2009.– 31 с.
33. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/ С.А. Ульянов. – М. : Энергия, 2009. – 520 с.
34. Шабад, В. К. Переходные процессы в системах электроснабжения. Часть II. Электромеханические переходные процессы / В. К. Шабад. – М. : ВЗПИ, 2008. – 64 с.
35. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 2012. – 592 с.
36. Методические указания по устройству энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России № 277 от 30.06.2003. – М. : НЦ ЭНАС, 2014.-10 с.
37. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций / Б.Н. Неклепаев. – 5-е изд., доп. – М. : Энергоатомиздат, 2013. – 608 с.
38. Савина, Н.В. Электрические сети в примерах и расчетах: учебное пособие./ Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.Н. Дудченко – Благовещенск : Издательство Амурск. гос. ун-та, 2012. – 238с.
39. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л.Файбисовича - 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с.
40. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2012. – 964 с.

41. Алексеев О.В., Китаев В.Е., Шихин А.Я. Электрические устройства/Под ред. А.Я.Шихина: Учебник. – М.: Энергоиздат, 200– 336 с.
42. Иванов-Цыганов А.И. Электротехнические устройства радиосистем: Учебник. - Изд. 3-е, перераб. и доп.-Мн: Высшая школа
43. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы. Справочник/ В.И. Галкин, А.Л. Булычев, В.А. Прохоренко - 2-е изд., перераб. И доп. - М.:Радио и связь, 1987. - 285 с.
44. Электрические сети и системы: Методические указания по курсовому проектированию для студентов специальности 10.04 всех форм обучения. - Норильск, 1991;
45. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1989;
46. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П.Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учебн. пособ. для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1989;
47. Пospelов Г.Е., Федин В.Т.Электрические системы и сети. Проектирование: Учеб. пособие для втузов Мн.: Выш. шк.,1988.
48. Основы Справочник по программированию, 03/2010, 6FC5398-1BP20-1PA0.
49. Исследовательский стенд для анализа алгоритмов управления сложными распределенными системами. Юров А.В., Серяков П.С. Томский политехнический университет, Институт кибернетики.
50. Николаенко С. А. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. Пособие / Николаенко С. А., Цокур Д. С., Харченко Д. П., Волошин А. П. — Краснодар: Изд-во ООО «КРОН», 2016. — 218с.
51. I. V. Kirilin and P. M. Kozlov, “The choice of reactive power control means in non-ferrous metallurgy power systems,” Industrial Energy, no. 8, pp. 46–52, 2010.
52. V. I. Panteleev and A. N. Filatov, Reactive power and voltage control at the industrial plants. Krasnoyarsk State Technical university, 2005.

53. V. I. Kotenev, V. V. Kochetkov, and D. A. Elkin, “The reactive power control of the power system load node at the voltage instability of the power supply,” Int. Siberian Conf. on Control and Communication, 2017.

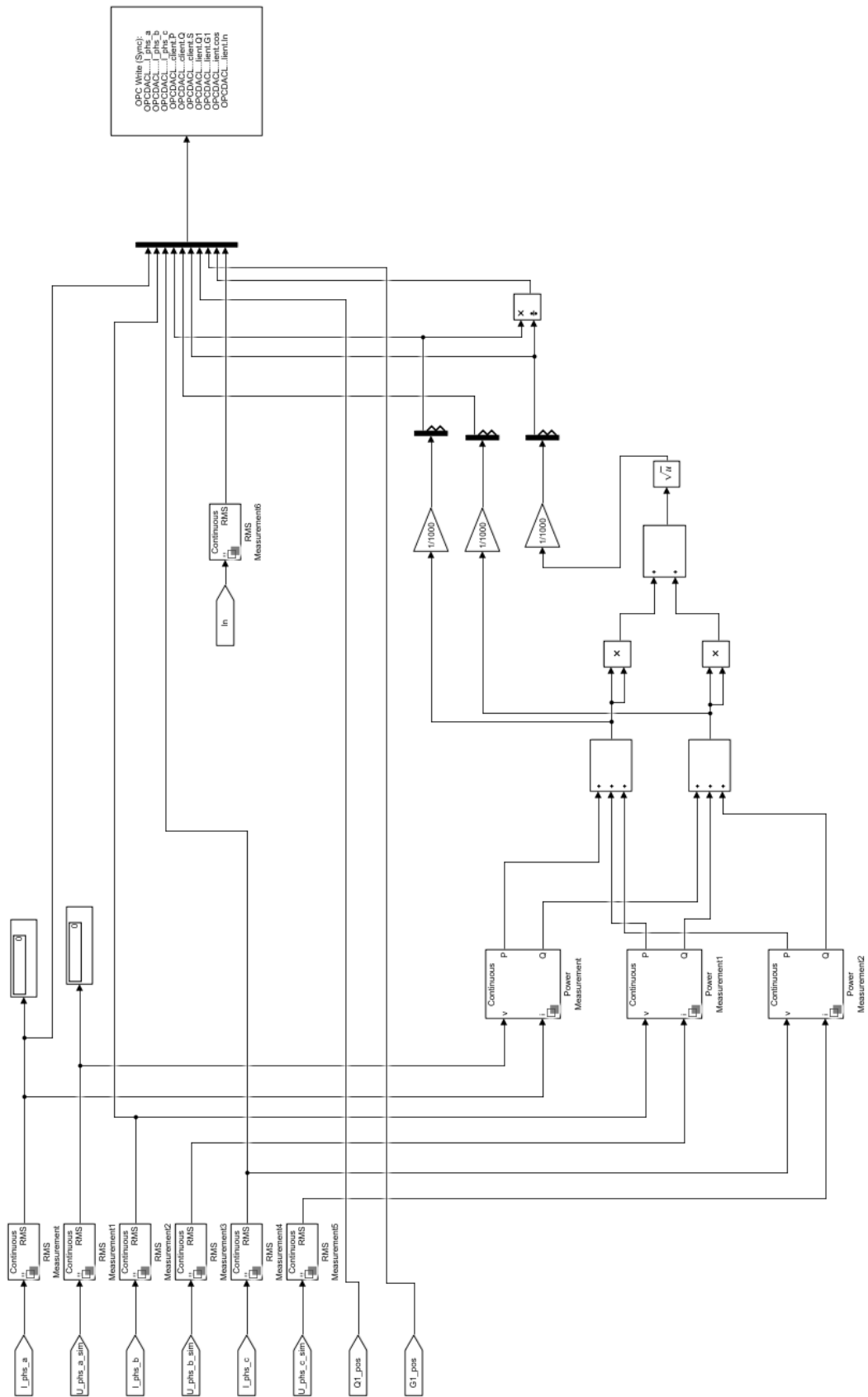
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Цифровая модель КРУ 10 кВ в Simulink



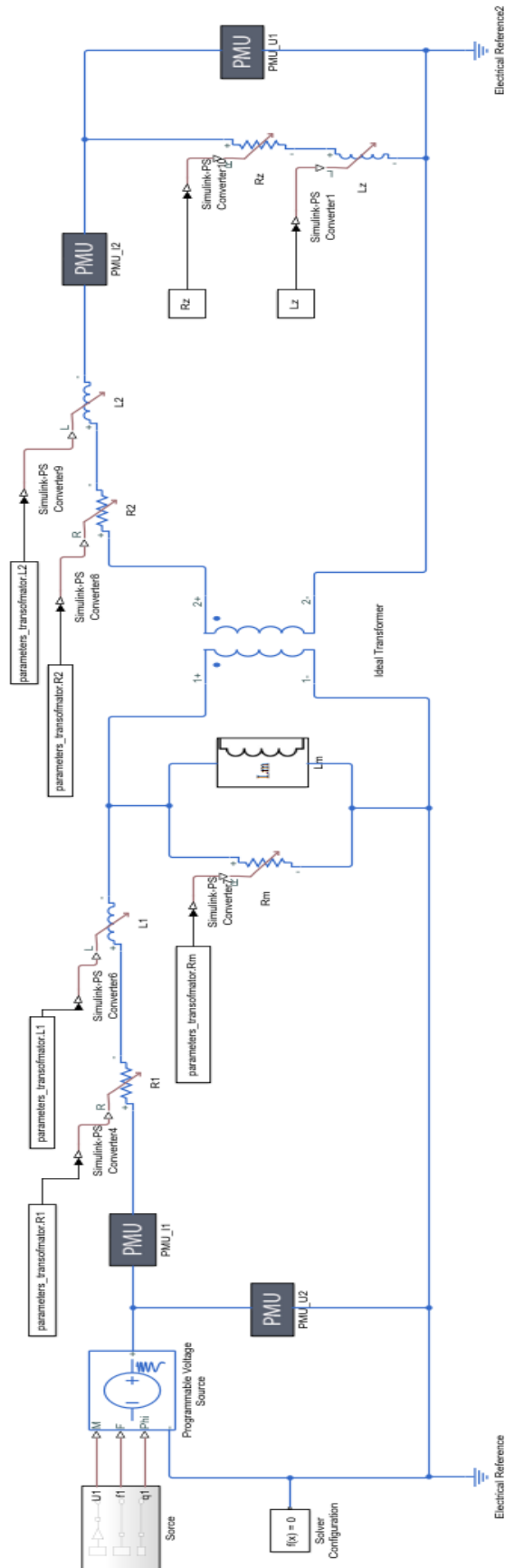
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Блок «Data_to_SCADA»



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Цифровая модель двухобмоточного трансформатора в Simulink



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинг программы расчета параметров схемы замещения трансформатора

```
%Мощность, В·А:
parameters_transformator.Sn=250;
%Частота сети, Гц:
parameters_transformator.f=50;
%Напряжение на первичной обмотке, В:
parameters_transformator.Unh=220;
%Напряжение на вторичной обмотке, В:
parameters_transformator.Unl=36;
%Ток номинальный в первичной обмотке, В:
parameters_transformator.In=parameters_transformator.Sn/parameters_transformator.Unh;
%Коэффициент трансформации:
parameters_transformator.K=parameters_transformator.Unh/parameters_transformator.Unl
%Напряжение холостого хода на первичной обмотке 220 В
%Ток холостого хода, А (Io):
parameters_transformator.Io=0.269;
%Мощность холостого хода, Вт (Po):
parameters_transformator.Po=11;
%Косинус угла холостого хода
parameters_transformator.cosfo=parameters_transformator.Po/(parameters_transformator.Unh*parameters_transformator.Io);
%Активное сопротивление ветви намагничивания, Ом (Rm):
parameters_transformator.Rm=(parameters_transformator.Unh/parameters_transformator.Io)/parameters_transformator.cosfo;
%Синус угла холостого хода
parameters_transformator.sinfo=sqrt(1-(parameters_transformator.cosfo^2));
%Индуктивность ветви намагничивания
parameters_transformator.Lm=(parameters_transformator.Unh/parameters_transformator.Io)/(parameters_transformator.sinfo*2*pi*parameters_transformator.f);
%Ток короткого замыкания на первичной обмотке Sn/Un1
%Напряжение короткого замыкания на первичной обмотке, В (Us):
parameters_transformator.Us=21.83;
%Мощность короткого замыкания на первичной обмотке, Вт (Ps):
parameters_transformator.Ps=24.4;
%Косинус угла при коротком замыкании
parameters_transformator.cosfs=parameters_transformator.Ps/(parameters_transformator.In*parameters_transformator.Us);
%Синус угла при коротком замыкании
parameters_transformator.sinfs=sqrt(1-(parameters_transformator.cosfs^2));
%Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора
parameters_transformator.R1=(parameters_transformator.Us/parameters_transformator.In)*parameters_transformator.cosfs*0.5;
%Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора
parameters_transformator.R2=parameters_transformator.R1/(parameters_transformator.K^2);
%Реактивные сопротивления первичной обмотки трансформатора
parameters_transformator.L1=((parameters_transformator.Us/parameters_transformator.In)*parameters_transformator.sinfs*0.5)/(2*pi*parameters_transformator.f);
%Реактивные сопротивления вторичной обмотки трансформатора
parameters_transformator.L2=parameters_transformator.L1/(parameters_transformator.K^2);
```