



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт информационных технологий
Кафедра математического обеспечения и стандартизации информационных технологий

РАБОТА ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ

Заведующий
кафедрой  С.А. Головин

« 30 » 05 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
по направлению подготовки бакалавров 09.03.04 Программная инженерия

На тему: Цифровой двойник системы охлаждения для цифровых подстанций

Обучающийся


подпись

Капустин Николай Ильич
Фамилия, имя, отчество

шифр 18И1213
группа ИКБО-06-18

Руководитель работы


подпись

к.т.н., доцент,
доцент

Жматов Д.В.

Консультант


подпись

к.ю.н., доцент,
доцент

Филаткина А.П.

Москва 2022 г.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт информационных технологий

Кафедра математического обеспечения и стандартизации информационных технологий

СОГЛАСОВАНО

Заведующий
кафедрой

подпись

Головин Сергей Анатольевич

«20» апреля 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор
института

подпись

Зуев Андрей Сергеевич

«20» апреля 2022 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Обучающийся

Капустин Николай Ильич

Фамилия Имя Отчество

Шифр

18И1213

Направление
подготовки

09.03.04

индекс направления

Программная инженерия

наименование направления

Группа

ИКБО-06-18





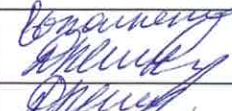
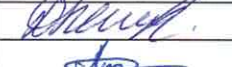
1. Тема выпускной квалификационной работы: Цифровой двойник системы
охлаждения для цифровых подстанций

2. Цель и задачи выпускной квалификационной работы

Цель работы: разработка цифрового двойника системы охлаждения для цифровых электроподстанций, объединенных в единую сеть по стандарту МЭК 61850

Задачи работы: описание предметной области, описание объекта исследования, разработка математической тепловой модели системы охлаждения, создание информационной модели цифрового двойника, расчет технико-экономических параметров, реализация графического интерфейса программного обеспечения, разработка руководства для оперативно-технического персонала

3. Этапы выпускной квалификационной работы

№ этапа	Содержание этапа выпускной квалификационной работы	Результат выполнения этапа ВКР	Срок выполнения
1	Исследовательский раздел	<div>Выполнено</div> <div></div>	27.04.2022
1.1	Обобщенная характеристика предметной области		
1.2	Характеристика объекта исследования		
1.3	Описание внешней среды функционирования объекта исследования		
1.4	Характеристика предмета исследования		
2	Аналитический раздел	<div>Выполнено</div> <div></div>	04.05.2022
2.1	Принцип работы системы охлаждения		
2.2	Информационная модель цифровой подстанции		
2.3	Техническое обеспечение		
3	Экономический раздел	<div></div>	11.05.2022
3.1	Организация и планирование работ по теме		
3.2	Расчет стоимости проведения работ по теме		
4	Технологический раздел	<div>Выполнено</div> <div></div>	17.05.2022
4.1	Обоснование выбора инструментальных средств разработки программного обеспечения		
4.2	Описание реализации программного обеспечения		
4.2.1	Выявление нагрева трансформатора с помощью математической модели		
4.2.2	Блок-схема работы системы охлаждения		
4.3	Техническое руководство		
5	Введение, заключение, список источников, приложения	<div>Выполнено</div> <div></div>	25.05.2022
6	Презентация	<div></div>	26.05.2022
7	Нормоконтроль	<div></div>	27.05.2022

4. Перечень разрабатываемых документов и графических материалов: электронная версии выпускной квалификационной работы бакалавра, презентационный материал с основными результатами выпускной квалификационной работы бакалавра – макеты экранных форм, информационная модель цифрового двойника, блок-схема работы системы охлаждения, графический материал по исследованию предметной области, экономическая часть, структурная схема системы контроля температуры трансформатора, листинг программы

5. Руководитель и консультанты выпускной квалификационной работы

Функциональные обязанности	Должность в Университете	Фамилия, имя, отчество	Подпись
Руководитель ВКР	к.т.н., доцент	Жматов Дмитрий Владимирович	
Консультант по экономическому разделу	к.ю.н., доцент	Филаткина Анна Павловна	

Задание выдал
Руководитель ВКР:

«20» апреля 2022 г.


подпись

Задание принял к исполнению
Обучающийся:

«20» апреля 2022 г.


подпись



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт информационных технологий
Кафедра математического обеспечения и стандартизации информационных технологий

РАБОТА ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ

Заведующий
кафедрой _____ С.А. Головин

« ____ » _____ 2022 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
по направлению подготовки бакалавров 09.03.04 Программная инженерия

На тему: Цифровой двойник системы охлаждения для цифровых подстанций

Обучающийся

_____ *подпись*

Капустин Николай Ильич

Фамилия, имя, отчество

шифр
группа

18И1213
ИКБО-06-18

**Руководитель
работы**

_____ *подпись*

*к.т.н., доцент,
доцент*

Жматов Д.В.

Консультант

_____ *подпись*

*к.ю.н., доцент,
доцент*

Филаткина А.П.

Москва 2022 г.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт информационных технологий

Кафедра математического обеспечения и стандартизации информационных технологий

СОГЛАСОВАНО

Заведующий
кафедрой _____
подпись

Головин Сергей Анатольевич

«20»

апреля

2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор
института _____
подпись

Зуев Андрей Сергеевич

«20»

апреля

2022 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Обучающийся	Капустин Николай Ильич <i>Фамилия Имя Отчество</i>
Шифр	18И1213
Направление подготовки	09.03.04 <i>индекс направления</i> Программная инженерия <i>наименование направления</i>
Группа	ИКБО-06-18

1. Тема выпускной квалификационной работы: Цифровой двойник системы
охлаждения для цифровых подстанций

2. Цель и задачи выпускной квалификационной работы

Цель работы: разработка цифрового двойника системы охлаждения для цифровых электроподстанций, объединенных в единую сеть по стандарту МЭК 61850

Задачи работы: описание предметной области, описание объекта исследования, разработка математической тепловой модели системы охлаждения, создание информационной модели цифрового двойника, расчет технико-экономических параметров, реализация графического интерфейса программного обеспечения, разработка руководства для оперативно-технического персонала

3. Этапы выпускной квалификационной работы

№ этапа	Содержание этапа выпускной квалификационной работы	Результат выполнения этапа ВКР	Срок выполнения
1	Исследовательский раздел		
1.1	Обобщенная характеристика предметной области		
1.2	Характеристика объекта исследования		
1.3	Описание внешней среды функционирования объекта исследования		27.04.2022
1.4	Характеристика предмета исследования		
2	Аналитический раздел		
2.1	Принцип работы системы охлаждения		
2.2	Информационная модель цифровой подстанции		04.05.2022
2.3	Техническое обеспечение		
3	Экономический раздел		
3.1	Организация и планирование работ по теме		11.05.2022
3.2	Расчет стоимости проведения работ по теме		
4	Технологический раздел		
4.1	Обоснование выбора инструментальных средств разработки программного обеспечения		
4.2	Описание реализации программного обеспечения		
4.2.1	Выявление нагрева трансформатора с помощью математической модели		17.05.2022
4.2.2	Блок-схема работы системы охлаждения		
4.3	Техническое руководство		
5	Введение, заключение, список источников, приложения		25.05.2022
6	Презентация		26.05.2022
7	Нормоконтроль		27.05.2022

4. Перечень разрабатываемых документов и графических материалов: электронная версия выпускной квалификационной работы бакалавра, презентационный материал с основными результатами выпускной квалификационной работы бакалавра – макеты экранных форм, информационная модель цифрового двойника, блок-схема работы системы охлаждения, графический материал по исследованию предметной области, экономическая часть, структурная схема системы контроля температуры трансформатора, листинг программы

5. Руководитель и консультанты выпускной квалификационной работы

Функциональные обязанности	Должность в Университете	Фамилия, имя, отчество	Подпись
Руководитель ВКР	к.т.н., доцент	Жматов Дмитрий Владимирович	
Консультант по экономическому разделу	к.ю.н., доцент	Филаткина Анна Павловна	

Задание выдал
Руководитель ВКР: _____

подпись

«20» апреля 2022 г.

Задание принял к исполнению
Обучающийся: _____

подпись

«20» апреля 2022 г.

АННОТАЦИЯ

Темой выпускной квалификационной работы является «Цифровой двойник системы охлаждения для цифровых подстанций».

Работа включает в себя 4 раздела, 74 страницы, 33 рисунков, 4 таблицы, 32 источника, 3 приложения.

В первом разделе представлено: обобщенная характеристика предметной области, характеристика объекта исследования, описание внешней среды функционирования объекта исследования, характеристика предмета исследования.

Во втором разделе представлено: принцип работы системы охлаждения, информационная модель цифровой подстанции, техническое обеспечение.

В третьем разделе представлено: организация и планирование работ по теме, расчет стоимости проведения работ по теме.

В четвертом разделе представлено: обоснование выбора инструментальных средств разработки программного обеспечения, описание реализации программного обеспечения, техническое руководство.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ	10
1.1.1. Понятие цифровых подстанций.....	10
1.1.2. Цели создания цифровых подстанций	11
1.1.3. Архитектура цифровых подстанций	13
1.1.4. Препятствия цифровизации	14
1.2 Характеристика объекта исследования	14
1.2.1 Воздушное охлаждение	15
1.2.2 Масляное охлаждение.....	15
1.3 Описание внешней среды функционирования объекта исследования ...	16
1.4 Характеристика предмета исследования.....	17
1.4.1 Определение цифрового двойника	17
1.4.2 Типы цифровых двойников.....	19
1.4.3 Задачи цифровых двойников	19
1.4.4 Применение цифровых двойников в электроэнергетике	20
1.4.5 Процесс создания цифрового двойника.....	22
2 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	25
2.1 Принцип работы системы охлаждения	25
2.2 Информационная модель цифровой подстанции.....	26
2.3 Техническое обеспечение	28
3 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	29
3.1 Организация и планирование работ по теме	29
3.2 Расчет стоимости проведения работ по теме.....	31
4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	35
4.1 Обоснование выбора инструментальных средств разработки программного обеспечения.....	35
4.1.1 Siemens PSS®SINCAL	35
4.1.2 «Модус».....	40
4.1.3 Среда разработки Delphi.....	44
4.2 Описание реализации программного обеспечения.....	45

4.2.1	Выявление нагрева трансформатора с помощью математической модели.....	46
4.2.2	Блок-схема работы системы охлаждения	47
4.2.3	Мнемосхема фрагмента подстанции.....	48
4.3	Техническое руководство	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		54
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....		55
ПРИЛОЖЕНИЯ.....		60
Приложение А. Фрагмент технического задания		61
Приложение Б. Листинг разработанной программы.....		65

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АРМ – Автоматизированное рабочее место

КПД – Коэффициент Полезного Действия

НИР – Научно-исследовательская работа

AR – Augmented Reality

VR – Virtual Reality

ТЗР – Транспортно-заготовительные расходы

ТЗ – Техническое задание

IT – Information Technology

МОСИТ – кафедра математического обеспечения и стандартизации
информационных технологий

ГОСТ – Межгосударственный стандарт

МЭК – Международная электротехническая комиссия

ВВЕДЕНИЕ

Не секрет, что в настоящее время в электроэнергетике высокий уровень износа основных производственных фондов, а темпы их обновления крайне недостаточны. Продление ресурса основного технологического оборудования осуществляется преимущественно за счет продления срока службы и использования систем прогнозирования.

Сбой в работе электросети достаточно распространенное явление, которое происходит во всем мире. Неполадка на электростанции способна лишить электричества не только отдельные дома и районы, но и целые города, что приносит весьма крупные убытки, помимо колоссальных неудобств. Это обусловлено различными факторами, начиная от невозможности отследить тот или иной параметр вовремя, заканчивая банально человеческим фактором, от которого ничто не застраховано. Смоделируем ситуацию: на подстанции имеется силовой трансформатор, который, в свою очередь, в ходе работы нагревается. Чтобы не было излишнего перегрева, он оборудован системой охлаждения, однако бывают ситуации, когда рабочая температура превышает необходимые нормы, что говорит о перегрузке трансформатора. В таком режиме трансформатор может проработать определенное количество времени, а затем подлежит отключению, чтобы остыть до рабочих температур. Данные отслеживаются диспетчером, который, в свою очередь сообщает сотруднику подстанции, когда надо отключать трансформатор. Отключение происходит аналогово, поэтому возможны ситуации, когда сотрудник не успел прийти, а то и хуже, когда при отключении происходит несчастный случай от удара током.

В таких ситуациях необходимо оптимизировать работу путем внедрения цифровизации. На сегодняшний день уже начали использовать, так называемые цифровые подстанции, которые позволяют отслеживать и контролировать показатели удаленно, что сводит риск сбоев к минимуму.

Технология цифровых двойников же позволяет смоделировать различные ситуации, а также поведение объекта, что позволяет заранее если не избежать,

то снизить риски, а также уменьшить затраты на проектирование, эксплуатацию и ремонт оборудования.

На сегодняшний день цифровые подстанции эксплуатируются во многих странах мира, таких как Корея, Индия, Китай, Россия, Тайвань, Германия, Колумбия, Италия, Объединенные Арабские Эмираты и Соединенные Штаты Америки. К сожалению, Россия на данный момент уступает в темпах развития и интеграции данной технологии, из-за чего вырисовывается актуальность данной работы.

Объектом исследования является система охлаждения трансформатора для цифровой подстанции.

Предметом исследования является цифровой двойник системы охлаждения для цифровой подстанции.

1 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1 Обобщенная характеристика предметной области

В современном мире тенденция перехода на цифровые технологии активно проявляется во всех жизненных процессах человека. В преддверии Четвертой промышленной революции переход на цифровизацию рабочих процессов затронул и электроэнергетическую отрасль. Начинают применяться цифровые устройства управления, мониторинга, защиты и автоматики. Происходит существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления. Появились новые международные стандарты, направленные на решение задач автоматизации и управления энергообъектами. Все это вкуче открывает возможности для создания цифровых подстанций.

Цифровая передача информации и сигналов на всех уровнях управления подстанцией позволяет создать технологическую инфраструктуру для внедрения информационно-аналитических систем, повышает точность учета электроэнергии, уменьшает затраты на обслуживание подстанции, а также снижает количество несчастных случаев на производстве. Внедрение систем, удовлетворяющих стандарту МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях», обеспечивает более высокую скорость и безопасность передачи информации, взаимозаменяемость отдельных компонентов системы, повышение надежности системы.

1.1.1. Понятие цифровых подстанций

Цифровая подстанция — это подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой практически все процессы информационного обмена между ее элементами, а также управление работой подстанции осуществляются в цифровом виде на основе стандартов серии МЭК 61850 [1]. Внедрение цифровых подстанций позволяет получить целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными подстанциями.

К ним относятся:

- Для выполнения различных функций используются одни и те же источники информации, вследствие чего характерно уменьшение количества оборудования на подстанции.
- Сложная система контрольных кабелей заменяется на современные коммутационные сети, состоящие из оптоволоконных кабелей, что значительно сокращает количество кабеля в целом.
- Повышение точности измерений.
- Повышение надежности передачи данных.
- Возможность дальнейшего увеличения уровня автоматизации и управляемости.

1.1.2. Цели создания цифровых подстанций

Внедрение цифровизации и автоматизации на стандартные подстанции – переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления обладает определенными целями [2]:

- 1) Повышение безопасности.
 - а) Отказ от электрических соединений между высоковольтным оборудованием и панелями релейной защиты и управления снижает количество летальных исходов, возникающих при работе.
 - б) Автоматизация контроля показателей подстанции обеспечивает ее работу в своих безопасных пределах.
- 2) Повышение надежности и доступности.

Возможность самодиагностики цифровых устройств гарантирует максимальную доступность подстанции, а также полный набор функций: любое снижение производительности определяется в реальном времени. Внутренняя избыточность, встроенная в систему, может применяться для самозавершения неправильной работы, что позволяет устранять неполадки без необходимости первичного сбоя системы.

3) Модернизация и расширение существующих подстанций.

Замена деталей и компонентов на новые и обновленные, а также использование оптического волокна вместо медной проводки уменьшают затраты и время простоя оборудования, связанного с поломками, что увеличивает надежность и продлевает срок эксплуатации оборудования, в свою очередь, относится и к работам по расширению.

4) Оптимизация инвестиций.

Создание или интеграция цифровых подстанций позволяет снизить затраты по следующим направлениям:

- а) проектирование и монтаж подстанций занимает гораздо меньше времени;
- б) сниженные потребности в занимаемой площади;
- в) сокращение использования медных кабелей примерно на 80% путем замены их на кабели из оптического волокна;
- г) операционные расходы снижаются благодаря инструментам оптимизации активов, ускоряющие выявление слабых зон, которые необходимо усилить.

5) Оптимизированная работа активов.

На основе проектных оценок автоматизация цифровой подстанции позволяет проводить наблюдение за параметрами оборудования, где анализ динамической нагрузки показывает, что все оборудование способно работать ближе к своим границам.

6) Снижение затрат на техническое обслуживание.

Цифровая подстанция тщательно контролирует всё оборудование подстанции с точки зрения условий эксплуатации и показателей состояния активов. Интеллектуальные системы подстанции, анализируя данные, способны давать рекомендации по проведению технического обслуживания и ремонта, что позволяет избегать непредвиденных сбоев и затрат на экстренный ремонт.

7) Улучшенные возможности связи.

Для обмена данными между интеллектуальными устройствами, внутри и между подсистемами используется Ethernet-связь. Интеллектуальные локальные и широкополосные блоки управления позволяют осуществлять обмен данными между уровнями напряжения внутри подстанций и между подстанциями. Прямая связь между подстанциями без необходимости транзита через центр управления уменьшает время отклика, позволяя быстрые приложения в режиме реального времени.

8) Стандартизация и совместимость.

Так как цифровые подстанции разрабатываются по МЭК 61850, данные цифровые решения разработаны с возможностью совместимости с оборудованием разных поставщиков с высокой степенью стандартизации на уровне интерфейса систем вторичного оборудования.

1.1.3. Архитектура цифровых подстанций

Стандарт МЭК 61850 подразделяет работу подстанции на три отдельных уровня и два канала связи [3]:

- Технологический уровень (Уровень процесса). Данный уровень включает в себя такие устройства, как автоматы защиты цепи и оборудование для сбора данных, используемое для измерения тока, напряжения и других параметров в различных частях подстанции. Эти измерения проводятся в режиме реального времени в пределах самой подстанции.

- Уровень ячейки. Данный уровень состоит из интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ), которые считывают измерения на технологическом уровне. Эти устройства могут принимать локальные решения управления, передавать данные на другие ИЭУ или отправлять данные в SCADA-систему подстанции для дальнейшей обработки и мониторинга. Имеет два подразделения: контроль и защита отсека, между которыми проходит GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) трафик, необходимый для обновления информации о состоянии и направлении управляющих запросов.

- Шина процесса обрабатывает сообщения между уровнем процесса и уровнем ячейки, путем передачи данных SMV протоколом, позволяющим передавать данные измерительных систем о значении тока и напряжения.
- Общестанционный уровень. Данный уровень включает в себя SCADA-серверы и операторские панели, а также людей-операторов (при необходимости), которые проводят мониторинг статуса.
- Шина станции занимается обработкой обмена данными между уровнем ячейки и общестанционным уровнем при помощи MMS (Manufacturing Message Specification) протокола.

1.1.4. Препятствия цифровизации

Хоть и имеется целый ряд технологических достижений и преимуществ, также существуют некоторые препятствия, которые тормозят внедрение цифровых технологий, которые необходимо преодолеть. В качестве примеров следует привести следующие моменты:

- Цифровая трансформация является революционной перестройкой методов работы организации, однако не каждая компания способна пойти на отказ от внесения изменений в устаревшие системы ради внедрения новых технологий.
- Дефицит квалифицированных специалистов с необходимым набором навыков, без которых цифровая трансформация не будет эффективной.
- Проблема кибербезопасности, так как все больше и больше информации перемещается в облако, а компании все больше полагаются на новые технологии, поэтому они должны быть способны защитить свои данные.

1.2 Характеристика объекта исследования

Электрическая подстанция предназначена для приема, преобразования и распределения электрической энергии, которая состоит из трансформаторов, устройств управления, а также распределительных и вспомогательных устройств. Современные трансформаторы имеют высокий КПД, равный 97-

98%. Однако, часть мощности теряется из-за сопротивления материала, которые тратятся на нагревание. Чтобы система работала исправно, необходима система охлаждения.

Существует два типа охлаждения: масляное и воздушное [4].

1.2.1 Воздушное охлаждение

При воздушном охлаждении тепло работающего трансформатора направляется в окружающую среду. Существует два вида такого охлаждения: естественное, когда нагретый воздух движется от трансформатора естественным путем, и с дутьем, когда нагретый воздух принудительно отводится вентилятором.

Такая система не дает интенсивного охлаждения, поэтому применяется для трансформаторов мощностью не более 1600 кВ*А с номинальным напряжением 15 кВ (сухих трансформаторов).

1.2.2 Масляное охлаждение

В свою очередь, масляное охлаждение бывает естественным, естественным с дутьем, принудительным, принудительным с дутьем, а также масляно-водяное.

– Естественное масляное охлаждение

Обмотки в таком трансформаторе погружены в масляный бак. Все тепло от магнитопровода и обмоток передается маслу. Оно течет по баку и радиаторным трубам и отдает тепло в окружающий воздух.

Чтобы трансформатор охлаждался интенсивнее, производители делают стенки бака гофрированными, добавляют в конструкцию трубы или радиаторы. Системой естественного масляного охлаждения комплектуются трансформаторы мощностью до 16000 кВ*А.

– Естественное масляное охлаждение с дутьем

При таком типе охлаждения на охладители и радиаторы трансформатора устанавливают вентилятор. Он забирает холодный воздух снизу и обдувает им

нагретую часть трансформатора. При этом многие модели снабжены датчиком автоматического отключения дутья, когда нагрузка на трансформатор небольшая. Это тип дает достаточно интенсивное охлаждение, поэтому применяется для оборудования мощностью до 80000 кВ*А.

– Принудительное охлаждение с дутьем

Система представляет собой охладитель, а именно тонкие трубки, в которые масло загоняет специальный насос. Снаружи на трубки дует вентилятор. Такая система монтируется либо на одном фундаменте с трансформатором, либо на отдельном, который располагается рядом с баком трансформатора.

– Принудительное масляно-водяное охлаждение

Масляно-водяное охлаждение имеет то же устройство, что и принудительное масляное с дутьем. Но охладитель состоит из трубок с водой, а между ними движется масло. Вода и масло в системе охладителя не смешиваются благодаря разнице в давлении – давление масла должно быть минимум на 0,02 Мпа больше.

1.3 Описание внешней среды функционирования объекта исследования

Внешней средой функционирования для системы охлаждения трансформатора является температура окружающего воздуха, а также климатическое исполнение по ГОСТ 15150 [5] и ГОСТ 15543.1 [6]. Также важными условиями, необходимыми для работы, являются: высота над уровнем моря, степень загрязнения окружающей среды и сейсмическая активность. Согласно стандарту ГОСТ 30830-2002, нормальными условиями работы является: среднесуточная температура не выше 30 °С, среднегодовая не выше 20 °С, высота над уровнем море не больше 1000 метров, а для трансформаторов класса напряжения 1150 кВ – не более 500 метров, степень загрязнения, которая не требует применения специальных мер защиты, а также отсутствие

специальных требований по сейсмостойкости. Другие показатели означают, что трансформатор необходимо проектировать для особых условий работы [7].

1.4 Характеристика предмета исследования

1.4.1 Определение цифрового двойника

Основные положения концепции цифровых двойников были сформированы и представлены в начале 2000-ых годов, однако данная технология не получила широкого распространения в те времена в виду своей высокой сложности и стоимости. Ситуация начала меняться в 2010-ых годах из-за развития этапов проектирования, стремительного развития технологий компьютерного и суперкомпьютерного инжиниринга, компьютерных технологий оптимизации, технологий разработки новых материалов, технологий аддитивного производства, интернета вещей / промышленного интернета, машинного обучения, больших данных и облачных вычислений, а также искусственного интеллекта цифровые двойники стали претендовать на одну из ключевых ролей в четвертой промышленной революции.

Существует множество определений цифровых двойников: где-то определяется как процесс, где-то понимается как отдельная технология или результат использования технологии. Также термин «цифровой двойник» в последние несколько лет можно встретить не только в области промышленного производства, но и в моделировании природных объектов или, например, организации. Однако, несмотря на обильное количество определений, можно выделить одно обобщенное: цифровой двойник — это виртуальное воплощение реально существующих физических объектов или целых систем, моделирующее внутренние процессы, технические характеристики, а также поведение реального объекта при различных условиях.

Цифровые двойники представляют собой достаточно сложный продукт, состоящий из различного набора технологий и данных, а также интеллектуальных систем. Они могут использоваться на всех этапах

жизненного цикла продукта или системы, начиная с проектирования и заканчивая выходом из эксплуатации, например, когда продукт выходит на стадию эксплуатации, с помощью датчиков можно собирать параметры его работы и использовать их для улучшения цифровой модели. Цифровой двойник на базе высокоадекватной математической модели можно применять для диагностики проблем с реальным объектом и прогнозировать оптимальные циклы его профилактического обслуживания.

Полноценная концепция была предложена в 2002 году Майклом Гривсом в контексте управления жизненным циклом (Product Lifecycle Management, PLM) в Мичиганском университете. В 2003 году данная концепция была включена в курс по управлению жизненным циклом продукта (PLM), который Гривс там же и читал. В основе концепции лежит предпосылка, что для каждой системы можно создать представление в виде двух систем – физической и виртуальной, включающей всю информацию о физической системе, при этом виртуальная система «отображает» реальную, и наоборот.

Сам термин «цифровой двойник» Майкл Гривс первый раз использовал в книге «Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management» 2011 года [8]. Схематическая концепция цифрового двойника представлена на рисунке 1.1:

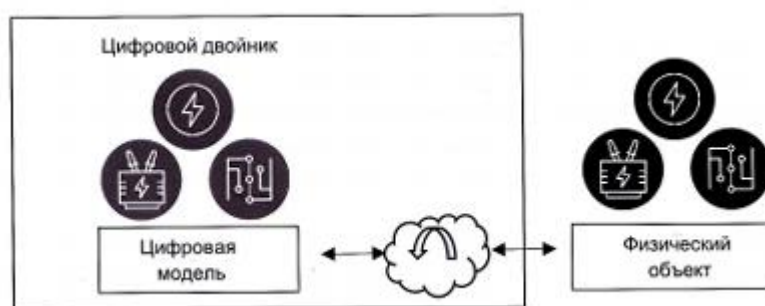


Рисунок 1.1 – Базовая концепция цифрового двойника

В физические объекты встраиваются датчики, которые в реальном времени собирают данные о состоянии этого объекта, затем собранные данные отправляются цифровому двойнику этого объекта. По полученным данным уточняется цифровая модель, где учитываются все изменения, происходящие с физическим объектом, которая накапливает информацию о его поведении. По

мере уточнения этой информации цифровая модель может более адекватно описывать и прогнозировать возможное поведение физического объекта.

1.4.2 Типы цифровых двойников

На сегодняшний день существуют три типа цифровых двойников, а именно: двойник-прототип, двойник-экземпляр и агрегированный двойник [9].

Двойник-прототип (Digital Twin Prototype) – это виртуальное представление какого-либо физического элемента, в котором содержится информация, описывающая этот элемент на всех стадиях – начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации этого элемента.

Двойник-экземпляр (Digital twin Instance) описывает конкретный физический продукт, с которым цифровой двойник будет связан на протяжении всего срока службы этого продукта. Включает в себя информацию по описанию продукта, сведения о материалах, комплектующих, а также информацию от системы мониторинга продукта.

Агрегированный двойник (Digital Twin Aggregate) представляет собой объединение двойника-прототипа и двойника-экземпляра. Составляет всю доступную информацию о системе или продукте, к примеру, мониторит показания датчиков и сопоставляет эти показания с теми, что были зафиксированы при сбое.

1.4.3 Задачи цифровых двойников

Основные задачи, которые позволяют решить цифровые двойники, следующие:

- 1) Сокращение времени и затрат на производство физического продукта: возможность рассмотрения большего количества конструктивных вариантов.

- 2) Повышение надежности и увеличение ресурса продукта за счет своевременного проведения технического обслуживания по состоянию, а не по наработке.
- 3) Снижение количества натурных испытаний путем замены их на виртуальные.
- 4) Снижение рисков, связанных с безопасностью для жизни и здоровья персонала, а также рисков, связанных с финансовыми аспектами.
- 5) Получение необходимых характеристик продукта или производства с первого предъявления за счет максимального точного описания процессов.
- 6) Построение прогнозов и планирование развития продукта или компании в будущем.

Технология цифровых двойников позволяет определить оптимальную архитектуру, обеспечить контроль качества проектных решений, проводить анализ совместной работы систем и подсистем в различных условиях и эффективно интегрировать системы в составе продукта или компаний. Данная технология может использоваться на всех этапах жизненного цикла объекта.

1.4.4 Применение цифровых двойников в электроэнергетике

Технология цифровых двойников является популярной и актуальной темой в отрасли электроэнергетики, к примеру, в обычной компании существует только одна физическая сеть, имеющая десятки представлений в различных подразделениях, где каждое представление направлено на различные задачи, решаемые разным программным обеспечением [10]. Это может повлечь за собой неточности в представлении сети, неоптимальной производительности, а также чрезмерному ручному труду.

Из этого следует выделить основные преимущества цифрового двойника:

- Повышение согласованности и точности модели для проведения расчетов и эксплуатации: снижение вероятности серьезных ошибок из-за некорректных данных в модели, возможность взаимодействия с ключевыми

источниками данных и функциями, а также отслеживание изменений в модели с возможностью воссоздания случаев после изменений.

- Повышение эффективности и оптимизация процессов в планировании и эксплуатации: устранение дублирующих процессов, автоматизация процессов, сокращение сроков технологического присоединения к электрической сети и унифицированный процесс моделирования и управления данными для различных функций.

- Обеспечение более простой интеграции подсистем и увеличение общей цифровизации компании: более эффективное использование ресурсов сети, избежание или отсрочка необходимости усиления сети, моделирование в режиме реального времени, к примеру, предотвращение отключения электроэнергии посредством динамической оценки и оценки безопасности защиты.

Существует два типа компаний-операторов, которые занимаются эксплуатацией электрических сетей [11]:

- Операторы магистральных сетей.
- Операторы распределительных сетей.

Хоть специфика компаний и отличается друг от друга, но все же функции схожие, а именно передача электроэнергии и техническое обслуживание активов. Для магистральных сетей цифровым двойником может выступать база данных, где модель сети хранится в формате CIM (Common Information Model) – открытом стандарте, определяющем представление управляемых элементов ИТ среды в виде совокупности объектов и их отношений. Для распределительных же – база данных на основе расчетного программного обеспечения для электрических сетей и ГИС-системы (Геоинформационные системы) – системы сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных.

Данное отличие обусловлено тем, что в распределительных сетях гораздо больше элементов, из-за чего возрастает частота изменений, что создает, в свою очередь, огромные массивы данных, вследствие чего их трудно обрабатывать.

В интеллектуальных энергетических комплексах используются датчики, счетчики, сенсоры и аналитические инструменты. Данные о работе подстанции или электросети собираются и обрабатываются в реальном времени, что, в свою очередь, помогает следить за состоянием оборудования. Таким образом, компании, работающие в сфере электроэнергетики, могут полностью контролировать процессы производства и распределения энергии на всех этапах.

1.4.5 Процесс создания цифрового двойника

Цифровые двойники создаются разными способами:

- графические 3D-модели;
- модели на базе интернета вещей;
- интегрированные математические модели — такие как CAE-системы (Computer-aided engineering, решения для инженерного анализа, расчетов и симуляций) для инженерных расчетов;
- различные технологии визуализации, в том числе голограммы, AR и VR.

Для реализации цифрового двойника требуются данные об объекте или процессе, чтобы можно было создать виртуальную модель, которая будет представлять поведение и/или состояние этого объекта или процесса. Эти данные относятся к жизненному циклу продукта, включающие в себя проектные спецификации, производственные процессы или техническую информацию. Также возможно наличие производственной информации, в том числе об оборудовании, материалах, деталях, методах и контроле качества. В то же время, данные могут быть связаны с работой, к примеру, обратная связь в режиме реального времени и записи о техническом обслуживании. Имеются и другие данные, необходимые для проектирования цифрового двойника, к которым относятся бизнес-данные или процедуры окончания срока службы.

После сбора данных идет их использование для создания вычислительных аналитических моделей, для построения которых используются математические методы вычисления и анализа, а именно:

- Метод конечных элементов (FEA, Finite Element Analysis), позволяющий рассчитать эксплуатационную нагрузку, который применяется для расчета механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики, к примеру.

- FMEA (Failure Mode and Effects Analysis, анализ видов и последствий отказов) необходим для анализа надежности систем и выявления наиболее критических шагов производственных процессов.

- CAD (Computer-Aided Design/Drafting, средства автоматизированного проектирования) используется, чтобы рассчитать внешние характеристики и структуру объектов, материалов и процессов.

Для наглядности и лучшего понимания модель можно отображать с помощью 3D-представлений и моделирования дополненной реальности или графического интерфейса.

Следующим этапом является тестирование основных процессов работы, где цифровой двойник подвергают различным ситуациям, в которых прогнозируется поведение объекта или системы, чтобы предугадать, а лучше избежать возникновения критических ситуаций, которые могут привести к неполадкам.

Далее ведется работа с цифровым двойником как с реальным физическим объектом пока не будут отлажены все системы и процессы. По результатам проведенной работы в реальный физический объект вносят изменения и улучшения, чтобы добиться максимальной эффективности.

Резюмируя данный раздел, следует отметить, что цифровизация электросетей, а именно создание цифровых подстанций, является важной составляющей, необходимой для качественной и безопасной работы энергосистемы, важнейшим аспектом которой является система охлаждения. В целях снижения эксплуатационных расходов, а также повышения безопасности

в ходе проведения испытаний, необходимо воспользоваться технологией цифровых двойников.

В данном разделе были затронуты цифровые подстанции, цели их создания, а также их преимущества и препятствия использования в энергетике, рассмотрены системы охлаждения подстанций, которые применяются на трансформаторах на сегодняшний момент, а также понятия цифровых двойников, их разновидности и процесс их создания.

2 АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

2.1 Принцип работы системы охлаждения

Для корректной работы трансформатора необходимы температуры, не превышающие нужных значений. Для этих целей используются системы охлаждения. Сама система состоит из контроллера температуры, датчиков и системы вентилирования, а в случае с масляными трансформаторами, еще предусмотрено наличие масла. Системы охлаждения трансформаторов разделяются на два типа: воздушное и масляное. Для реализации цифрового двойника было выбрано масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла, поэтому уместно рассматривать принцип работы только такого способа охлаждения.

При такой системе вентиляторы обдува устанавливаются в навесные радиаторы. В радиаторах же циркулирует трансформаторное масло, которое охлаждает трансформатор. Схематичное изображение системы охлаждения можно наблюдать на рисунке 2.1 [12]:

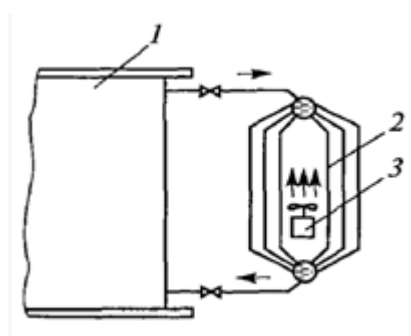


Рисунок 2.1 – Система охлаждения с дутьем и естественной циркуляцией масла

На рисунке 2.1 можно наблюдать бак трансформатора – 1, радиаторы охладителя – 2 и вентилятор обдува - 3.

Обдув трансформатора включается при достижении температуры верхнего слоя трансформаторного масла при температуре 55 °С и выше, либо при достижении номинальной нагрузки самого трансформатора, независимо от температуры масла. Отключается же обдув при понижении температуры масла до 50 °С [13], но при этом ток нагрузки должен быть менее номинального.

Также, максимальная температура масла в верхних, наиболее нагретых слоях не должна превышать 95 °С при номинальной нагрузке трансформатора.

2.2 Информационная модель цифровой подстанции

Согласно группе стандартов МЭК 61850, информационную модель цифровой подстанции можно представить тремя уровнями, а именно: уровень процесса, уровень присоединения и уровень станции [14]. Для каждого уровня предусмотрена своя функция, равным образом управляемая соответствующим типом устройства: для уровня станции это АРМ, для уровня присоединения это устройства мониторинга и реагирования, а для уровня процесса – измерительные устройства. Связи между уровнями, а также между несколькими цифровыми подстанциями можно наблюдать на рисунке 2.2:

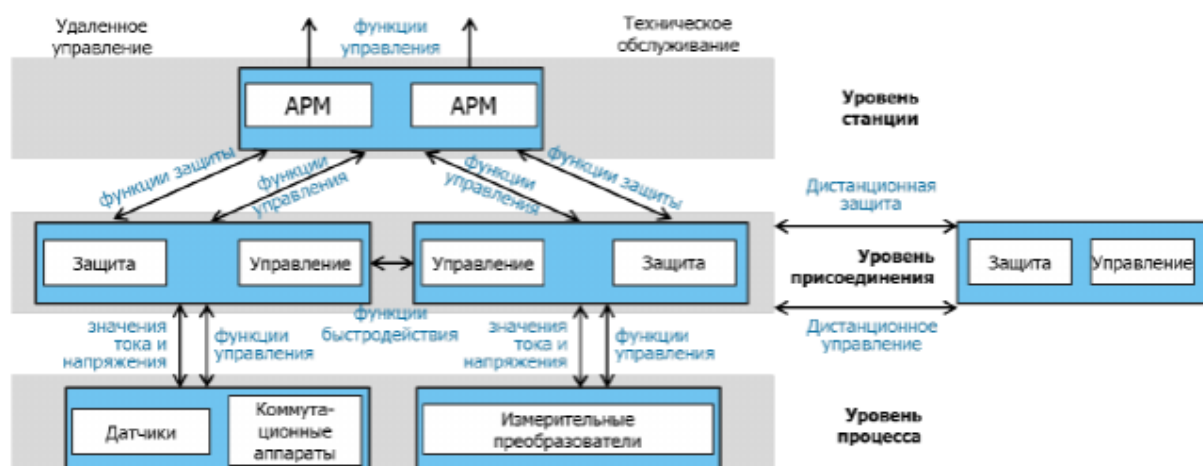


Рисунок 2.2 – Информационная модель цифровой подстанции [15]

Данные с датчиков сбора информации, которые расположены на уровне процесса, содержащие значения тока и напряжения, передаются на устройства мониторинга на уровне присоединения, где в ходе проверки, к примеру, обнаружались ошибки. После чего подается сигнал на устройства защиты и автоматики, а затем при помощи функции защиты данные об ошибке передаются на уровень станции. Далее, при помощи функции управления, АРМ передает сообщение на уровень присоединения и впоследствии на уровень процесса, которое содержит команду отключения.

На основе информационной модели цифровой подстанции (рисунок 2.2) была сделана структурная схема аппаратного комплекса, показывающая устройство системы контроля температуры трансформатора для цифровой подстанции [16], которую можно увидеть на рисунке 2.3:

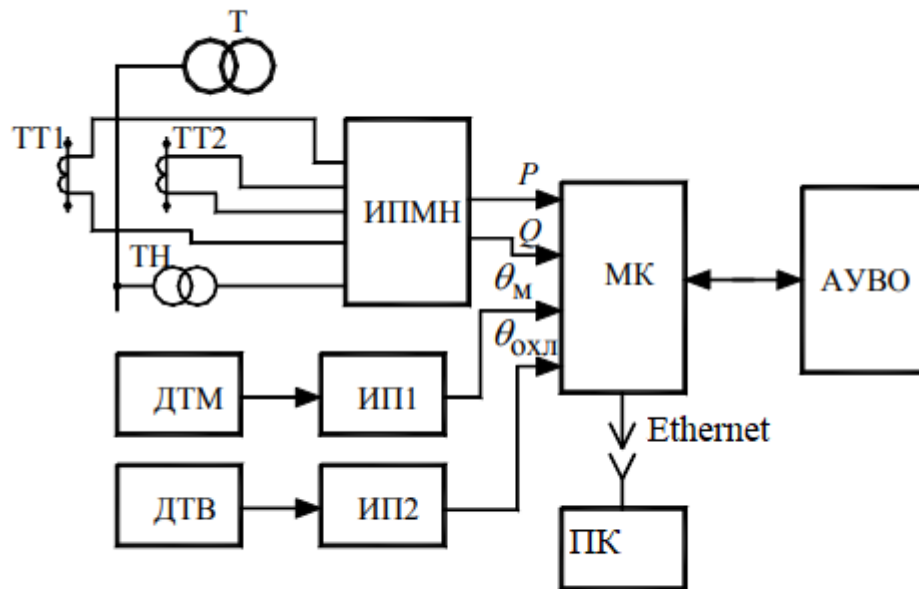


Рисунок 2.3 – Структурная схема аппаратного комплекса

Микропроцессорный контроллер МК выступает в качестве основного узла, который собирает данные, а также выполняет функцию автоматики управления вентиляторами охлаждения АУВО. Обычно, включает четыре аналоговых входа и дуплексную связь с ПК по интерфейсу Ethernet.

Мощность нагрузки силового трансформатора Т измеряется при помощи измерительных трансформаторов тока ТТ1 и ТТ2, измерительного трансформатора напряжения ТН и измерительного преобразователя мощности нагрузки ИПМН, отправляющие сигналы на аналоговые входы микроконтроллера: активной мощности нагрузки $P(t)$ и реактивной мощности $Q(t)$.

Температуры верхних слоев масла $\theta_M(t)$ и воздуха $\theta_{Oxl}(t)$ измеряются при помощи датчиков температуры масла ДТМ и воздуха ДТВ соответственно, после чего измеренные значения преобразуются в измерительных

преобразователях ИП1 и ИП2, которые перенаправляют сигналы на микроконтроллер.

Все измеренные величины передаются с контроллера на ПК, где анализируются. По данной схеме и будет разрабатываться цифровой двойник.

2.3 Техническое обеспечение

Для корректной работы программного продукта необходимо иметь:

- Процессор Intel Pentium 233 МГц и выше.
- Операционную систему Microsoft Windows XP и выше (в случае с Windows 10 и более поздних версий рекомендуется включить режим совместимости с Windows 8).
- Оперативную память от 128 Мбайт.
- Пространства на жестком диске не менее 540 Мбайт.

Основные требования, применяемые к техническому обеспечению разрабатываемого программного продукта, представлены в техническом задании, с которым можно ознакомиться в Приложении А.

Выводы к разделу: для реализации цифрового двойника было выбрано масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла, описан принцип работы такой системы охлаждения, представлена информационная модель цифровых подстанций, по которой разработана структурная схема аппаратного комплекса, показывающая устройство системы контроля температуры трансформатора для цифровой подстанции.

3 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

3.1 Организация и планирование работ по теме

В составе работы задействовано 3 человека:

- 1) руководитель (руководитель выпускной квалификационной работы Жматов Д.В., к.т.н, доцент, МОСИТ) – отвечает за грамотную постановку задачи, контролирует отдельные этапы работы, вносит необходимые коррективы и оценивает выполненную работу в целом;
- 2) консультант (консультант по экономической части ВКР доцент к.ю.н., Филаткина А.П.) – отвечает за консультирование экономической части выпускной квалификационной работы;
- 3) разработчик (Студент 4-го курса, Капустин Н.И., ИКБО-06-18) – реализация всех поставленных задач, в том числе проведение тестирования готового продукта и подготовка проектной документации.

Состав задействованных в работе участников представлен на рисунке 3.1:

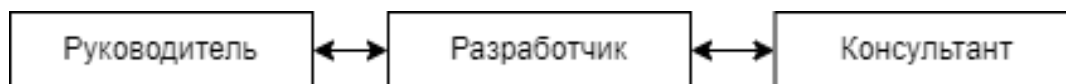


Рисунок 3.1 – Схема задействованных участников

На разработку отводится 90 рабочих дней.

Этапы разработки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Этапы разработки

№	Название этапа	Исполнитель	Трудоемкость, чел/дни	Продолжительность работ, дни
1	Разработка и утверждение технического задания	Руководитель	5	5
		Разработчик	5	
2	Технические предложения	Руководитель	7	7
		Консультант	1	
		Разработчик	7	
3	Эскизный проект:			16
3.2	Постановка задачи	Консультант	1	

Продолжение Таблицы 3.1

3.3	Разработка общего описания алгоритма функционирования	Руководитель	2	
		Разработчик	7	
4	Технический проект:			15
4.1	Определение формы представления выходных данных	Руководитель	2	
		Разработчик	5	
4.2	Разработка структуры программы	Руководитель	2	
		Консультант	1	
		Разработчик	10	
5	Рабочий проект:			47
5.1	Программирование и отладка программы	Разработчик	23	
5.2	Испытание программы	Разработчик	5	
5.3	Корректировка программы по результатам испытаний	Разработчик	5	
5.4	Подготовка технической документации на программный продукт	Консультант	1	
		Разработчик	7	
5.5	Сдача готового продукта и внедрение	Руководитель	2	
		Консультант	1	
		Разработчик	7	
Итого				90

По итогам таблицы можно построить график.

Календарный график исполнения работы представлен на рисунке 3.2. По информации, отображенной на рисунке 3.2 также видно, что общий срок разработки составляет 90 дней.

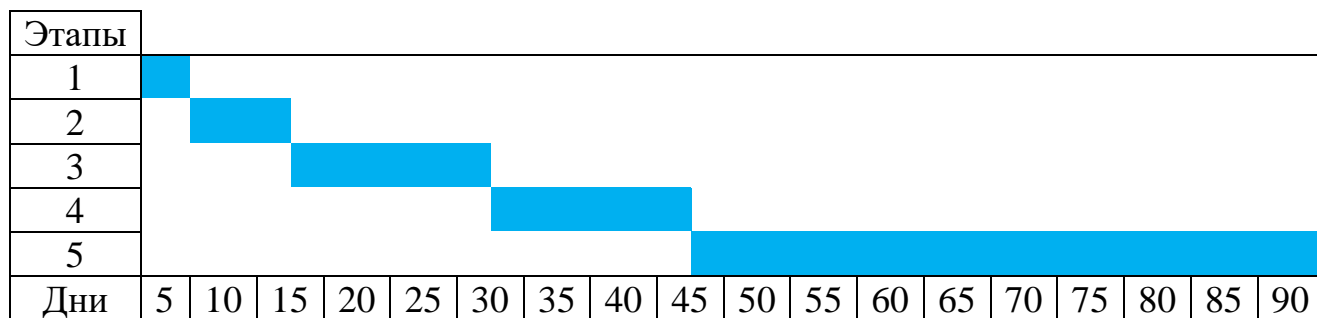


Рисунок 3.2 – График исполнения работ

3.2 Расчет стоимости проведения работ по теме

с е б е с т о и м о с т ь	1 статья «Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты + ТЗР (20%) от Σ итого по материалам
	2 статья «Специальное оборудование» - затрат нет
	3 статья «Основная заработная плата»
	4 статья «Дополнительная заработная плата» 20-30% от основной заработной платы
	5 статья «Страховые отчисления» - 30% от ФОТ
	6 статья «Командировочные расходы» - затрат нет
	7 статья «Контрагентские услуги» - затрат нет
	8 статья «Накладные расходы» - затрат нет
	9 статья «Прочие расходы» - затрат нет

В выпускной квалификационной работе, объем затрат на НИР и ОКР был проведен методом калькулирования [17].

Количество затрат по статье «Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты» отображено на таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Подсчет затрат статьи «Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты»

№ пп	Наименование материалов	Единицы измерения	Количество	Цена за единицу (руб)	Стоимость (руб)
1	2	3	4	5	6
1	Флеш-накопитель 2Гб	шт	1	560	560
2	Бумага А4	пачка	1	2120	2120
3	Картридж для принтера	шт	1	2000	2000
4	Ручка	шт	3	18	54
5	Карандаш	шт	3	7	21
Итого материалов					4 755
Транспортно-заготовительные расходы					951
Итого					5 706

Количество затрат по статье «Специальное оборудование» не рассчитывалось, так как затрат по этой статье не имеется или расходы на специальное оборудование отсутствуют.

Количество затрат по статье «**Основная заработная плата**» отображено на таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчет основной заработной платы

№ пп	Наименовани е этапа	Исполнитель (должность)	Мес. оклад (руб)	Трудоемкость (чел/дни)	Оплата за день (руб)	Оплата за этап (руб)
1	2	3	4	5	6	7
1	ТЗ	Руководитель	40 000	5	1818	9090
		Разработчик	29 000	5	1318	6590
2	ТП	Руководитель	40 000	7	1818	12726
		Консультант	35 000	1	1591	1591
		Разработчик	29 000	7	1318	9226
3	Эскизный проект	Руководитель	40 000	2	1818	3636
		Консультант	35 000	1	1591	1591
		Разработчик	29 000	16	1318	21088
4	Технический проект	Руководитель	40 000	4	1818	7272
		Консультант	35 000	1	1591	1591
		Разработчик	29 000	15	1318	19770
5	Рабочий проект	Руководитель	40 000	2	1818	3636
		Консультант	35 000	2	1591	3182
		Разработчик	29 000	47	1318	61946
Итого						166 117

Количество затрат по статье «**Дополнительная заработная плата**» рассчитывается по формуле (3.1), где дополнительная заработная плата взята как 25% от суммы основной заработной платы.

$$\text{ДЗП} = 166117 \times 0,25 = 41529,25 \text{ руб.} \quad (3.1)$$

Дополнительная заработная плата научного и производственного персонала составляет по проекту 41529,25 руб. [18].

Количество затрат по статье «**Страховые отчисления**» рассчитываются при условии, что отчисления на социальные нужды составляют 30% от фонда оплаты труда (ФОТ), который состоит из основной и дополнительной заработной платы [19].

Произведем расчет фонда оплаты труда по формуле (3.2) и страховых отчислений по формуле (3.3):

$$\Phi OT = OЗП + ДЗП = 16\,6117 + 41\,529,25 = 207\,646,25 \text{ руб.} \quad (3.2)$$

$$CO = \Phi OT \times 30\% = 207\,646,25 \times 0,3 = 62\,293,875 \text{ руб.} \quad (3.3)$$

Страховые отчисления составляют 62 293,875 руб.

Количество затрат по статье **«Командировочные расходы»** не рассчитывалось, так как затрат по этой статье не имеется или командировочные расходы отсутствуют.

Количество затрат по статье **«Контрагентские услуги»** не рассчитывалось, так как затрат по этой статье не имеется или контрагентскими услугами не пользовались.

Количество затрат по статье **«Накладные расходы»** не рассчитывалось, так как затрат по этой статье не имеется или накладные расходы отсутствуют

Количество затрат по статье **«Прочие расходы»** не рассчитывалось, так как затрат по этой статье не имеется или прочих расходов не было.

Полная себестоимость проекта представлена в таблице 3.4:

Таблица 3.4 – Полная себестоимость проекта

№ пп	Номенклатура статей расходов	Затраты (руб)
1	Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)	5 706
2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	-
3	Основная заработная плата научного и производственного персонала	166 117
4	Дополнительная заработная плата научного и производственного персонала	41 529,25
5	Страховые взносы в социальные фонды	62 293,875
6	Расходы на научные и производственные командировки	-
7	Оплата работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями	-
8	Накладные расходы	-

Продолжение Таблицы 3.4

9	Прочие прямые расходы	-
Итого		275 646,125

Так как полученные результаты будут использоваться внутри университета, то расчет договорной цены не нужен [20].

Выводы к разделу: в данном разделе были представлены участники, задействованные в работе, был построен календарный график работы, а также произведен расчет себестоимости проекта, состоящий из затрат разного назначения, которые были расписаны и рассчитаны.

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

4.1 Обоснование выбора инструментальных средств разработки программного обеспечения

Для реализации цифрового двойника системы охлаждения для цифровой подстанции можно использовать несколько платформ для моделирования и анализа электрических сетей. В данной работе были выбраны для рассмотрения такие программные продукты, как PSS®SINCAL немецкой компании Siemens и «Модус» российской компании с одноименным названием.

4.1.1 Siemens PSS®SINCAL

Данная платформа представляет собой три расчетных комплекса, а именно: SINCAL, NETOMAC и PDMS. Первый является основным программным обеспечением для моделирования сетей. NETOMAC – графический интерфейс пользователя для расчетов динамической устойчивости системы, а последний является программой управления данными устройств защиты.

Особенностью PSS®SINCAL является полная прозрачность данных, которая достигается за счет хранения всех данных (исходные данные, графика сети с географическим и схематическим изображением, а также результаты моделирования) в реляционной базе данных. Пользователи могут использовать, вводить и администрировать данные непосредственно из PSS®SINCAL или из других внешних приложений. Это упрощает ввод и администрирование данных и снижает затраты на разработку интерфейсов [21].

Обмен исходными, графическими, а также данными результатов расчетов осуществляется достаточно легко с помощью общепризнанных стандартов:

- EXCEL.
- CIM/XML — версии div и профили, включая МЭК 16 – CGMES.
- PSS®E.
- Формат обмена данными DGS.

- Формат файлов UCTE ASCII.
- PSS®NETOMAC.
- Формат обмена данными DVG.
- PSS®ADEPT.
- Формат обмена данными CYMDIST.
- XML.
- Файл PSS®Engine HUB.
- PSS/Г.
- OLE.
- ODBC, SQD, SQL.
- Архивирование PSS®SINCAL.
- Состояния сети через XML (например, открытые точки, рабочие состояния, данные элементов).

И графических форматов, например:

- WMF, EMF.
- Импорт DWG, DXF.
- BMP.
- PSP.
- GIF.
- PLT.
- JPG.
- PRN.
- PNG.
- PRT.
- TIF.
- Импорт SID.
- DXF.
- Импорт SHP.
- EPS.

- Импорт PIC.
- PCL.
- Импорт SVG.

PSS®SINCAL обладает массой интересных особенностей, которые стоит упомянуть. Данные хранятся в единой базе данных с SQL-доступом, причем комплекс работает с этой базой напрямую, сохраняя изменения автоматически. Присутствует проверка введенных данных, к примеру, по топологии или по определенному параметру оборудования. Также есть возможность моделировать несколько систем одновременно, причем они могут быть не связанными между собой. **PSS®SINCAL** позволяет дополнять свои проектные решения с использованием любых языков программирования. Также важной особенностью является то, что данный комплекс может работать как ASP-система (провайдер услуг доступа к приложениям). Доступ предоставляется через Интернет, а сам комплекс, притом, находится на компьютере в компании Siemens. По итогу пользователю не требуется выделять компьютерные мощности, нужно только оплачивать фактическое время работы с программой [21].

PSS®NETOMAC или же ядро для профессиональных динамических расчетов не обладает, как таковыми, ограничениями для моделирования, поэтому предлагается использовать два интерфейса пользователя. По сути, **NETOMAC** аналогичен **SINCAL**, но имеет некоторые особые функции. Вместо написания программы данное ядро моделирует оборудование и сеть в ASCII-файлах, а также определяет недостатки и изменения в сети. Пользовательский интерфейс представлен на рисунке 4.1.

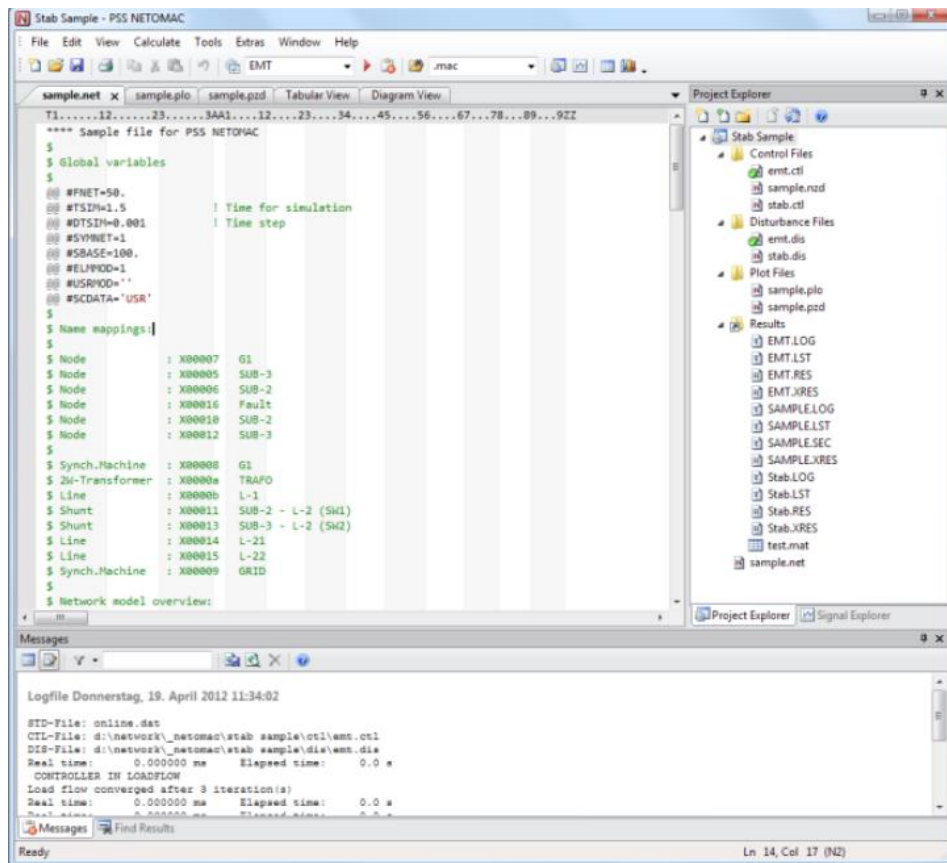


Рисунок 4.1 – Пользовательский интерфейс PSS®NETOMAC

Исследуемая сеть скомпонована в проекты, необходимые для управления входными и выходными данными, которые можно отобразить в табличном виде, что помогает визуализировать гибкие .xres файлы результатов, а в последствии обратиться к функциям оценки, вшитыми прямо в пользовательский интерфейс. В PSS®NETOMAC также имеется встроенная система диаграмм для отображения сигналов электромагнитных переходных процессов, которая включает в себя очень приятную функцию drag-n-drop для добавления сигналов из проводника сигналов (Signal Explorer) на диаграмму. Для каждого сигнала есть возможность назначить проекционную формулу, необходимую для отображения и преобразования этого сигнала. Отображение системы диаграмм отображения электромагнитных переходных процессов, которую может увидеть пользователь, представлена на рисунке 4.2:

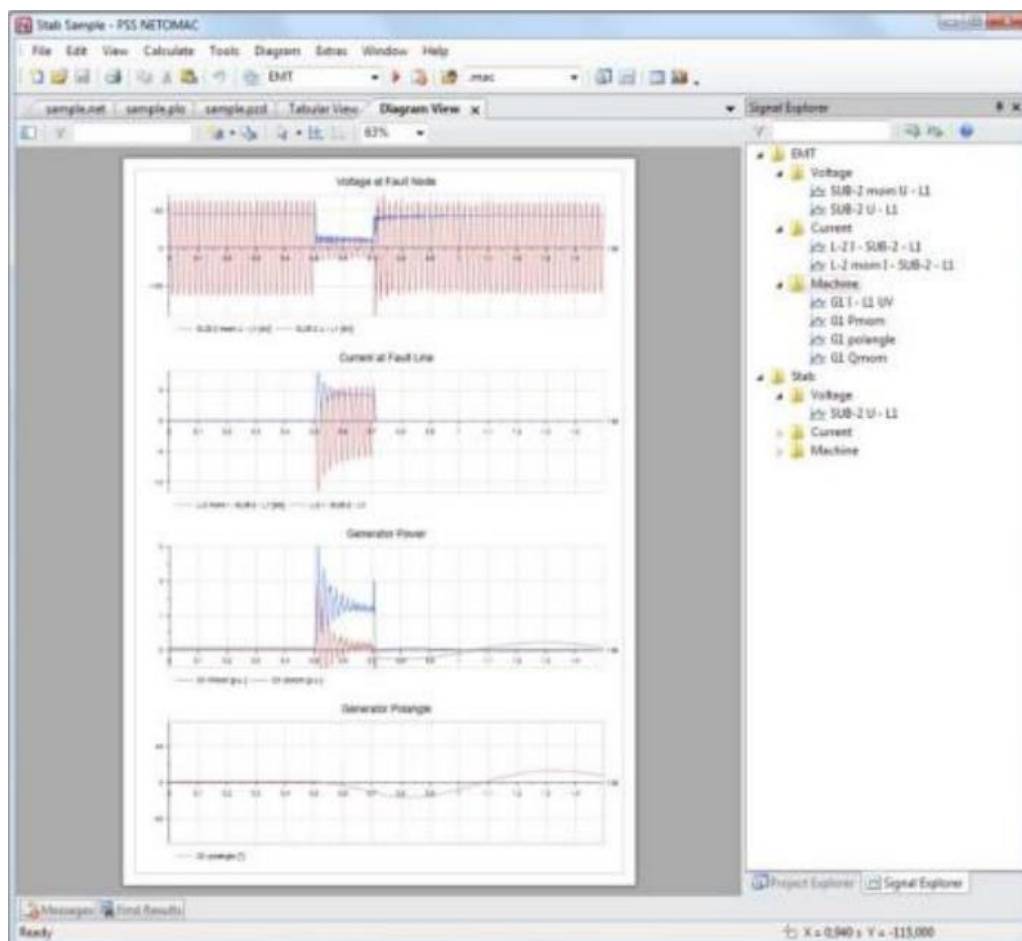


Рисунок 4.2 – Система диаграмм PSS NETOMAC

PSS®PDMS, а иначе система управления устройствами защиты – универсальная программа, предназначенная для централизованного администрирования этими устройствами. Данные хранятся в реляционной базе данных Microsoft Access или Oracle, которые также могут считываться напрямую другими программами.

Из особенностей данной системы следует выделить то, что она является многопользовательской, предоставляет простое подключение к внешним документам, таким как руководства по устройствам защиты и файлам параметров, а также предоставляет обмен данными с PSS®SINCAL, что позволяет пользователю проверять настройки устройств защиты прямо в модели сети.

Также комплекс PSS®SINCAL предоставляет графический конструктор модели NETCAD/BOSL, позволяющий с легкостью создавать динамические

модели при помощи графических блоков. Данный конструктор предназначен для таких динамических моделей, как:

- Модели трансформаторов.
- Стабилизаторы энергетической системы.
- Модели нагрузок.
- Системы возбуждения (APH).
- Модели HVDC.
- Модели FACTS.
- Функции защиты.

4.1.2 «Модус»

Программный комплекс «Модус» является российским аналогом представленной выше программной платформы PSS®SINCAL. Основным отличием является то, что «Модус» является более аналоговым продуктом, направленным на диспетчеризацию, а также обучение персонала энергетических объектов [22].

В составе данного комплекса имеются такие программные продукты, как «Диспетчерская информационная система», «Тренажер по переключениям», «Аниматор», «Графический редактор», «Интегратор», пакет разнообразных редакторов и компонент ActiveXeme.

«Диспетчерская информационная система» является, в свою очередь, комплексом программ, направленных на автоматизацию процессов технологического и оперативного управления электросетевых предприятий в режиме реального времени [23]. Данная система представляет собой полноценную систему управления распределительной сетью, обеспечивающую автоматизацию всех операционных и многих неоперационных функций диспетчера и реализующую такие процедуры, как:

- Актуализация операционных схем сетей и энергообъектов.
- Управление устранением аварии.
- Управление переключателями.

- Сдача и приемка смены.
- Ведение полного комплекта оперативной документации.

«Тренажер по переключениям» используется для обучения персонала порядку проведения коммутаций на энергетических объектах и позволяет моделировать энергообъекты различного уровня [24]. Предназначен для диспетчеров, дежурных подстанции, сотрудников электроцеха электрической подстанции, а также сотрудников энергетических служб промышленных предприятий, железной дороги и тому подобных.

В процессе обучения предлагается выполнить переключения, проверочные и другие действия на макете энергообъекта при различных условиях: нормальной или аварийной, в зависимости от полученного задания.

Данный тренажер имитирует такие виды действий, как:

- Коммутация – работа на открытом распределительном устройстве.
- Управление различным оборудованием с ключа управления на щите управления.
- Использование средств индивидуальной защиты.
- Телефонные переговоры.
- Выполнение действий через АРМ.
- Ввод в действие – работа с устройствами релейной защиты и автоматики.
- Проверочные действия, в том числе проверка исправности оборудования, показаний приборов и тому подобное.
- Вывешивание плакатов.

Также позволяет вести локальную или сетевую базу данных по обучаемым и их результатам тренировки.

«Графический редактор» предназначен для представления энергообъекта в виде схемы, из-за чего является важным элементом в программном комплексе [25]. Позволяет создавать следующие типы схем:

- Электрическое оборудование.
- Тепловое оборудование.

- Энергосистема.
- Элементы контроля и управления.
- Релейная защита и автоматика.
- Распределительные сети.
- Поопорные схемы.

Элементы, входящие в состав программного продукта «Графический редактор», необходимые для создания схем, являются объектами и обладают определенными свойствами, характерными для использования в энергетике. Также элементы могут иметь набор различных состояний, который отображается графически путем изменения внешнего вида элемента.

Для хранения документов и схем используется специальный формат SDE, разработанный компанией Модус с учетом требований к быстродействию и расширяемости системы. Пользовательский интерфейс представлен на рисунке 4.3.

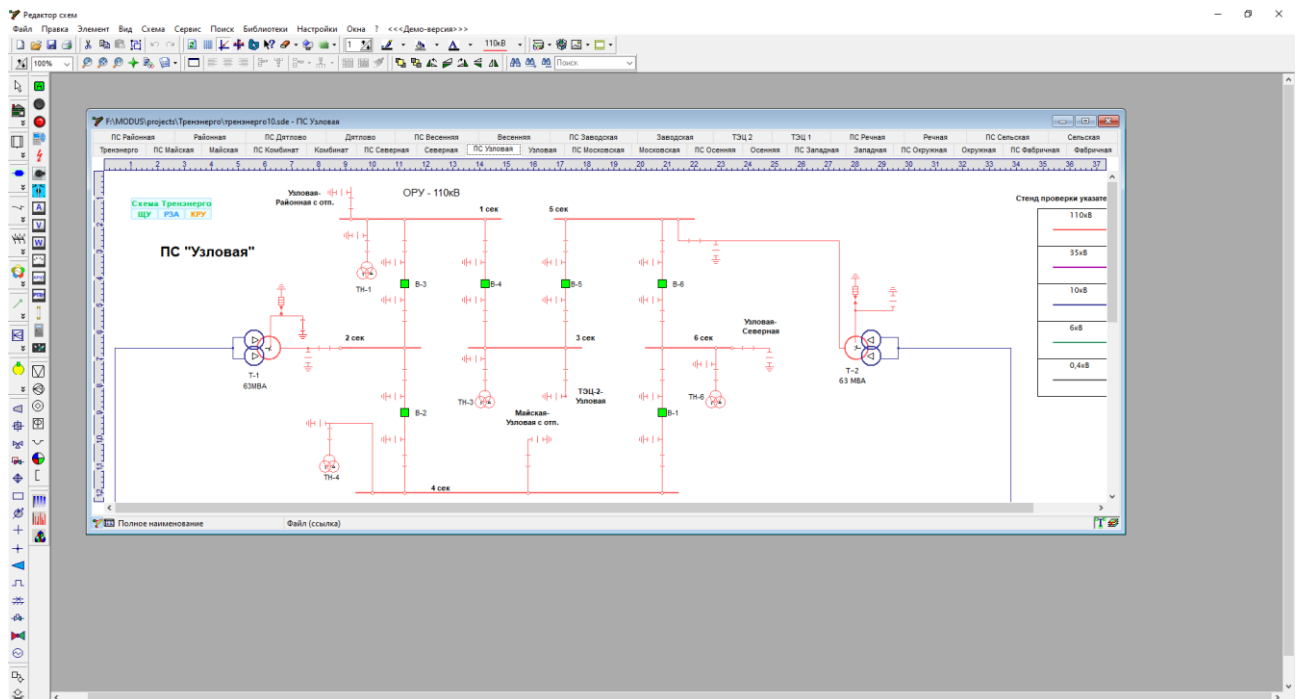


Рисунок 4.3 – Пользовательский интерфейс модуля «Графический редактор»

Имеется возможность импорта файлов из различных графических программных продуктов, таких как:

- AutoCad.
- PCad.

- Visio.
- Топаз.
- MapInfo,

Имеется возможность также экспорта файлов в следующие форматы:

- PDF.
- SVG.
- BMP.
- GIF.
- JPEG.
- PNG.
- AutoCad.
- PCad.
- Visio.
- Топаз.
- CIM.

«Аниматор» предназначен для связывания графических данных между собой, созданных в программе «Графический редактор», а также верификации адекватного поведения макета. Решает такие задачи, как:

- Проверка топологии и модели электрической сети.
- Настройка и проверка согласованного поведения элементов.
- Настройка и проверка правил переключения.
- Настройка и проверка функционирования блокировок.
- Настройка защит.
- Настройка управляющей системы.
- Составление автоматизированных тестов проверки правильности

работы моделей.

«Интегратор» позволяет объединить базу данных информационной системы предприятия со схемами, созданными в программе «Графический редактор», что, в свою очередь, обеспечивает наглядность и удобство в работе.

К примеру, редактирование, а также просмотр изменений, внесенных в базу данных, которая привязана к схеме, становится доступно при просмотре самой схемы, при этом не запуская дополнительных клиентских приложений.

Компонент ActivesXeme является системой отображения графической информации, представленной в виде документа или схемы формата SDE, который предназначен для разработчиков прикладного программного обеспечения [26]. Компонент ActivesXeme позволяет встроить графический модуль в ПО, разработанное при помощи таких средств разработки, как C++ Builder, Microsoft VisualBasic, Borland Delphi, Microsoft Visual C, и др.

Этот компонент реализует технологию ActiveX от компании Microsoft, что, в свою очередь, позволяет обеспечить удобный доступ различных программ к графической подсистеме «Модус», а также предоставляет возможность интегрирования в Web-страницы для просмотра созданных схем через Интернет.

В ходе написания выпускной квалификационной работы компания Siemens решила покинуть российский рынок, вследствие чего было принято решение выбрать программный комплекс «Модус» для реализации сформулированной задачи, а качестве среды разработки – Delphi.

4.1.3 Среда разработки Delphi

Borland Delphi, а на сегодняшний день – Embarcadero Delphi – интегрированная среда разработки программного обеспечения для компьютеров на базе Windows, Mac OS X и Linux, а также мобильных устройств на базе Android и IOS [27].

Язык программирования Delphi является императивным, структурированным, объектно-ориентированным. Является разновидностью языка Object Pascal.

Изначально Delphi был разработан компанией Borland как инструмент быстрой разработки (RAD) приложений под операционную систему Microsoft Windows в качестве объектно-ориентированного преемника Turbo Pascal. На

данный момент принадлежит и разрабатывается компанией Embarcadero Technologies.

Embarcadero Delphi является частью пакета Embarcadero RAD Studio, где он и его аналоги C++ и C++ Builder, которые совместимы между собой, совместно продаются и поставляются в трех редакциях: профессиональной, корпоративной и архитектурной. Также существует бесплатное издание сообщества, с большинством профессиональных функций для небольших компаний или физических лиц, чей доход не превышает 5 тысяч долларов в год [28].

Delphi содержит в себе визуальный конструктор, компонент управления исходным кодом, редактор кода, встроенный отладчик, и поддержку сторонних плагинов. Редактор кода содержит функцию автоматического завершения кода, рефакторинг и функцию проверки ошибок в реальном времени (Error Insight). Конструктор визуальных форм способен использовать библиотеку визуальных компонентов для чистой разработки Windows или фреймворк FireMonkey, предназначенный для кроссплатформенной разработки приложений. Ключевой функцией Delphi является поддержка баз данных и предоставляется компонентами доступа к базам данных (FireDAC). Delphi славится своей высокой скоростью компиляции, собственным кодом и производительностью разработчиков.

4.2 Описание реализации программного обеспечения

Перед тем, как начать разрабатывать программное обеспечение, необходимо сформировать техническое задание по стандарту ГОСТ 34.602-2020 [29]. Фрагмент технического задания представлен в приложении А.

Первоначально следует выявить математическую модель, необходимую для выявления нагрева трансформатора. Затем построить блок-схему, показывающую алгоритм работы системы охлаждения. Следующим этапом является проектирование мнемосхемы фрагмента подстанции при помощи программы «Графический редактор», предоставляемый компанией Модус,

впоследствии необходимой для реализации цифрового двойника. Основной функционал реализовывается в среде разработки Borland Delphi 7, интеграция мнемосхемы и возможности взаимодействия с ней реализовывается при помощи компонента ActiveXeme, поставляемого вместе с программным комплексом «Модус» версии 5.20.

4.2.1 Выявление нагрева трансформатора с помощью математической модели

Температуру верхних слоев масла трансформатора можно определить на основе адаптивной математической модели тепловых процессов [30]. В операторском виде температура масла рассчитывается следующим образом (4.1):

$$\theta_m(p) = \vartheta_{xx} + W_1(p)(K_H(p))^2 + W_2(p)\theta_{охл}(p), \quad (4.1)$$

где ϑ_{xx} - составляющая температуры масла от потерь холостого хода трансформатора;

$K_H(p)$ - операторное изображение коэффициента нагрузки трансформатора;

$\theta_{охл}(p)$ - операторное изображение температуры охлаждающей среды;

$W_1(p)$ и $W_2(p)$ – передаточные функции, которые рассчитываются по формулам (4.2) и (4.3), а $H(p)$ – характеристическое уравнение (4.4):

$$W_1(p) = \frac{k_1 p + k_0}{H(p)}, \quad (4.2)$$

$$W_2(p) = \frac{k_3 p^2 + k_2 p + 1}{H(p)}, \quad (4.3)$$

$$H(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1, \quad (4.4)$$

где $k_0 - k_3$ - коэффициенты передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$, а $a_0 - a_3$ - коэффициенты характеристического уравнения $H(p)$, которые рассчитываются по паспортным данным трансформатора с использованием формул, представленных в [31].

Чтобы рассчитать мгновенное значение коэффициента нагрузки по временной области, следует воспользоваться следующей формулой (4.5):

$$K_H(t) = \frac{\sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2}}{S_{\text{ном}}}, \quad (4.5)$$

где $P(t)$ - мгновенное значение активной мощности нагрузки;

$Q(t)$ - мгновенное значение реактивной мощности нагрузки;

$S_{\text{ном}}$ - номинальная мощность трансформатора [32].

4.2.2 Блок-схема работы системы охлаждения

Для наглядности и для лучшего понимания механизма работы системы охлаждения, была предложена блок-схема, которая будет применена при разработке цифрового двойника системы охлаждения для цифровой подстанции (рисунок 4.4).

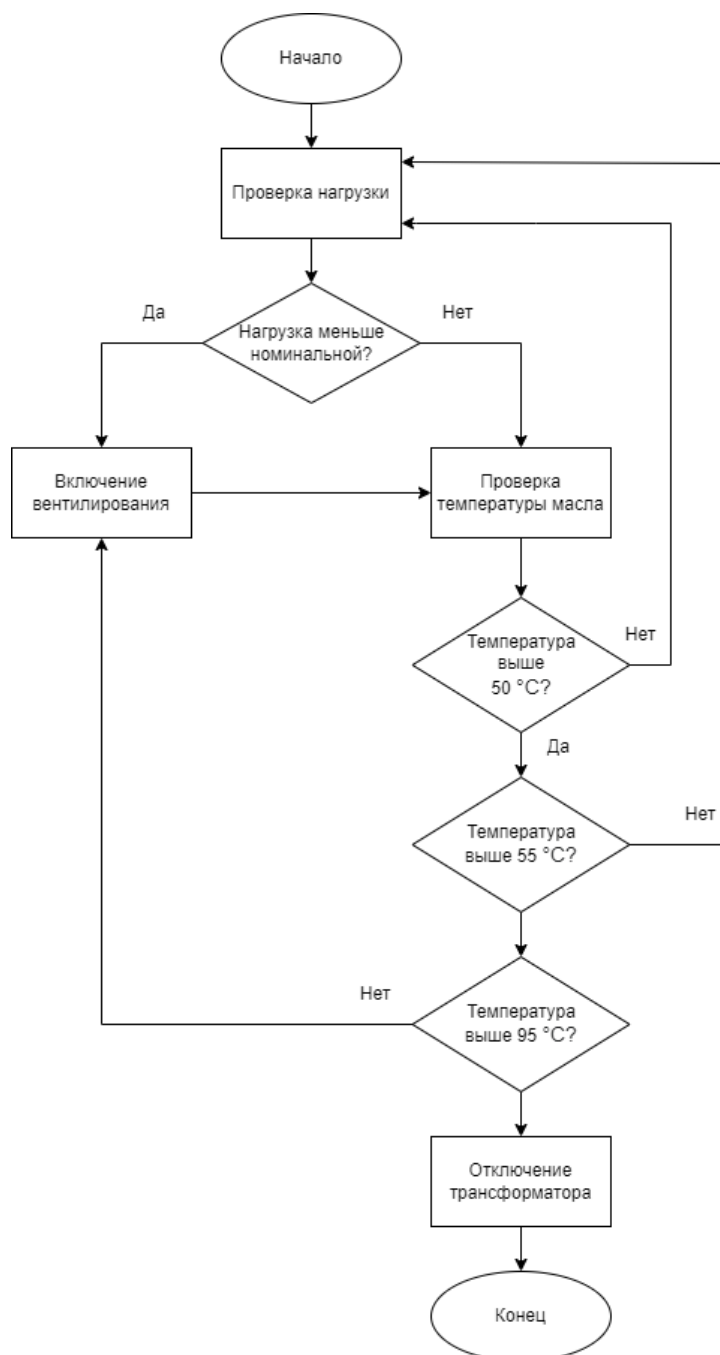


Рисунок 4.4 – Блок-схема системы охлаждения

4.2.3 Мнемосхема фрагмента подстанции

Модель подстанции со схематическим изображением системы охлаждения представлена в виде мнемосхемы, выполненная в модуле «Графический редактор», которую можно наблюдать на рисунке 4.5.

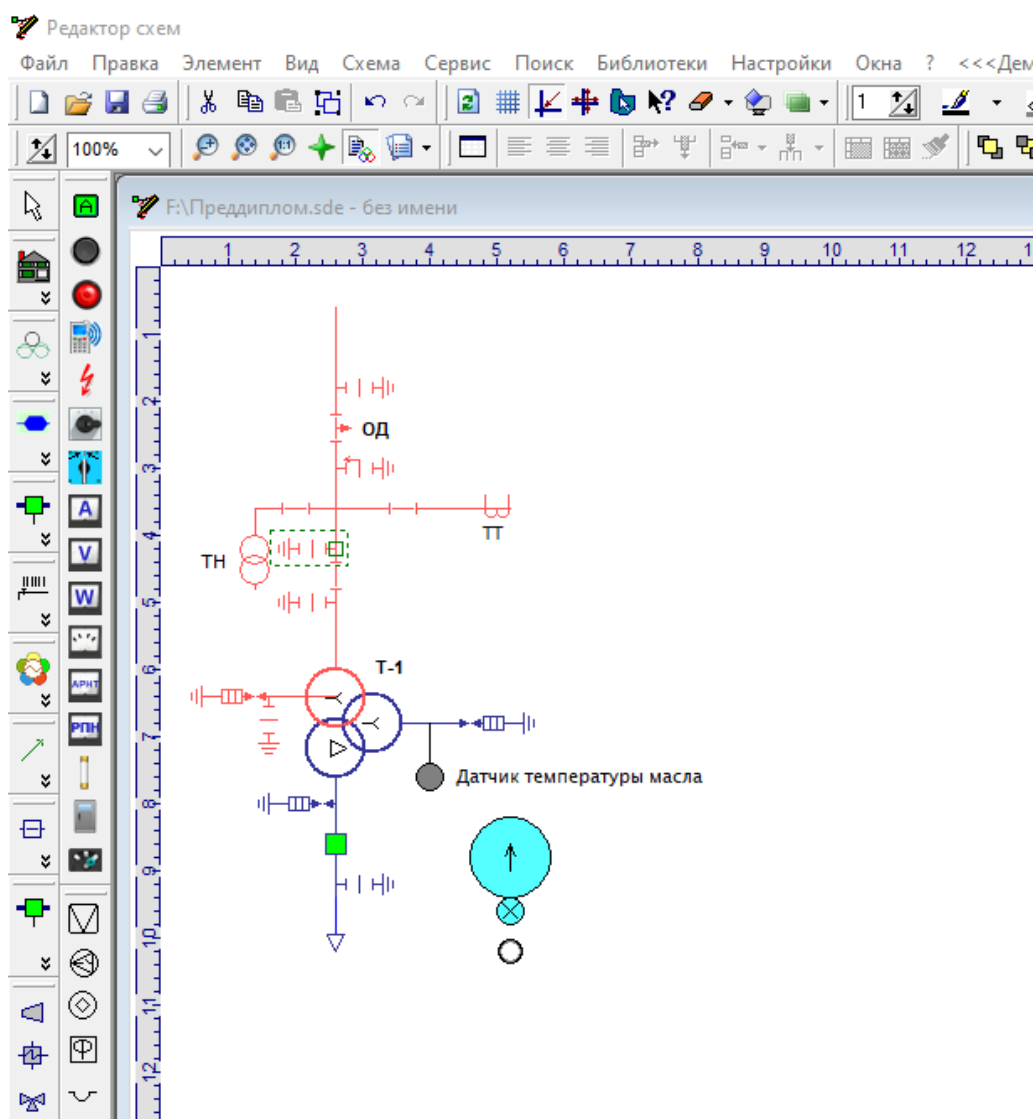


Рисунок 4.5 – Мнемосхема модели подстанции с системой охлаждения

На данной модели имеется масляный трансформатор Т-1 для внутренних нужд электростанций, который имеет систему охлаждения с дутьем и естественной циркуляцией масла, трансформатор напряжения ТН и трансформатор тока ТТ, который измеряет напряжение и силу тока на трансформаторе Т-1. Зеленым квадратом изображен выключатель, который служит для включения и отключения цепи. Бирюзовый круг служит в качестве схематического отображения системы охлаждения, а белый круг ниже – лампа, сигнализирующая о состоянии системы охлаждения. Также имеется пять заземляющих ножей, три разрядника, короткозамыкатель, отделитель и три разъединителя.

4.3 Техническое руководство

Программа отображает схему системы охлаждения трансформатора без графического интерфейса Модус. Приложение позволяет просматривать температуру верхних слоев масла при разных нагрузках и температурах окружающей среды.

Программа имеет только одно окно для работы, на котором расположены все необходимые элементы (Рисунок 4.6).

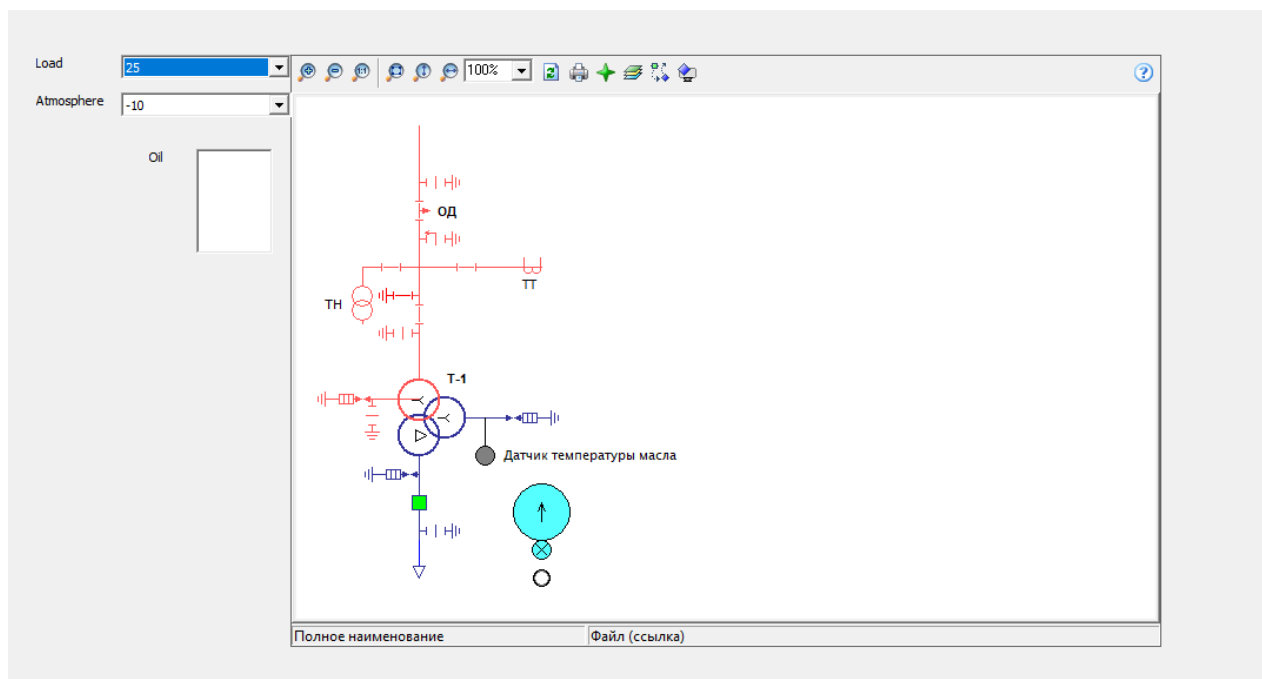


Рисунок 4.6 – Главное окно программы

При помощи выпадающего списка Load пользователь может задать нагрузку трансформатора, а именно 25, 50 и 100 процентов, что представлено на рисунке 4.7.

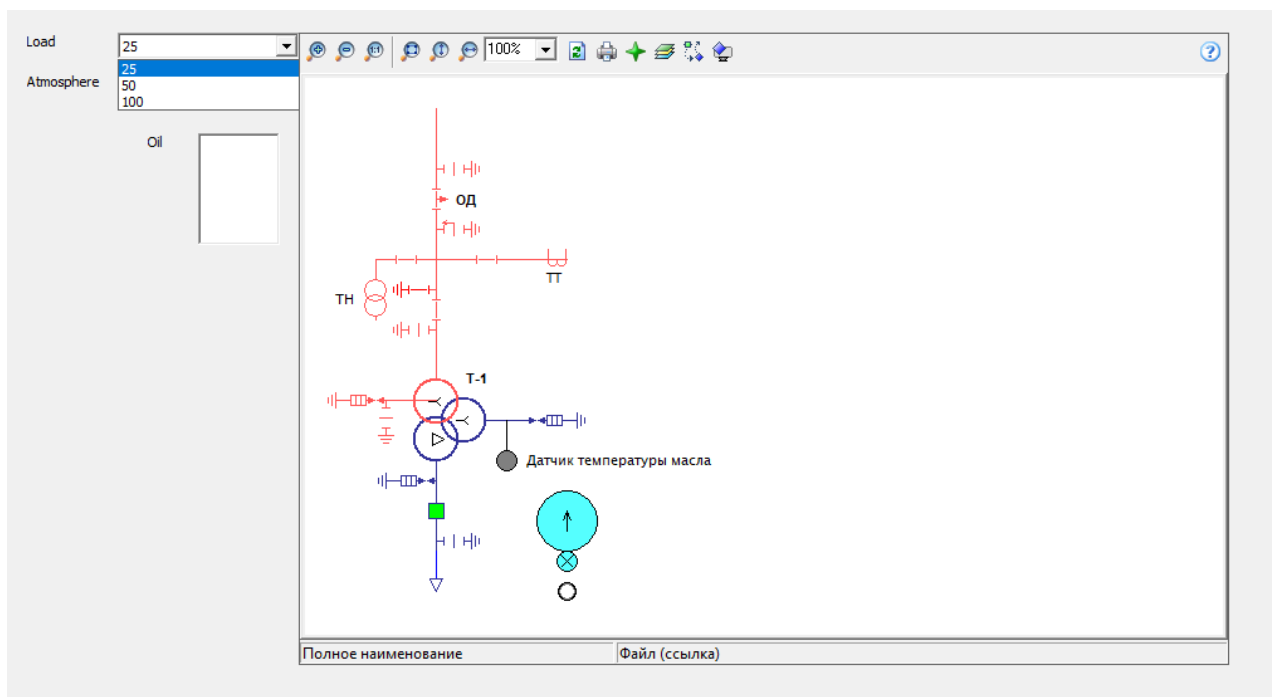


Рисунок 4.7 – Выпадающий список Load для смены нагрузки

Также пользователю доступно при помощи выпадающего списка Atmosphere, показывающего температуру окружающей среды, выбрать одно из необходимых для расчета значений, равных -10, 0, 10, 20 и 40 градусов по Цельсию (Рисунок 4.8).

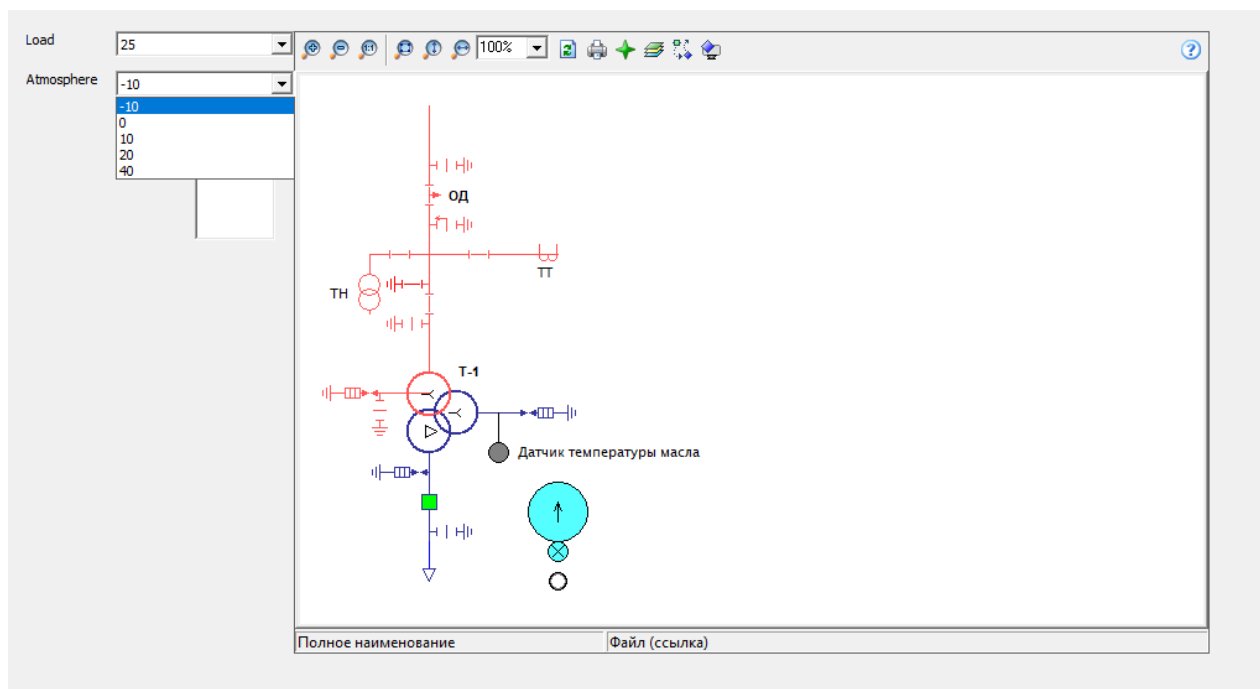


Рисунок 4.8 – Выпадающий список Atmosphere для смены температуры окружающей среды

После выбора необходимой нагрузки, на основании выбранной температуры окружающей среды, происходит расчет температуры внешних слоев масла и запись в поле Oil, а также, если температура превысила определенные значения, происходит графическое изменения схемы, что представлено на рисунках 4.9, 4.10 и 4.11.

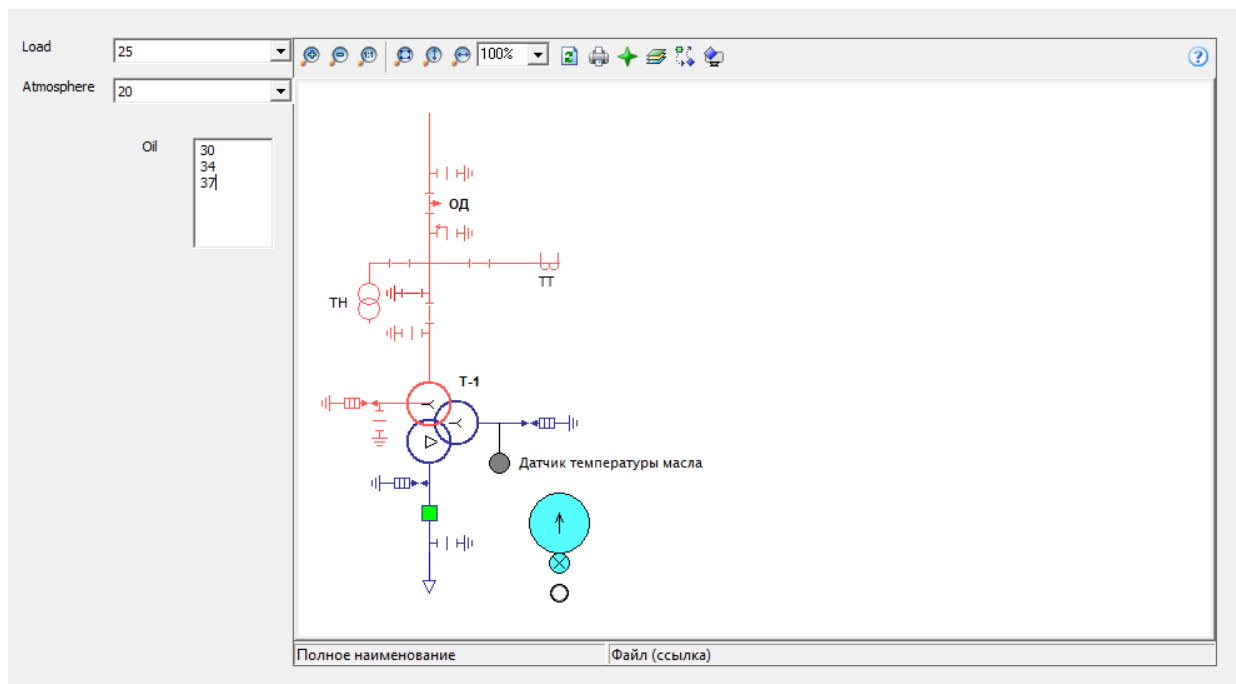


Рисунок 4.9 – Результаты при значениях 25 и 20

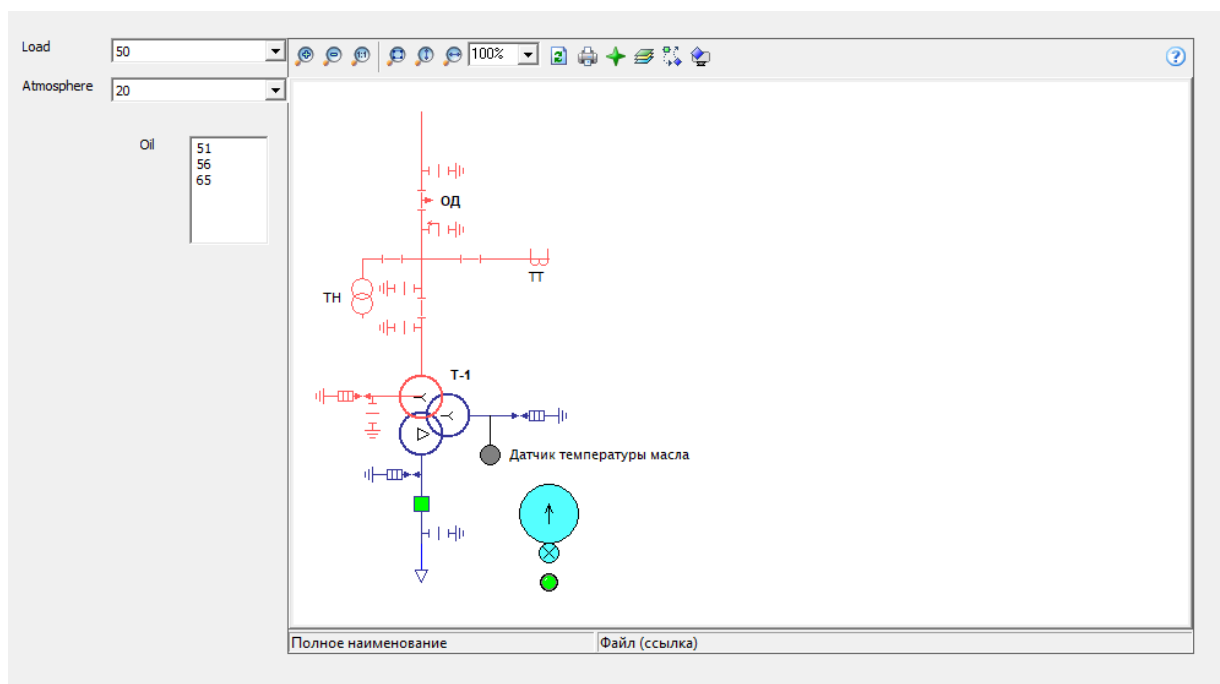


Рисунок 4.10 – Результаты при значениях 50 и 20

На рисунке 4.10 представлена ситуация, когда температура верхних слоев масла превысила значение в 55 градусов по Цельсию, что привело к включению системы охлаждения – лампа загорелась зеленым цветом.

Ситуация, когда температура верхних слоев масла превысила допустимую норму в 95 градусов по Цельсию, представлена на рисунке 4.11.

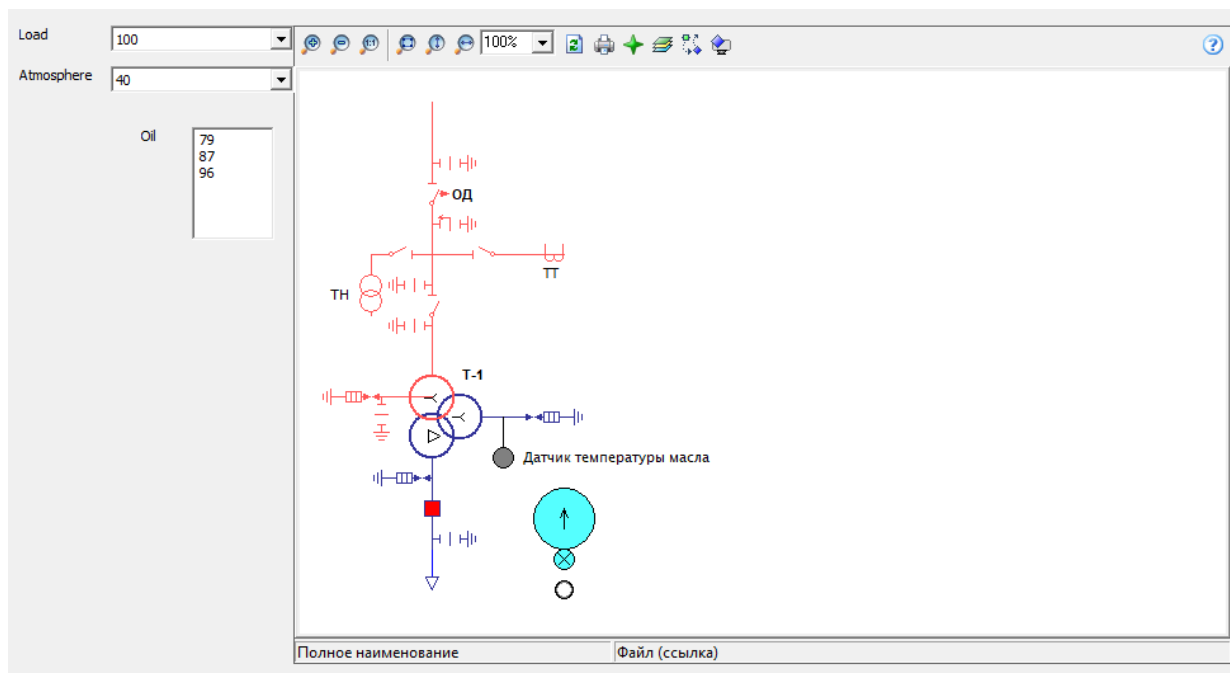


Рисунок 4.11 – Результаты при значениях 100 и 40

С листингом фрагмента кода программы можно ознакомиться в приложении Б.

Выводы к разделу: В данном разделе были рассмотрены платформы для моделирования и анализа электрических сетей, а также выбран программный комплекс «Модус» и среда программирования Borland Delphi в качестве используемых для создания цифрового двойника системы охлаждения для цифровой подстанции.

Была выявлена математическая модель, построена блок-схема, показывающая принцип работы системы охлаждения трансформатора, реализована мнемосхема фрагмента подстанции.

В разделе также представлено техническое руководство пользователя с иллюстрациями и пояснениями к ним.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цифровые технологии являются неотъемлемой частью современного общества: все больше и больше отраслей проходит этап цифровой трансформации, электроэнергетика не исключение.

Цифровые подстанции способны автоматизировать аспект контроля параметров, давая рекомендации по своевременному ремонту, а также позволяя контролировать показатели дистанционно, что крайне необходимо для качественной и безопасной работы энергосистемы, важнейшим аспектом которой является система охлаждения.

Технология цифровых двойников позволяет смоделировать все возможные ситуации, которые могут возникнуть на реальной подстанции, что позволяет сократить расходы на реализацию.

В ходе работы было разработано техническое задание по стандарту ГОСТ-34.602-2020, рассмотрено масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла, построена блок-схема, объясняющая принцип работы такой системы охлаждения, сформирована структурная схема аппаратного комплекса, на основе которой была разработана мнемосхема, показывающая фрагмент цифровой подстанции. Были определены и обоснованы средства разработки, которые использовались. Была предложена математическая модель выявления температуры верхних слоев масла, которая в последствии использовалась для реализации цифрового двойника. Также была выявлена себестоимость проекта в целом.

Результатом выпускной квалификационной работы является приложение, символизирующее цифровой двойник, способный смоделировать работу системы охлаждения для цифровых подстанций. На данный момент, разработанное приложение является прототипом и имеет некоторые недостатки, которые предполагается устранить, путем дальнейших доработок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]. URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.10.248-2017.pdf (дата обращения: 19.02.2022)
2. Цифровая подстанция. Концепция, технология внедрения. Создание опытного полигона «Цифровая подстанция ЕНЭС». Энергия единой сети [Электронный ресурс]. URL: https://xn-----glcfccctdci4bhow0as6psb.xn--plai/images/5-5/01_Morzhin_5.pdf (дата обращения: 20.03.2022)
3. МЭК 61850 Руководство по коммуникационным и вычислительным решениям для систем автоматизации подстанций. Моха [Электронный ресурс]. URL: <https://storage.energybase.ru/source/524/faAVONBocTK2pw8Sd45aK5WmwR1myOEF.pdf> (дата обращения: 25.02.2022)
4. Охлаждение трансформатора: виды и принцип работы. Дартекс [Электронный ресурс]. URL: <https://tdmetz.ru/articles/ohlazhdenie-st/> (дата обращения: 11.03.2022)
5. ГОСТ 15150. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003320?marker=7D20K3> (дата обращения: 11.05.2022)
6. ГОСТ 15543.1. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004477?marker=7D20K3> (дата обращения: 12.05.2022)
7. ГОСТ 30830. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031836?marker=7D20K3> (дата обращения: 11.05.2022)

8. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Экспертно-аналитический доклад [Электронный ресурс]. URL: http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoynik.pdf (дата обращения: 15.03.2022)
9. Цифровые двойники. Концепция развивается. С news [Электронный ресурс]. URL: https://data.cnews.ru/articles/2018-04-18_tsifrovye_dvojniki_kontseptsiya_razvivaetsya (дата обращения: 05.03.2022)
10. Никитина Е.В., Кох С., Полуэктов А.Н. Цифровой двойник для электрических сетей // Энергия единой сети, 2019, № 4(46)
11. Строительство цифровых подстанций в распределительных и магистральных электрических сетях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37315663> (дата обращения: 20.03.2022).
12. Системы охлаждения трансформаторов. Вэлта-Центр [Электронный ресурс]. URL: <https://velta-c.ru/catalog/ab/transformator/> (дата обращения: 10.03.2022)
13. Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов [Электронный ресурс]. URL: https://energetik-ltd.ru/statii/statii7/pravila_tekhnicheskoy_ekspluatatsii_silovykh_transformatorov (дата обращения: 10.03.2022)
14. ГОСТ Р МЭК 61850-5-2011. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093460> (дата обращения: 14.03.2022)
15. Построение информационной модели цифровой подстанции на основе стандарта МЭК 61850. Международный научно-исследовательский журнал [Электронный ресурс]. URL: <https://research-journal.org/technical/postroenie-informacionnoj-modeli-cifrovoj-podstancii-na-osnove-standarta-mek-61850/> (дата обращения: 24.05.2022)
16. Методика автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора. CYBERLENINKA [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-avtomaticheskogo-obnaruzheniya->

nenormalnogo-nagreva-silovogo-transformatora/viewer (дата обращения: 16.03.2022)

17. Методические рекомендации по выполнению организационно-экономической части выпускных квалификационных работ [Электронный ресурс]: метод. указания / Т. Ю. Гавриленко, О. В. Григоренко, Е. К. Ткаченко. — М.: РТУ МИРЭА, 2019. — Электрон. опт. диск (ISO) (дата обращения: 10.05.2022)

18. Коэффициент дополнительной заработной платы формула. Расчет основной и дополнительной заработной платы. Мир закона [Электронный ресурс]. URL: <https://mizakona.ru/kojefficient-dopolnitelnoj-zarabotnoj-platy-formula-raschet-osnovnoj-i-dopolnitelnoj-zarabotnoj-platy.html> (дата обращения: 10.05.2022)

19. Экономика предприятия [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / И.А. Назарова, А.С. Вихрова. – М.: РТУ МИРЭА, 2021. – Электрон. опт. диск (ISO). – 71 с. (дата обращения: 10.05.2022)

20. Григоренко О.В., Садовнича И.О., Мыльникова А. Экономика предприятия и управление организацией М.: РУСАЙНС, 2017-235с.

21. Платформа PSS®SINCAL. Техническое описание. Siemens [Электронный ресурс]. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:cb8460d7-cbab-4823-8cc8-c8b7332c54ec/ru-pss-sincal_datasheet.pdf (дата обращения: 15.05.2022)

22. Программный комплекс для энергетики. Software Модус [Электронный ресурс]. – URL: <https://swman.ru/> (дата обращения: 17.05.2022)

23. Документация «Электронный журнал». Software Модус [Электронный ресурс]. URL: <https://swman.ru/download/pdf/SysOl.pdf> (дата обращения: 17.05.2022)

24. Документация «Тренажер». Software Модус [Электронный ресурс]. – URL: <https://swman.ru/download/pdf/swman32.pdf> (дата обращения: 17.05.2022)

25. Документация «Графический редактор». Software Модус [Электронный ресурс]. URL: <https://swman.ru/download/pdf/SDedit.pdf> (дата обращения: 17.05.2022)
26. Документация «ActivesXeme». Software Модус [Электронный ресурс]. URL: https://swman.ru/download/pdf/AX_manual.pdf (дата обращения: 17.05.2022)
27. История языков программирования: Delphi – больше, чем просто язык. Хабр [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/316492/> (дата обращения: 18.05.2022)
28. Delphi Commynity Edition. Embarcadero [Электронный ресурс]. URL: <https://www.embarcadero.com/ru/products/delphi/starter> (дата обращения: 20.05.2022)
29. ГОСТ 34.602-2020. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181804> (дата обращения: 20.04.2022)
30. Широков, О.Г. Методика выявления повреждений в силовых трансформаторах с использованием косвенного контроля температуры масла /О.Г. Широков, Д.И. Зализный //Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: сб. материалов МНТК, 15-16 мая 2003 г. – Могилев: МГТУ, 2003. – С. 556-557.
31. Управляющие и измерительные системы. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 КВ. CYBERLENINKA [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-teplovoy-modeli-dlya-teoreticheskikh-issledovaniy-teplovyyh-protsessov-v-maslyanyh-transformatorah-10-0-4-kv/viewer> (дата обращения: 15.03.2022)
32. Параметрическая идентификация математической модели силового масляного трансформатора. CYBERLENINKA [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametricheskaya-identifikatsiya-matematicheskoy->

teplovoy-modeli-silovogo-maslyanogo-transformatora/viewer (дата обращения:
15.03.2022)

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Фрагмент технического задания

Приложение Б. Листинг фрагмента кода разработанной программы

Приложение В. Презентационный материал

Приложение А. Фрагмент технического задания

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Наименование системы

1.1.1 Полное наименование системы

Цифровой двойник системы охлаждения для цифровых подстанций.

1.1.2 Краткое наименование системы

Цифровой двойник системы охлаждения.

1.2 Основания для проведения работ

Работа выполняется на основании учебного плана направления 09.03.04 «Программная инженерия».

1.3 Плановые сроки начала и окончания работ по созданию

АС

Плановое начало работ: 01.09.2021.

Плановое окончание работ: не позднее 27.05.2022.

Сроки начала и окончания стадий и этапов работ приведены в таблице А.5 раздела 5 настоящего ТЗ.

1.4 Порядок оформления и предъявления заказчику

Работы по созданию сдаются Разработчиком поэтапно, в соответствии с календарным планом Проекта. По завершении каждого этапа работ Разработчик сдает Заказчику отчетные документы этапа, состав которых определен Заказчиком.

2 ЦЕЛИ И НАЗНАЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ (РАЗВИТИЯ) СИСТЕМЫ

2.1 Назначение системы

Программа предназначена для имитации работы системы охлаждения цифровой подстанции с целью обучения работы с ней и моделирования различных ситуаций.

2.2 Цели создания системы

Целями создания системы являются:

- моделирование работы системы охлаждения;
- наглядное отображение перегрева трансформатора.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ АВТОМАТИЗАЦИИ

3.1 Краткие сведения об объекте автоматизации или ссылки на документы, содержащие такую информацию

Объектом автоматизации является совокупность процессов сбора и обработки информации для выявления температуры верхних слоев масла при помощи математической модели, а также отображение данных в виде списка и графически.

4 ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ

4.1 Требования к структуре и функционированию системы

Программа разработана для совместной работы со схемами, спроектированными в графическом редакторе Модус. Система должна функционировать в одном режиме и обеспечивать полное выполнение своих функций.

4.2 Требования к квалификации персонала

Для работы с программой персонал должен обладать соответствующими навыками работы со схемами электрических сетей.

4.3 Требования к составу, структуре и способам организации данных в системе

Вся информация об объекте и его характеристиках содержится непосредственно на подключенной схеме. Программа работает считывает данных со схемы и работает с ними.

4.4 Требования к программному обеспечению

Для работы с программным продуктом на системе пользователя должен быть установлен программный комплекс Модус.

4.5 Требования к техническому обеспечению

Для корректной работы программного продукта необходимо иметь:

- Процессор Intel Pentium 233 МГц и выше.
- Операционную систему Microsoft Windows XP и выше (в случае с Windows 10 и более поздних версий рекомендуется включить режим совместимости с Windows 8).
- Оперативную память от 128 Мбайт.
- Пространства на жестком диске не менее 540 Мбайт.

5 СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ

Таблица А.1 – Этапы проведения работ по созданию системы

Этап	Стадия	Состав работ	Сроки выполнения
1	Составление ТЗ	Анализ предметной области, составление и утверждение ТЗ	01.09.2021-31.12.2021
2	Проектирование	Выбор компонентов системы	01.01.2022-28.02.2022
3	Реализация	Разработка	01.03.2022-27.05.2022

6 ПОРЯДОК КОНТРОЛЯ И ПРИЁМКИ СИСТЕМЫ

Приёмка результатов работ осуществляется поэтапно в соответствии с календарным планом выполнения работ.

Приложение Б. Листинг фрагмента кода разработанной программы

Листинг Б.1 – Фрагмент кода разработанной программы

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
  Forms,
  Dialogs, StdCtrls, OleCtrls, htsde2_TLB, ExtCtrls, SDECore_TLB,
  Registry, TypInfo, ComCtrls, ToolWin;

type
  TFunction = function(x: double): double;
  TForm1 = class(TForm)
    Nagruzka: TComboBox;
    HTSDEForm21: THTSDEForm2;
    mmo1: TMemo;
    Okr: TComboBox;
    Load: TLabel;
    Atmosphere: TLabel;
    Oil: TLabel;
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure TForm1.calc(Aparams: IParams, t: Double);
    function Fun(t: double): double;

  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form1: TForm1;

implementation

{$R *.dfm}
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Nagruzka.Items.Append(IntToStr(25));
  Nagruzka.Items.Append(IntToStr(50));
  Nagruzka.Items.Append(IntToStr(100));
  Nagruzka.ItemIndex := 0;
  Nagruzka.Style := csDropDownList;
  Okr.Items.Append(IntToStr(-10));
  Okr.Items.Append(IntToStr(-0));
```

```

    Okr.Items.Append(IntToStr(10));
    Okr.Items.Append(IntToStr(20));
    Okr.Items.Append(IntToStr(40));
    Okr.ItemIndex := 0;
    Okr.Style := csDropDownList;
    mmo1.Lines.Clear;
end;

procedure TForm1.calc(Aparams: IParams, t: Double);
var
    LInfo: IParamInfo;
    Obj: ISDEObject2;
    PName: string;
    Param: IParam;
    MInd := LInfo.maxindex;
    R1,R2,R3,C1,C2,C3, T1, T2, T3: Double;
begin
    BM := '4138';
    Obj := HT.Document.FindViewIndex('счетчик', BM);
    if Assigned(Obj) then
        R1 := 25/Obj.Params.Item ['Px_кВт'].Value;
        R2 := 23/Obj.Params.Item ['Рквннн_кВт'].Value;
        R3 := 55/(Obj.Params.Item ['Px_кВт'].Value + Obj.Params.Item
['Рквннн_кВт'].Value);
        C1 := 462*Obj.Params.Item ['Мв_т'].Value*1000;
        C2 := 925*Obj.Params.Item ['Мк_т'].Value*1000;
        C3 := 2000*Obj.Params.Item ['Мм_т'].Value*1000;
        T1 := C1*R1;
        T2 := C2*R2;
        T3 := C3*R3;
    end;
    procedure TForm1.Switch (Obj: ISDEObject2);
var
    Param: IParam;
begin
    Param := Obj.Params.Item ['положение'];

    if Assigned (Param) then begin

        if param.Value = 'включен' then
            param.Value := 'отключен'
        else
            param.Value := 'включен';
        Memo1.Lines.Add ('--> ' + param.Value);
    end;
end;
function Fun(t: double): double;
begin
    result:=1 - exp(-t*t/2);
end;
end.

```

Приложение В. Презентационный материал



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА
Институт информационных технологий (ИИТ)
Кафедра математического обеспечения и
стандартизации
информационных технологий (МОСИТ)

Выпускная квалификационная работа на тему: **«Цифровой двойник системы охлаждения для цифровых подстанций»**

Студент группы ИКБО-06-18 Капустин Н.И.
Руководитель к.т.н. доцент Жматов Д.В.

1

Рисунок В.1 – Титульный слайд

Цель и задачи выпускной квалификационной работы

Цель – моделирование работы системы охлаждения для цифровой подстанции путем создания цифрового двойника

Объект исследования - Система охлаждения трансформатора

Задачи

- Исследование и анализ предметной области
- Определение информационной модели
- Выявление стоимости работ
- Выявление средства разработки
- Составление математической модели
- Реализация необходимого функционала

2

Рисунок В.2 – Слайд цели и задач

Предметная область – цифровая подстанция

Цифровая подстанция – электроподстанция с высоким уровнем автоматизации, где все управление работой происходит в цифровом виде по стандарту МЭК 61850

Цели

- Повышение безопасности
- Повышение надежности и доступности
- Модернизация существующих подстанций
- Оптимизация инвестиций
- Улучшенные возможности связи
- Стандартизация и совместимость
- Снижение затрат на техническое обслуживание

Архитектура

- Технологический уровень
- Уровень ячейки
- Общестанционный уровень
- Шина процесса
- Шина станции

3

Рисунок В.3 – Слайд изучения предметной области

Объект исследования – система охлаждения трансформатора

Типы охлаждения:

Воздушное

- Естественное
- С дутьем

Масляное

- Естественное масляное
- Естественное масляное с дутьем
- Принудительное с дутьем
- Принудительное масляно-водяное

Что является внешней средой?

Согласно стандарту ГОСТ 30830-2002:

- Температура окружающего воздуха
- Климатическое исполнение по ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1
- Высота над уровнем моря
- Степень загрязнения окружающей среды
- Сейсмическая активность

4

Рисунок В.4 – Слайд изучения объекта исследования

Предмет исследования – цифровой двойник системы охлаждения трансформатора

Цифровой двойник — это виртуальное воплощение реально существующих физических объектов или целых систем, моделирующее внутренние процессы, технические характеристики, а также поведение реального объекта при различных условиях

Типы

- Двойник-прототип
- Двойник-экземпляр
- Агрегированный двойник

Способы создания

- Графические 3D-модели
- Модели на базе интернета вещей
- Интегрированные математические модели
- Технологии визуализации(голограммы, VR, AR)

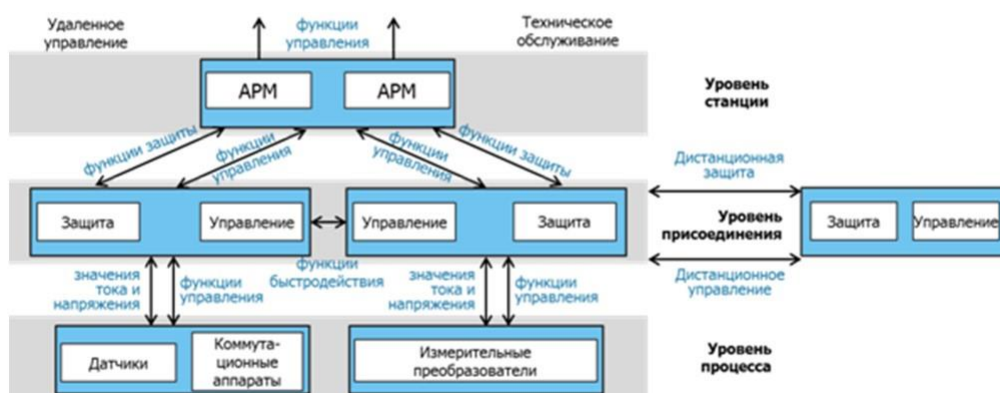
Математические методы

- Метод конечных элементов
- Анализ видов и последствий отказов
- Средства автоматизированного проектирования

5

Рисунок В.5 – Слайд изучения предмета исследования

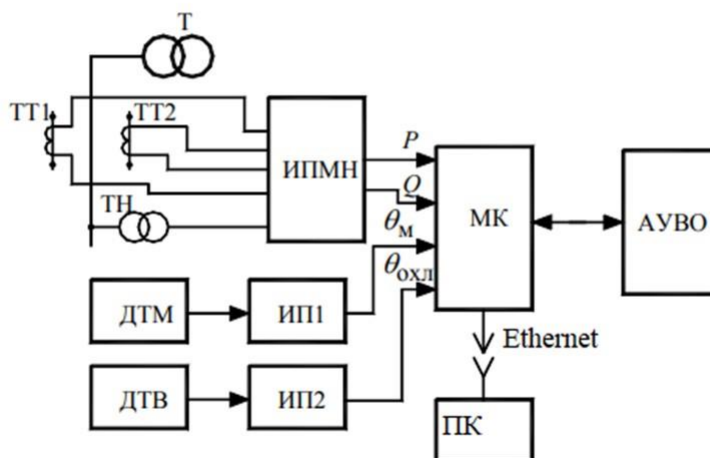
Информационная модель цифровой подстанции



6

Рисунок В.6 – Слайд информационной модели

Структурная схема аппаратного комплекса



7

Рисунок В.7 – Слайд структурной схемы

Себестоимость проекта

№ пп	Номенклатура статей расходов	Затраты (руб)
1	2	3
1	Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)	5 706
2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	-
3	Основная заработная плата научного и производственного персонала	166 117
4	Дополнительная заработная плата научного и производственного персонала	41 529,25
5	Страховые взносы в социальные фонды	62 293,875
6	Расходы на научные и производственные командировки	-
7	Оплата работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями	-
8	Накладные расходы	-
9	Прочие прямые расходы	-
Итого		275 646,125

8

Рисунок В.8 – Слайд себестоимости

Средства разработки

Siemens PSS®SINCAL

- PSS®SINCAL – Основное программное обеспечение для моделирования
- PSS®NETOMAC – графический интерфейс пользователя для расчетов
- PSS®PDMS – программа управления данными устройств защиты

«Модус»+Delphi

- Графический редактор – Программное обеспечение для создания схем энергообъектов
- Компонент ActiveXeme – система для отображения и интегрирования схем в средства разработки
- Delphi – инструмент быстрой разработки

9

Рисунок В.9 – Слайд изучения средств разработки

Математическая модель

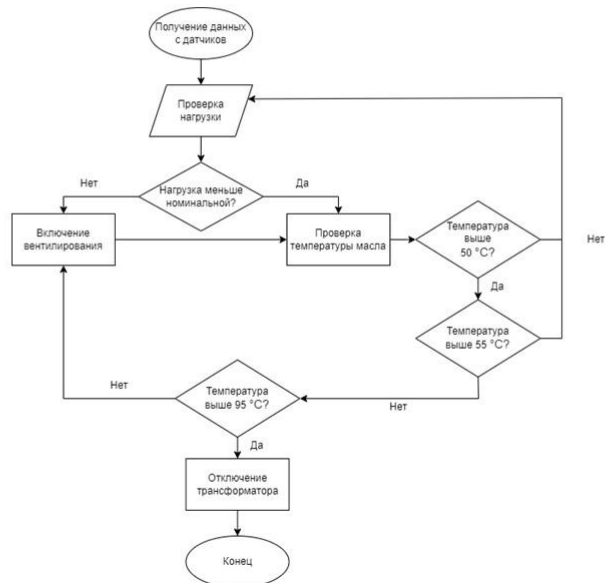
$$\theta_m(p) = \vartheta_{xx} + W_1(p)(K_H(p))^2 + W_2(p)\theta_{охл}(p)$$
$$W_1(p) = \frac{k_1 p + k_0}{H(p)}$$
$$W_2(p) = \frac{k_3 p^2 + k_2 p + 1}{H(p)}$$
$$H(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1$$

где ϑ_{xx} – составляющая температуры масла от потерь холостого хода трансформатора;
 $K_H(p)$ – операторное изображение коэффициента нагрузки трансформатора;
 $\theta_{охл}(p)$ – операторное изображение температуры охлаждающей среды;
 $W_1(p)$ и $W_2(p)$ – передаточные функции;
 $H(p)$ – характеристическое уравнение;
 $k_0 - k_3$ – коэффициенты передаточных функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$;
 $a_0 - a_3$ – коэффициенты характеристического уравнения $H(p)$.

10

Рисунок В.10 – Слайд математической модели

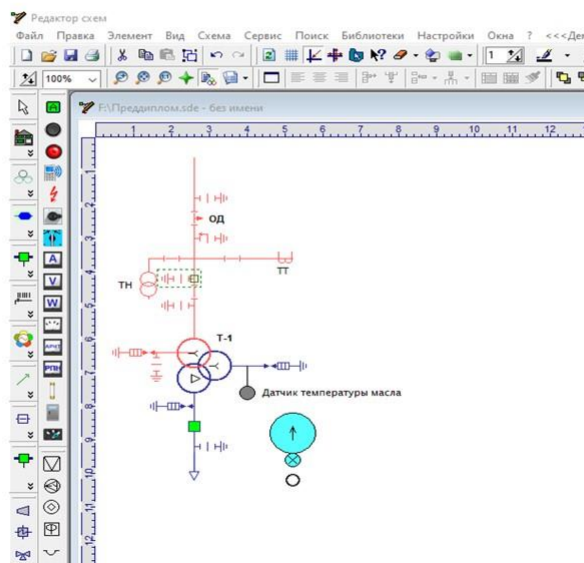
Блок-схема алгоритма работы системы охлаждения



11

Рисунок В.11 – Слайд блок-схемы

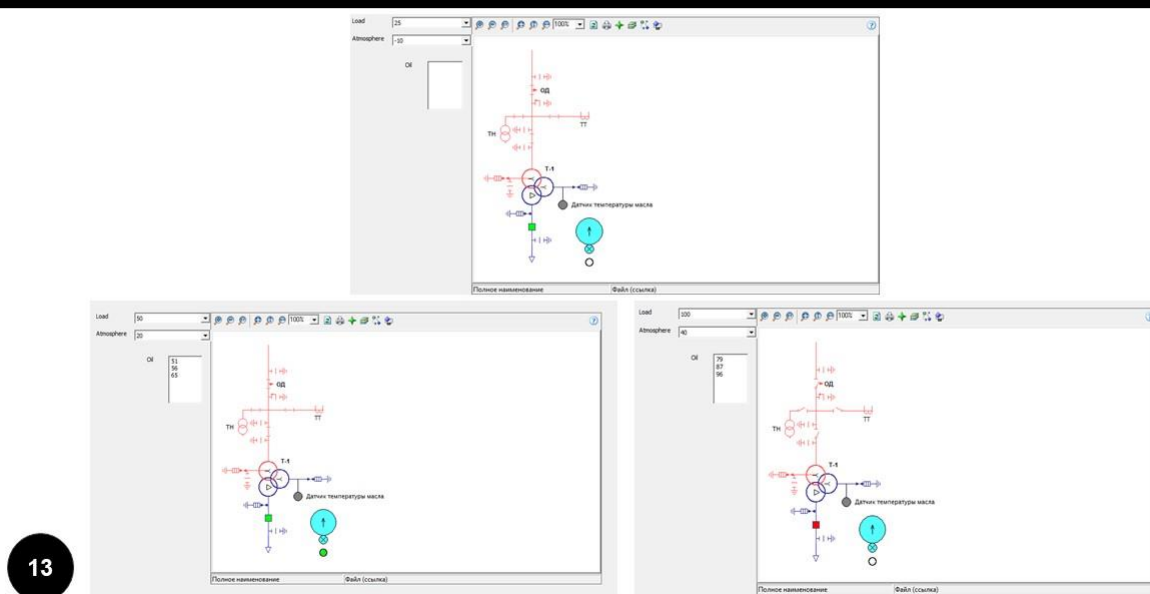
Мнемосхема фрагмента подстанции



12

Рисунок В.12 – Слайд мнемосхемы

Экранные формы программы



13

Рисунок В.13 – Слайд экранных форм

Листинг фрагмента программы

```
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
    Nagruzka.Items.Append(IntToStr(25));
    Nagruzka.Items.Append(IntToStr(50));
    Nagruzka.Items.Append(IntToStr(100));
    Nagruzka.ItemIndex := 0;
    Nagruzka.Style := csDropDownList;
    Okr.Items.Append(IntToStr(-10));
    Okr.Items.Append(IntToStr(-0));
    Okr.Items.Append(IntToStr(10));
    Okr.Items.Append(IntToStr(20));
    Okr.Items.Append(IntToStr(40));
    Okr.ItemIndex := 0;
    Okr.Style := csDropDownList;
    mmol.Lines.Clear;
end;

procedure TForm1.calc(Aparams: IParams);
var
    Linfo: IParamInfo;
    Obj: ISDEObject2;
    FName: string;
    Param: IParam;
    MInd := Linfo.maxindex;
    R1, R2, R3, C1, C2, C3, T1, T2, T3: Double;
begin
    BM := '4138';
    Obj := HT.Document.FindViewIndex('счетчик', BM);
    if Assigned(Obj) then
    begin
        R1 := 25/Obj.Params.Item['P_k_в'].Value;
        R2 := 25/Obj.Params.Item['P_k_в'].Value;
        R3 := 55/(Obj.Params.Item['P_k_в'].Value + Obj.Params.Item['P_k_в'].Value);
        C1 := 462*Obj.Params.Item['M_k_в'].Value*1000;
        C2 := 925*Obj.Params.Item['M_k_в'].Value*1000;
        C3 := 2000*Obj.Params.Item['M_k_в'].Value*1000;
        T1 := C1*R1;
        T2 := C2*R2;
        T3 := C3*R3;
    end;
end;
```

14

Рисунок В.14 – Слайд листинга фрагмента программы

Выводы по работе

- Были проведены исследование и анализ предметной области
- Определена информационная модель, на основе которой спроектирована структурная схема
- Рассчитана себестоимость работ на основе экономических параметров
- Выбраны средства разработки
- Составлена математическая модель
- Реализован необходимый функционал

15

Рисунок В.15 – Слайд выводов по работе



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА
Институт информационных технологий (ИИТ)
Кафедра математического обеспечения и
стандартизации
информационных технологий (МОСИТ)

Выпускная квалификационная работа на тему:
**«Цифровой двойник системы охлаждения
для цифровых подстанций»**

Студент группы ИКБО-06-18 Капустин Н.И.
Руководитель Жматов Д.В.

16

Рисунок В.16 – Завершающий слайд