

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Разработка системы мониторинга силового трансформатора с функциями
предиктивной аналитики

Обучающийся

Л.Б. Москалев
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный руководитель

к.т.н., доцент, А.Н. Черненко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Содержание

Введение.....	3
1 Бизнес-план.....	13
1.1 Основная цель и сущность стартап проекта	13
1.2 Основные цели и задачи.....	13
1.3 Описание инновационной идеи	14
1.4 Стадия развития стартап проекта на момент составления бизнес-плана	14
1.5 Состав конкретных мероприятий, которые планируется реализовать по завершении Договора	14
1.6 Средства необходимые для развития стартап проекта	15
1.7 Ключевые факторы успеха.....	15
1.8 Наименование продукции	15
1.9 Назначение и область применения.....	15
1.10 Перспективы выпуска и конкурентоспособность	16
1.11 Краткое описание и основные технико-экономические и потребительские характеристики.....	18
1.12 Степень готовности	20
1.13 Размер рынка	20
1.14 Темпы роста рынка, фаза развития спроса.....	20
1.15 Прогнозы развития отрасли	20
1.16 Основные и потенциальные конкуренты	22
1.17 Конечные потребители	22
1.18 Конкурентные преимущества продукции конкурентов и предприятия	23
1.19 Планируемая доля рынка	24
1.20 Обоснование цены на продукцию	24
1.21 План продвижения разработанного продукта	24
1.22 Организация сбыта.....	25

2 Анализ методик определения повреждений активной части силового трансформатора	27
3 Разработка методики оценки технического состояния активной части силового трансформатора с программной реализацией	41
4 Создание программного продукта предиктивного анализа активной части силового трансформатора в режиме реального времени	52
Заключение	75
Список используемой литературы	77
Приложение А Письмо поддержки от Тольяттинского государственного университета	83
Приложение Б Письмо поддержки от ООО «СК ЛАЙФ»	84
Приложение В Письмо поддержки от ООО «РУРИКО»	85
Приложение Г Письмо поддержки от МОО «Ассоциация региональной молодежи»	86
Приложение Д Сертификат участия в очной защите проекта в рамках программы «Студенческий Стартап»	87

Введение

В современном мире энергетика играет фундаментальную роль в развитии государства и всех его подсистем. По данным независимой исследовательской компании EnerData Россия находится на 4-м месте по количеству выработанной электроэнергии на 2022 год [12]. Энергетическая отрасль Российской Федерации играет ключевую роль в технологическом и экономическом развитии страны [22]. Трансформаторное оборудование является так же основополагающим элементом во всей энергосистеме, на рисунке 1 представлена динамика развития мирового рынка трансформаторов.



Рисунок 1 – Объём мирового рынка трансформаторов

В системах электроснабжения предприятий и организаций используется большое число трансформаторов различной мощности и классов напряжения. При этом в составе крупных предприятий и организаций находятся специализированные службы, занимающиеся эксплуатацией силового высоковольтного оборудования, в том числе и трансформаторов.

В эксплуатации предприятий и организаций могут находиться различные трансформаторы:

- силовые трансформаторы;

- распределительные трансформаторы;
- специализированные трансформаторы.

Согласно представленной классификации, к силовым трансформаторам относятся трансформаторы с классом напряжения обмотки высокого напряжения (ВН) 35 кВ и выше. Обычно такие типы трансформаторов устанавливаются на главных понизительных подстанциях (ГПП) или подстанциях глубокого ввода (ПГВ). Данные подстанции обеспечивают получение электрической энергии предприятиями из энергосистемы и преобразование напряжения для использования в распределительной сети предприятия или организации.

На следующем уровне систем электроснабжения, согласно представленной классификации, используются распределительные трансформаторы. Данные трансформаторы обеспечивают питание низковольтной нагрузки, т.е. потребителей и приемников электрической энергии ниже 1000 В.

К специализированным трансформаторам, используемым в системах электроснабжения предприятий и организаций относятся испытательные высоковольтные трансформаторы печные трансформаторы. Общими словами, специализированные трансформаторы – это трансформаторы, используемые для решения узконаправленных задач в системах электроснабжения.

Начавшаяся в России тенденция цифровизации всех отраслей народного хозяйства была определена принятием в 2017 году программы и дорожной карты «Цифровая экономика Российской Федерации». При этом в 2018 году принята ведомственная программа «Цифровая трансформация электроэнергетики России» [5]. Принятые документы показали необходимость применения цифровых технологий в электроэнергетической отрасли. В настоящее время в мире складывается устойчивая тенденция перехода от планового ремонта и обслуживания оборудования электроэнергетических систем на обслуживание по показателям.

Аналогичный запрос прослеживается и от электроэнергетических компаний России. Однако, реализация подобного подхода требует установки на значительную часть оборудования систем мониторинга. При этом данные, получаемые от систем мониторинга оборудования, должны анализироваться специалистами-экспертами с принятием решения о необходимости проведения обслуживания или ремонта. В таблице 1 приведено количество построенных и реконструированных трансформаторных подстанций.

Таблица 1 – Количество введённых электрических подстанций

Наименование мощности	Единица измерения	2021			2022		
		Всего	В том числе		Всего	В том числе	
			строительство	реконструкция		строительство	реконструкция
Трансформаторные понижительные подстанции напряжением 35 кВ и выше	тыс. кВА	3386,6	1751,3	1635,3	3036,6	2920,5	116,2

По данным министерства энергетики свыше 28% силовых трансформаторов классом напряжения 110 кВ имеют повышенную вероятность отказа, связанного с неудовлетворительным состоянием. В тоже время, из общего количества трансформаторов напряжения 220 кВ и выше, порядка 31% имеют значительный физический износ, что в перспективе негативно скажется на сроке их службы. Представленные статистические данные также указывают на необходимость использования и внедрения

систем мониторинга силовых трансформаторов [18]. На рисунке 2 приведена диаграмма физического износа всех объектов генерации за 2022 год.

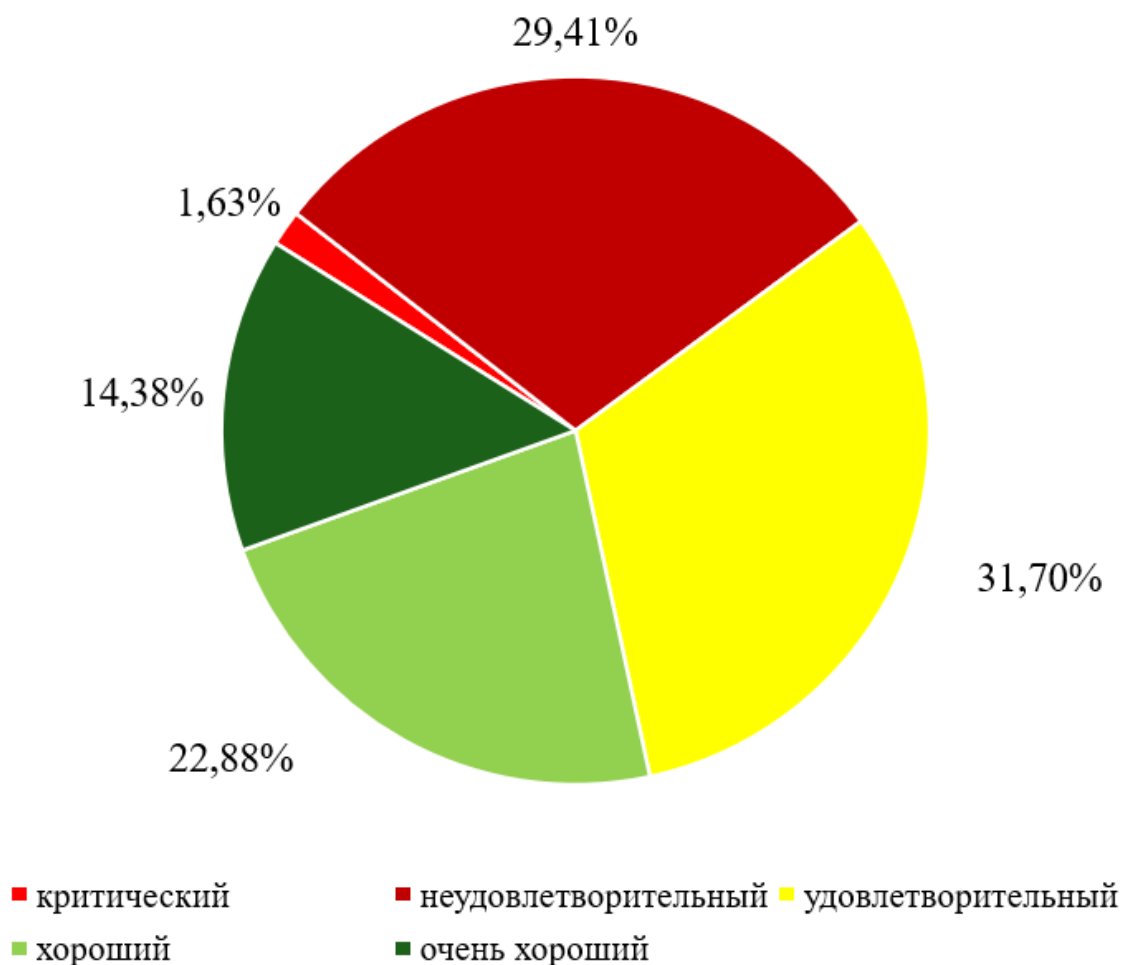


Рисунок 2 – Физический износ объектов генерации

Проблемой также является тот факт, что при повреждении силового трансформатора возникают споры его гарантийного обслуживания и ремонта. Для выяснения причин повреждения трансформатора и определения виновника происшествия необходимо привлекать специалистов, которые путем долгого анализа будут выявлять, действительно ли данный случай является гарантийным, и компания-производитель обязуется произвести ремонтные работы или замену поврежденного оборудования.

На рисунке 3 представлена диаграмма общего физического износа силовых трансформаторов напряжения 220 кВ и выше за 2022 год [19].

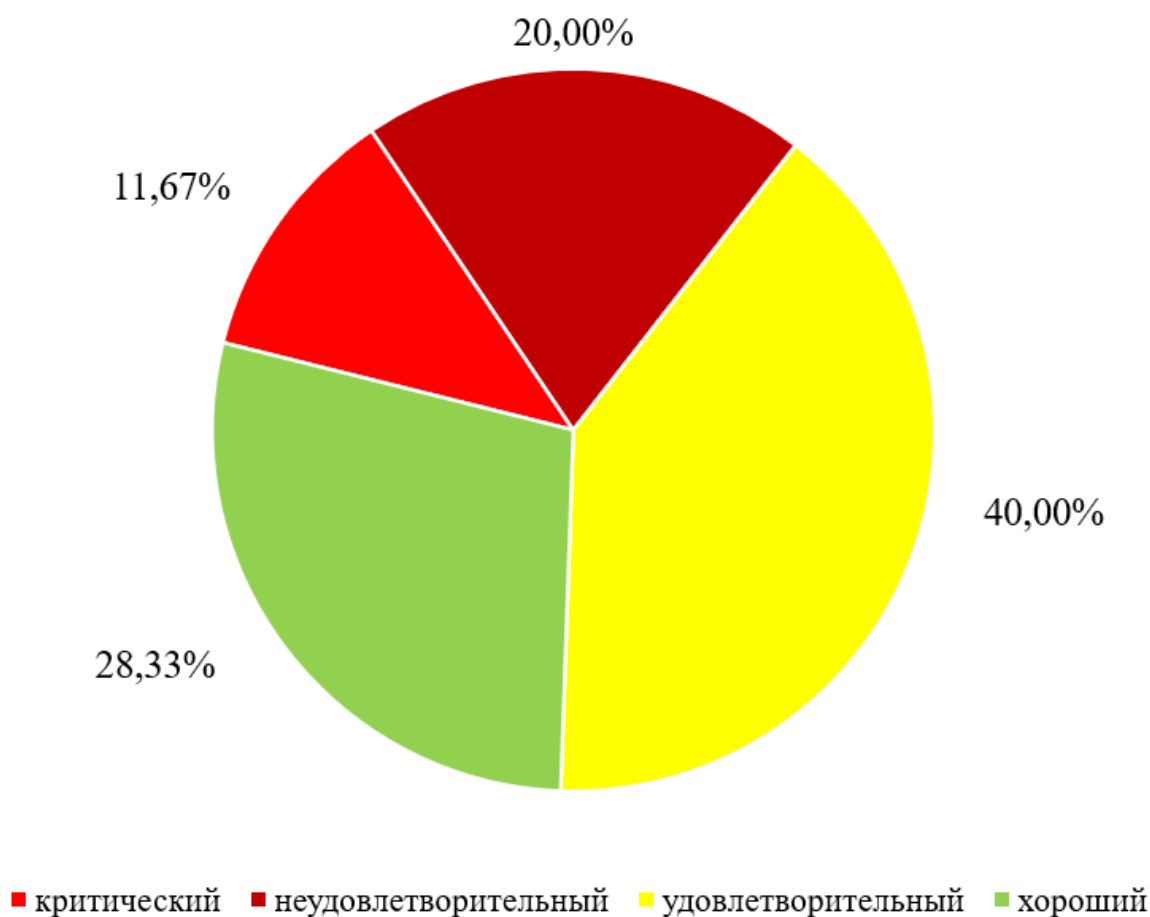


Рисунок 3 – Физический износ силовых трансформаторов напряжением 220 кВ и выше

Предлагаемая система мониторинга силового трансформатора, а также методики и авторские алгоритмы работы системы позволяют в режиме реального времени определять и корректировать значения параметров, характеризующих продолжительность работы силового трансформатора и как следствие планировать и определять необходимость проведения технического обслуживания или ремонтных работ по регламенту. Использование системы мониторинга подразумевает отказ от участия в вопросах оценки технического состояния специалистов-экспертов, а также обеспечивает получение достоверных данных не только о сроке службы силового трансформатора, но и о состоянии основных элементов его конструкции.

На рисунке 4 проиллюстрированы имеющиеся и перспективные подходы к мониторингу силовых трансформаторов.

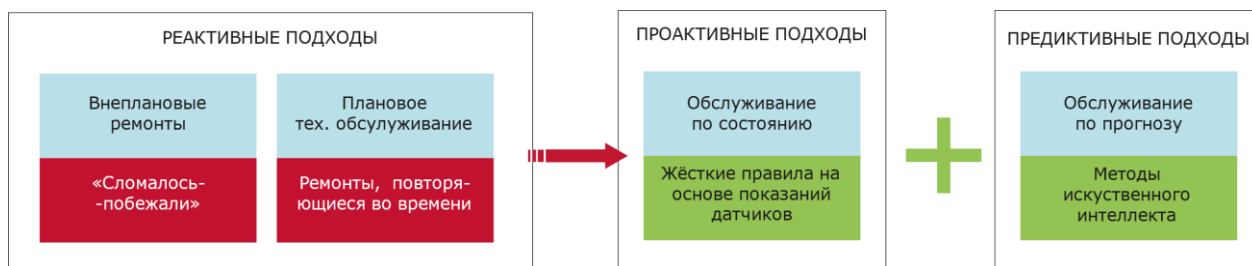


Рисунок 4 – Подходы в обслуживании оборудования

Постоянный мониторинг системой параметров, характеризующих техническое состояние силового трансформатора, позволяет использовать данные при расследовании аварийных ситуаций, в том числе и с повреждением оборудования как в гарантийных случаях, так и в период окончания гарантийных обязательств. Кроме того, использование системы мониторинга на вновь установленном, новом, силовом трансформаторе позволит, в случае наличия, определить зарождающийся дефект или производственный брак. Система мониторинга имеет возможность подключаться к нескольким трансформаторам, вести их одновременный мониторинг и передавать данные в автоматизированную систему управления трансформаторной подстанцией [11].

Потенциальные потребители продукта проекта – производители трансформаторного оборудования, промышленные предприятия имеющие собственные трансформаторные подстанции, метрополитен, ПАО «РЖД», ПАО «Россети» и генерирующие компании. Для каждого потенциального потребителя продукта основной мотивацией является снижение эксплуатационных затрат на текущее обслуживание и ремонт оборудования, а также продление срока службы силовых трансформаторов за счет корректировки режима работы и загрузки в зависимости от текущего технического состояния. Система мониторинга обеспечивает контроль состояния силового трансформатора в режиме реального времени и определяет критические режимы работы. Система мониторинга информирует эксплуатирующий персонал о критических режимах работы трансформатора в режиме реального времени, что дает возможность персоналу своевременно

предотвращать аварийные ситуации. Система обеспечивает эксплуатирующий персонал данными о сроке службы силового трансформатора в режиме реального времени, что снижет риск развития аварийных ситуаций. При возникновении гарантийных споров между заводом изготовителем и эксплуатирующей организацией, завод изготовитель сможет получать полный и развернутый объем данных о техническом состоянии силового трансформатора для установления причины выхода из строя оборудования.

На рисунке 5 показаны капитальные затраты на трансформатор в ходе эксплуатации и преждевременного выхода его из строя.

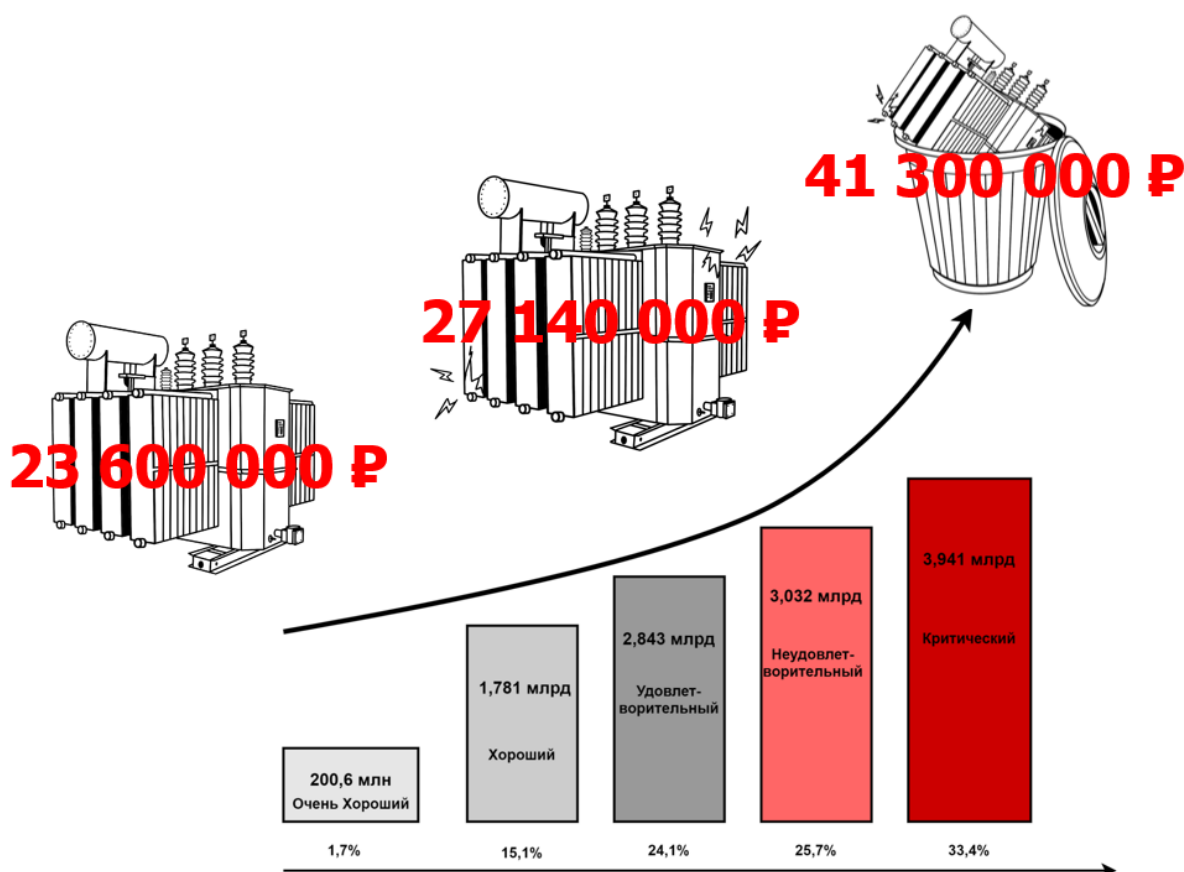


Рисунок 5 – затраты при эксплуатации силового трансформатора

Мониторинг трансформаторов обеспечивает [44]:

- раннее обнаружение неисправностей: своевременное выявление этих проблем обеспечивает упреждающее обслуживание и снижает риск

катастрофических отказов, минимизируя время простоя и повышая надежность системы;

- оптимальное использование активов: анализируя данные о характере нагрузки, температурных тенденциях и других критических параметрах, операторы могут оптимизировать использование трансформаторов. Это помогает предотвратить перегрузку или недогрузку, продлить срок службы трансформаторов и максимально повысить их эффективность.
- предиктивное обслуживание: анализируя исторические данные и данные в режиме реального времени, системы мониторинга позволяют выявить закономерности и индикаторы потенциальных отказов.
- повышенная безопасность: системы мониторинга обеспечивают раннее предупреждение о ненормальных условиях эксплуатации, что позволяет операторам незамедлительно принять меры по исправлению ситуации и обеспечить безопасность.
- принятие решений на основе данных: анализируя тенденции, закономерности и данные о производительности, операторы могут оптимизировать работу трансформаторов, планировать модернизацию инфраструктуры и осуществлять профилактические меры.

Цель выпускной квалификационной работы (ВКР): создание системы мониторинга активной части силового трансформатора с функциями предиктивной аналитики

Предмет исследования: техническое состояние силового трансформатора по данным системы мониторинга.

Научная новизна: при разработке программного обеспечения мониторинга силового трансформатора, был применён синтез уже имеющихся методик контроля параметров трансформаторов методом амплитудно-частотной характеристике и анализа степени износа силового

оборудования через измерение индуктивности. В основу разработки были положены работы Ндайизейе Мартина «Оценка состояния обмоток силовых трансформаторов на основе методики допустимых отклонений частот резонансов» [13,14], а также работы Александра Хренникова, в частности «Электродинамические испытания трансформатора типа ТЦ-666000/500 на МИС» [3,24].

Практическая значимость: используемые методики и программные решения направлены на снижение эксплуатационных затрат и рисков, связанных с аварийным выводом из работы силового двух обмоточного трансформатора за счет повышения наблюдаемости скрытых дефектов магнитной системы и обмоток. Разработанное программное позволит в перспективе уйти от обслуживания по регламенту к обслуживанию на основе получаемых из системы данных что в значительной мере упростит проводимые работы и положительно скажется на снижении издержек эксплуатации, что в свою очередь может привести к понижению квалификации и требований для обслуживающего персонала.

Объект исследования: силовой трансформатор, микропроцессорный блок управления, цифровой осциллограф, оптический трансформатор.

Задачи ВКР:

- анализ методик определения повреждений активной части силового трансформатора;
- разработка методики оценки технического состояния активной части силового трансформатора с программной реализацией;
- создание программного продукта предиктивного анализа активной части силового трансформатора в режиме реального времени;
- разработка бизнес-плана для коммерциализации программного продукта предиктивного анализа активной части силового трансформатора.

1 Бизнес-план

1.1 Основная цель и сущность стартап проекта

Проект направлен на разработку серийного устройства, обеспечивающего мониторинг и диагностику силовых трансформаторов в режиме реального времени без вывода его из работы. Ключевая особенность системы - использование методов предиктивной аналитики в определении значения параметра характеризующего остаточный ресурс оборудования – силового трансформатора. Цель проекта – снижение количества первичных средств измерения, устанавливаемых на силовом трансформаторе без снижения точности и качества диагностики и мониторинга. Результат реализации проекта – серийное устройство, блок мониторинга силового двухобмоточного трансформатора, с функциями диагностики неисправностей и определением значения параметра, характеризующего его остаточный ресурс. Блок мониторинга может использоваться как в составе автоматизированной системы управления трансформаторной подстанцией, а также как самостоятельная система. Основными потребителями результатов проекта являются промышленные предприятия, имеющие в своем составе подстанции с классом напряжения 35-110 кВ, сетевые компании, ПАО «Россети», а также генерирующие компании.

1.2 Основные цели и задачи

Целью стартапа является создание системы неразрушающего контроля и мониторинга состояния силового трансформатора с функциями предиктивной аналитики

1.3 Описание инновационной идеи

Основой реализации продукта являются результаты проведенного научного исследования в области определения параметров технического состояния силового трансформатора с использованием принципов мониторинга в реальном времени. Разработанный алгоритм и авторский подход в области мониторинга силовых трансформаторов показывает, что точность определения его технического состояния на 30% выше, в сравнении с конкурентами [26]. Отличительной особенностью разрабатываемой системы мониторинга является определения технического состояния активной части силового трансформатора в режиме реального времени с точностью, позволяющей определить конкретную область его деформации.

1.4 Стадия развития стартап проекта на момент составления бизнес-плана

В данный момент идёт подготовка к имплементированию написанного алгоритма в блок управления для последующего тестирования системы на реальном объекте.

1.5 Состав конкретных мероприятий, которые планируется реализовать по завершении Договора

После завершения Договора, планируется провести сбор предзаказов на блоки системы мониторинга с целью формирования конкретного предложения для потребителей. Помимо этого, планируется так же принять участие в энергетической конференции в декабре 2024-го года.

1.6 Средства необходимые для развития стартап проекта

Для реализации проекта необходимы денежные средства в размере 17 432 000 рублей, которые будут направлены на закупку необходимого вычислительного оборудования, закупку сырья и фонд оплаты труда.

1.7 Ключевые факторы успеха

Ключевым фактором успеха является создание системы мониторинга силового трансформатора погрешность вычислений, которой не превышает 9%, наработка на отказ составляет не менее 50000 часов и корректность передачи данных без потерь между уровнями по протоколам связи Modbus RTU/TCP и 4-20 мА.

1.8 Наименование продукции

Система мониторинга технического состояния силового трансформатора.

1.9 Назначение и область применения

Система предназначена для использования в составе автоматизированной системы управления технологическими процессами на объектах электросетевого комплекса, а также других организаций, имеющих в своем составе большое число трансформаторных подстанций, требующих контроля и диагностики в режиме реального времени. Потенциальными секторами применения разработанного продукта могут являться:

- электроэнергетический;
- нефтегазовый;
- промышленный;
- сырьевой.

В промышленном секторе создаваемый продукт применим в легкой и тяжелой промышленности, а также коммунальном хозяйстве. В сырьевой промышленности установка разработанной системы мониторинга может быть произведена на электрогенерирующих электростанциях вблизи объектов переработки сырья. Также вышесказанное можно отнести к нефтегазовому сектору и непосредственно электроэнергетическому.

1.10 Перспективы выпуска и конкурентоспособность

Постоянный мониторинг системой параметров, характеризующих техническое состояние силового трансформатора, позволяет использовать данные при расследовании аварийных ситуаций, в том числе и с повреждением оборудования как в гарантийных случаях, так и в период окончания гарантийных обязательств. Кроме того, использование системы мониторинга на вновь установленном, новом, силовом трансформаторе позволит, в случае наличия, определить зарождающийся дефект или производственный брак [27].

На сегодняшний день наиболее известными мировыми производителями систем мониторинга силовых трансформаторов являются Qualitrol, GE Energy, FISO и др.

Qualitrol и GE Energy зарекомендовали себя как компании производящие системы, основанные на анализе растворенных газов в трансформаторном масле. В современных реалиях, ввиду отсутствия альтернативы, данным компаниям удалось занять лидирующие позиции не только на международном, но и на российском рынке. Тем не менее, помимо отсутствия альтернативы, главным недостатком систем мониторинга, производимых вышеперечисленными компаниями, является использование дополнительного оборудования для функционирования подобных систем мониторинга. Существует две вариации системы мониторинга растворенных газов в трансформаторном масле. Первая нуждается в использовании

специализированных газов для вычислений хроматографического спектра, что в свою очередь загромождает систему и вызывает неудобства в виде контроля количества газа в баллонах. Вторая вариация системы мониторинга растворенных газов способна функционировать без использования специализированных газов, однако стоимость подобных систем может быть кратно выше первой вариации. К тому же, на рынке заметна ситуация с необоснованной погоней за количеством отслеживающих газов, когда для определения состояния технического состояния может быть достаточно 5 штук. Таким примером является устройство Camlin TOTUS G9 от компании KAMLIN.

На российском рынке наиболее крупными компаниями, выпускающими системы мониторинга трансформаторов являются Димрус, Мирономика, Группа СВЭЛ и др.

Российские компании в первую очередь предлагают схожие устройства мониторинга с вышеперечисленными зарубежными производителями. Однако данные устройства являются либо их точной копией, либо тем же самым устройством, произведенным иностранной компанией только с логотипом отечественного производителя. Тем не менее можно выделить компанию Димрус, которая последние несколько лет популяризирует систему мониторинга частичных разрядов как самостоятельную систему либо как дополнение к другим. Недостатком данной системы является отсутствие возможности контролировать техническое состояние обмоток и магнитной системы силового трансформатора, которые являются основополагающими элементами в его конструкции.

Современный рынок планомерно начинает переход от реактивного к предиктивному подходу взаимодействия человека с оборудованием. Последние годы государство, электросетевые и электрогенерирующие компании требуют установки систем предиктивной аналитики позволяющей прогнозировать и рассчитывать остаточный ресурс оборудования.

Большинство же систем сегодня способно лишь анализировать текущее техническое состояние устройства. Подведем итоги анализа конкурентов:

- отсутствие альтернативы;
- высокая стоимость;
- намеренное усложнение конструкции системы мониторинга;
- отсутствие новаторских решений;
- отсутствие прогнозирования эксплуатационного ресурса.

По результатам проведенного анализа конкурентов были выявлены следующие преимущества:

- использование минимально необходимых средств измерения для максимально точного определения фактического технического состояния силового трансформатора;
- система основана на методе неразрушающего контроля (интеграция разрабатываемой системы происходит в уже имеющееся оборудование на электрической подстанции);
- разрабатываемая система способна с высокой точностью прогнозировать развитие дефектов в силовом трансформаторе в период его эксплуатации;
- определение фактического технического состояния обмоток и магнитной системы силового трансформатора в режиме реального времени;
- максимально допустимое использование силового трансформатора в работе с минимальной вероятностью возникновения в нем критического дефекта.

1.11 Краткое описание и основные технико-экономические и потребительские характеристики

Предлагаемая система мониторинга является вторым уровнем автоматизированной системой управления технологическим процессом и

связывает между собой как первый, так и третий уровни. Определение всех параметров происходит в режиме реального времени. Также в режиме реального времени происходит корректировка параметров, характеризующих остаточный ресурс работы силового трансформатора по авторскому алгоритму [20].

Основной технический элемент – блок мониторинга.

Блок мониторинга предназначен для определения параметров состояния силового трансформатора, а также параметров, характеризующих остаточный ресурс [10].

Блок мониторинга позволит передавать данные на верхние уровни автоматизированной системы управления технологическим процессом (при ее наличии) или запись значений в базу данных для последующего использования организацией, эксплуатирующей подстанцию.

Мониторинговая система совместима с остальными компонентами автоматизированной системы управления технологическим процессом через информационную шину.

Блок системы мониторинга будет обладать следующими характеристиками:

- интерфейсы связи: 4 × Ethernet 10/100 Мбит/с (RJ45), 2 × RS-485, 1×RS-232, USB Device;
- интерфейс HDMI для возможности подключения человеко-машинного устройства вывода;
- поддержка промышленных протоколов Modbus RTU/ASCII/TCP, OPC UA (Server), MQTT (client/broker), SNMP (Manager/Agent);
- поддержка GSM/GPRS-модемов;
- поддержка прикладных протоколов NTP, FTP, FTPS, HTTP, HTTPS, SSH, SMTP/IMAP/POP3, OpenVPN, WireGuard;
- возможность подключения к СУБД MySQL и MsSQL;
- процессор ARM® Cortex-A8 с частотой 800 МГц.

1.12 Степень готовности

На данный момент продукт близок к критериям заложенным в первоначальный «Минимально-жизнеспособный продукт».

1.13 Размер рынка

Исходя из анализа статистических данных программы СБИС, объем целевого рынка производителей устройств мониторинга комплектующих трансформаторные подстанции и силовые трансформаторы, в частности, на момент 2021 года составляет 22,42 миллиарда рублей, где 33,4% от общей суммы приходится на микропроцессорные устройства мониторинга. На начальном этапе производства системы мониторинга и остаточного ресурса силового трансформатора планируется занять долю рынка объемом 464 805 000 рублей.

1.14 Темпы роста рынка, фаза развития спроса

По данным Росстата рост рынка в области производства силовых, а также распределительных трансформаторов составил порядка 21%. Так же по вышеприведенным данным из министерства энергетики свыше 30% всех объектов электрогенерации имеют серьезный износ, что в свою очередь свидетельствует о необходимости мониторинга технического состояния нового и введенного ранее оборудования.

1.15 Прогнозы развития отрасли

Инновационная цифровая инфраструктура занимает все более заметное место в электросетях, как распределительных, так и передающих, причем в 2022 году рост инвестиций составит около 7 % по сравнению с 2021 годом.

На сектор распределения приходится около 75 % всех инвестиций в цифровую инфраструктуру, связанную с электросетями, благодаря внедрению «умных» счетчиков и автоматизации подстанций, фидеров, линий и трансформаторов за счет установки датчиков и устройств мониторинга [21].

Инвестиции в цифровизацию в сфере распределения также включают в себя специальные цифровые инструменты, такие как распределенные системы управления энергией (DERMS). Они способны использовать потенциал растущих объемов гибких ресурсов, таких как малые возобновляемые электростанции, пункты зарядки электромобилей и аккумуляторные системы хранения энергии, для решения локальных проблем сети для краткосрочных нужд, таких как регулирование напряжения и управление перегрузками. Кроме того, такие инструменты могут помочь операторам распределительных систем (DSO) оптимизировать свои долгосрочные инвестиции, учитывая потенциал гибкости распределенных энергетических ресурсов (DER) в качестве альтернативы усилению сети, в том числе при планировании сети.

Значительные инвестиции и прогресс были достигнуты в инфраструктуре общественного электротранспорта, который продолжал значительно расти в 2022 году, увеличившись за год более чем на 75 %. Интеллектуальные сети могут эффективно интегрировать зарядку электромобилей в сеть, обеспечивая видимость и контроль, необходимые для устранения узких мест в сети [42].

В секторе передачи электроэнергии инвестиции в цифровые технологии направлены на цифровизацию оборудования, такого как силовые трансформаторы, автоматизацию подстанций, разработку гибких систем передачи переменного тока (FACTS) и современных датчиков, таких как фазоизмерительные приборы, что позволяет ускорить и повысить гибкость работы и улучшить управление, мониторинг и оптимизацию энергосистемы.

Еще один аспект, который приобретает все большее значение, — это устойчивость сетей к стихийным бедствиям. В настоящее время внедряется все больше новых цифровых технологий, таких как блоки предотвращения искр, которые помогают предотвратить лесные пожары (например, кустарниковые пожары в Австралии), или технологии, объединяющие географическую информацию и анализ спутниковых изображений для прогнозирования потенциального ущерба электросетевым активам, например, ущерба от падения деревьев или веток вблизи линий электропередач.

1.16 Основные и потенциальные конкуренты

Основным конкурентом является DIMRUS (Димрус), компания выпускает системы мониторинга для основного оборудования энергетических предприятий. Сильными сторонами Димруса является огромный спектр уже испытанных технологий и сильная клиентская база. Компания не зациклена только на продажах произведённого оборудования, она стремится заявить о себе любым доступным способом, например, организуя учебный центр ДИМРУС. Помимо участия в выставках и Экспо, компания так же организует ежегодные конференции, на которых рассматриваются научные новшества и тренды.

1.17 Конечные потребители

Потенциальные потребители продукта проекта — производители трансформаторного оборудования, промышленные предприятия имеющие собственные трансформаторные подстанции, метрополитен, ПАО «РЖД», ПАО «Россети» и генерирующие компании. Для каждого потенциального потребителя продукта основной мотивацией является снижение эксплуатационных затрат на текущее обслуживание и ремонт оборудования, а также продление срока службы силовых трансформаторов за счет

корректировки режима работы и загрузки в зависимости от текущего технического состояния. Система мониторинга обеспечивает контроль состояния силового трансформатора в режиме реального времени и определяет критические режимы работы. Система мониторинга информирует эксплуатирующий персонал о критических режимах работы трансформатора в режиме реального времени, что дает возможность персоналу своевременно предотвращать аварийные ситуации. Система обеспечивает эксплуатирующий персонал данными о сроке службы силового трансформатора в режиме реального времени, что снижет риск развития аварийных ситуаций. При возникновении гарантийных споров между заводом изготовителем и эксплуатирующей организацией, завод изготовитель сможет получать полный и развернутый объем данных о техническом состоянии силового трансформатора для установления причины выхода из строя оборудования.

1.18 Конкурентные преимущества продукции конкурентов и предприятия

Система мониторинга реализуется на уникальных авторских расчетных методиках и программных алгоритмах. Все разрабатываемые программные алгоритмы и расчетные методики проходят апробацию, верификацию и тестирование.

Возможность адаптировать систему мониторинга под требования конкретного заказчика.

Возможность автономной работы системы, т.е. без использования внешних каналов связи, что повышает безопасность информационных данных и кибербезопасность системы для заказчика.

Мониторинг параметров режима работы силового трансформатора, а также определение его технического состояния на основании минимального набора входной информации в режиме реального времени.

Минимальный набор вводимой информации для работы системы определяет высокую скорость монтажа и ввода в эксплуатацию системы на территории заказчика и, как следствие, конечную стоимость системы.

Мониторинг параметров состояния силового трансформатора происходит в режиме реального времени с передачей информации в базу данных, что позволяет вести накопление данных не только в нормальном режиме работы, но и в аварийных, предаварийный и послеаварийных.

Цена блока мониторинга и пакета программ для конечного потребителя будет отличаться в меньшую сторону от средней цены конкурентов; по предварительным расчётам, цена нашего продукта составит 495 000 рублей за базовую версию. Аналогичное по исполнению устройство мониторинга «TDM-M» от компании ООО «Димрус» стоит порядка 800 000 рублей

1.19 Планируемая доля рынка

Планируется занять долю рынка равную 10% от всех продаваемых систем мониторинга

1.20 Обоснование цены на продукцию

Цена на продукцию сформирована на основании годовых затрат на производство систем мониторинга, включая цикл выпуска продукции и оплату заработной платы сотрудников.

1.21 План продвижения разработанного продукта

Планируется организовать широкую рекламную кампанию через участие в отраслевых конференциях по типу «Нефтегаза». Помимо этого, так же планируется участие в научных и научно-технических конференциях для популяризации методики предиктивной аналитики.

1.22 Организация сбыта

Организационная схема предприятия устроена следующим образом:

- получение заказа;
- составление коммерческого предложения;
- составление технического задания;
- согласование технического задания;
- выставление счета;
- оплата счета;
- выполнение технического задания;
- передача готового продукта заказчику.

Характеристики производства: чистовое производство (заказ всех необходимых компонентов для реализации продукта с последующей сборкой на предприятии) Планируемый объем выпускаемой продукции – 97 единиц систем мониторинга.

Вывод по разделу.

В данном разделе был описан бизнес-план, который в последующем будет использован для продвижения программного продукта, разработанного в ходе написания ВКР. Была описана существующая ситуация в энергетической отрасли, а также перспективы её развития; вследствие чего были выявлены отраслевые тренды.

Так же был произведён анализ конкурентных преимуществ разрабатываемого продукта в сравнении с уже имеющимися на рынке системами мониторинга силового трансформатора. Благодаря наличию предиктивной аналитики в блоке мониторинга, было обосновано ключевое конкурентное преимущество, что послужило основным фактором в формировании предложения для потребителей, на который будет опираться последующая рекламная компания, а также компания по продвижению развития производства.

В заключении была обоснована стоимость программного комплекса в основание которой было положено затраты на производство и обеспечение кадрового персонала в всеми необходимыми ресурсами для нормального выстраивания технологических процессов.

2 Анализ методик определения повреждений активной части силового трансформатора

Для определения способов диагностики трансформаторов необходимо на первом этапе производственной практики изучить и классифицировать повреждения возникающие в трансформаторах в процессе их эксплуатации на предприятиях и в организациях.

В рамках прохождения производственной практики были рассмотрены трансформаторы с масляной изоляцией общего назначения, согласно указанной во введении классификации – это силовые трансформаторы. Стоит отметить, что типы и виды повреждений силовых трансформаторов с масляной изоляцией не зависят от того, где они установлены и как происходит их эксплуатация, т.е. сама по себе эксплуатация может вызывать различные повреждения силовых трансформаторов с масляной изоляцией, однако уровень эксплуатации определяет не характер возможных повреждений, а возможность как можно более раннего выявления проявляющихся отклонений от нормы, проведения требуемого объема профилактических работ, качественного ремонта. Чем лучше на предприятии или в организации поставлена работа служб эксплуатации электрооборудования, в том числе и силовых масляных трансформаторов, тем меньше риск возникновения и появления серьезных и сложно устранимых дефектов.

«В работе представлены статистические данные по повреждениям силовых трансформаторов с масляной изоляцией классов напряжения 35 кВ и выше. Согласно этому предложена следующая классификация повреждений трансформаторов:

- повреждения обмоток;
- повреждения магнитопровода;
- повреждения системы охлаждения;

- повреждения устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН);
- повреждения вводов;
- повреждения вызванные течью масла;
- повреждения вызванные упуском масла. [3]»

Анализ частотных характеристик является широко используемым методом диагностики механических изменений в обмотке трансформатора. В основном, основной функцией АЧХ является определение повреждений на активные части трансформатора (обмотки, выводов и сердечника). Также сообщалось, что методом АЧХ может определять немеханические изменения, такие как температура и влажность изоляции обмотки. АЧХ является комплексным методом оценки состояния трансформатора. Метод АЧХ — это сравнительный тест, для которого требуются эталонные данные для сравнения. Поэтому любые различия между двумя измерениями свидетельствуют о наличии неисправности.

Измерение АЧХ проводится путем подачи небольшого синусоидального сигнала переменного напряжения на разных частотах. Этот сигнал подается на один конец обмотки трансформатора и измеряется выходной сигнал на другом конце обмотки. Соотношение между измеренным и инжектированным сигналами называется передаточной функцией. Передаточная функция несет информацию о емкости, сопротивлении, взаимной индуктивности, индуктивности обмотки и сердечника. Поэтому изменения в обмотке и сердечнике трансформатора сердечника изменяют его передаточную функцию. Передаточная функция покажет эти изменения в амплитуде и фазе измеряемого сигнала.

Между трансформатором и оборудованием АЧХ имеется четыре измерительных соединения. К ним относятся обрыв в конце обмотки, короткое замыкание в конце обмотки, емкостное межобмоточное соединение и индуктивное межобмоточное соединение. Прибор АЧХ может получить передаточную функцию напряжения обмотки в диапазоне частот от 20 Гц до

2 МГц. Этот диапазон частот затем делится на поддиапазоны, чтобы интерпретировать результаты АЧХ. Эти поддиапазоны отличаются от одного трансформатора к другому. Поддиапазоны АЧХ зависят от размера трансформатора, его типа и расположения. В литературе предложено несколько статистических методов для интерпретации результатов измерения АЧХ измерения. Например, коэффициент корреляции (КК) в, абсолютная сумма логарифмической ошибки (АСЛО).

Измерение АЧХ – это мощный метод диагностики для обнаружения смещения обмотки. Она заключается в измерении передаточных функций обмоток трансформатора в широком диапазоне частот и сравнении результатов этих измерений с эталонным набором. Существует два способа подачи сигнал необходимого широкого диапазона частот, либо путем подачи импульса в обмотку, либо проведением частотной развертки с помощью синусоидального сигнала.

Основным преимуществом метода импульсной характеристики перед методом развертки частоты является более короткое время измерения время измерения, но не равная или почти равная точность и точности во всем диапазоне измерений. Точность и достоверность результатов БПФ ограничены временем выборки и количеством полученных данных, однако метод импульсной характеристики имеет широкие возможности для развития диагностические технологии

На рисунке 6 представлены статистические данные по количеству повреждений обмоток силовых трансформаторов классов напряжения 35 кВ и выше.

Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год. Из рисунка 6 видно, что общее число повреждений обмоток силовых трансформаторов напряжением 35 кВ и выше составляет 248 шт.

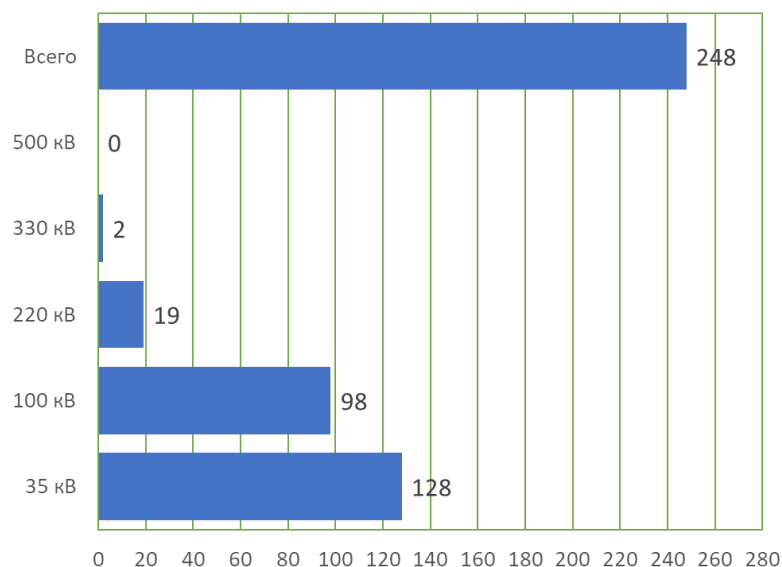


Рисунок 6 – Распределение числа повреждений возникающих в обмотке трансформаторов по классам напряжения

На рисунке 7 представлены статистические данные по количеству повреждений магнитопровода силовых трансформаторов классов напряжения 35 кВ и выше. Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год. Как видно из рисунка 7 повреждение магнитопровода зарегистрированы для трансформаторов классов напряжения 220 кВ и 330 кВ. Общее число зарегистрированных повреждений магнитопровода составляет 6 шт.

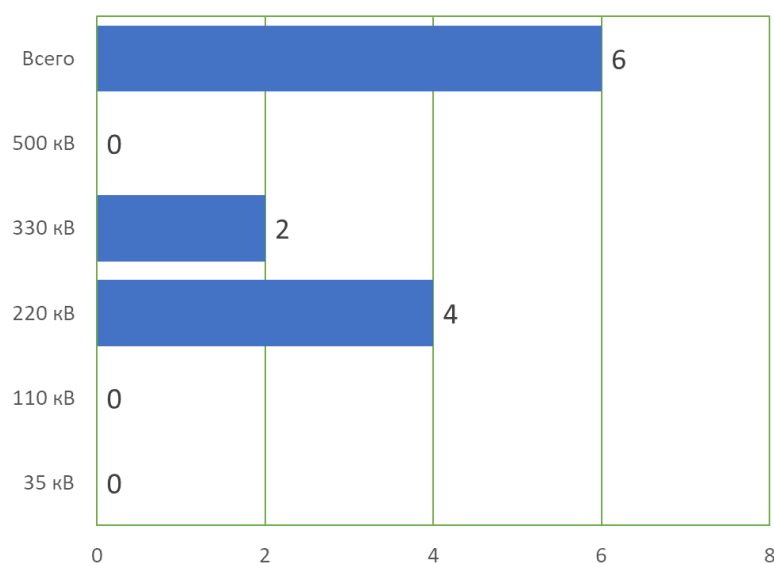


Рисунок 7 – Распределение числа повреждений, возникающих в магнитопроводе трансформаторов по классам напряжения

На рисунке 8 представлены статистические данные по количеству повреждений, связанных с системой охлаждения силовых трансформаторов классов напряжения 35 кВ и выше. Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год. Как видно из рисунка 8 повреждение связанные с системой охлаждения встречаются у трансформаторов всех классов напряжения. Общее число зарегистрированных повреждений магнитопровода составляет 67 шт.

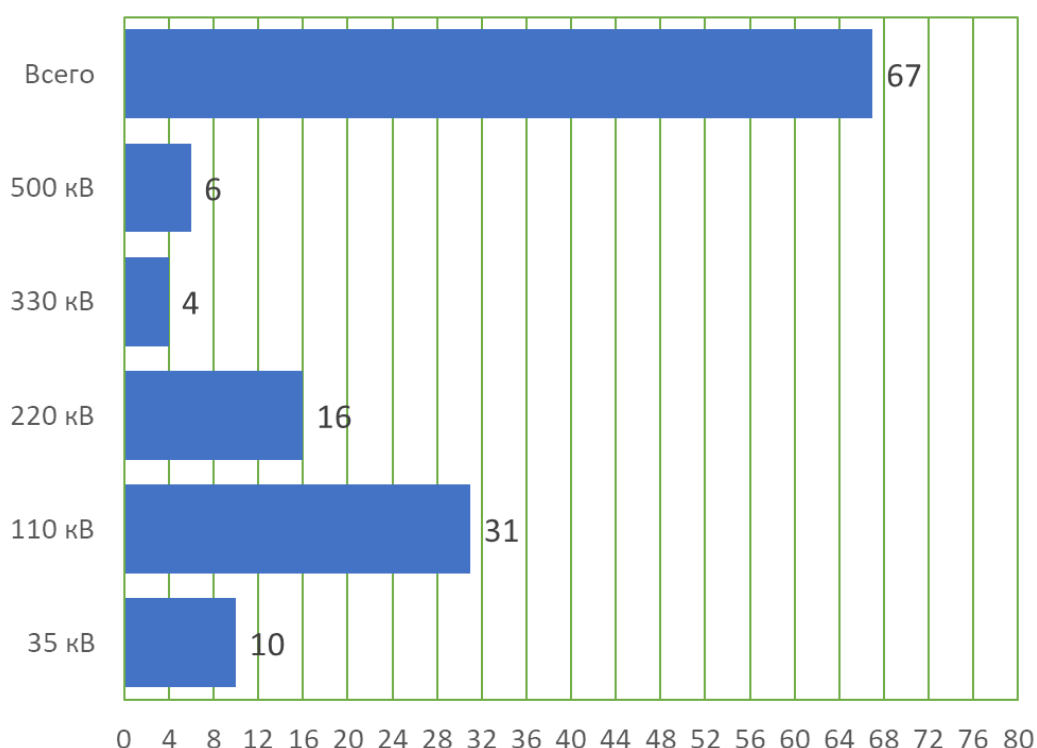


Рисунок 8 – Распределение числа повреждений, возникающих в системе охлаждения трансформаторов по классам напряжения

На рисунке 9 представлены статистические данные по количеству повреждений, связанных с системой РПН силовых трансформаторов классов напряжения 35 кВ и выше. Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год. Как видно из рисунка 9 повреждение связанные с системой охлаждения встречаются у трансформаторов всех классов напряжения. Общее число зарегистрированных повреждений магнитопровода составляет 181 шт.

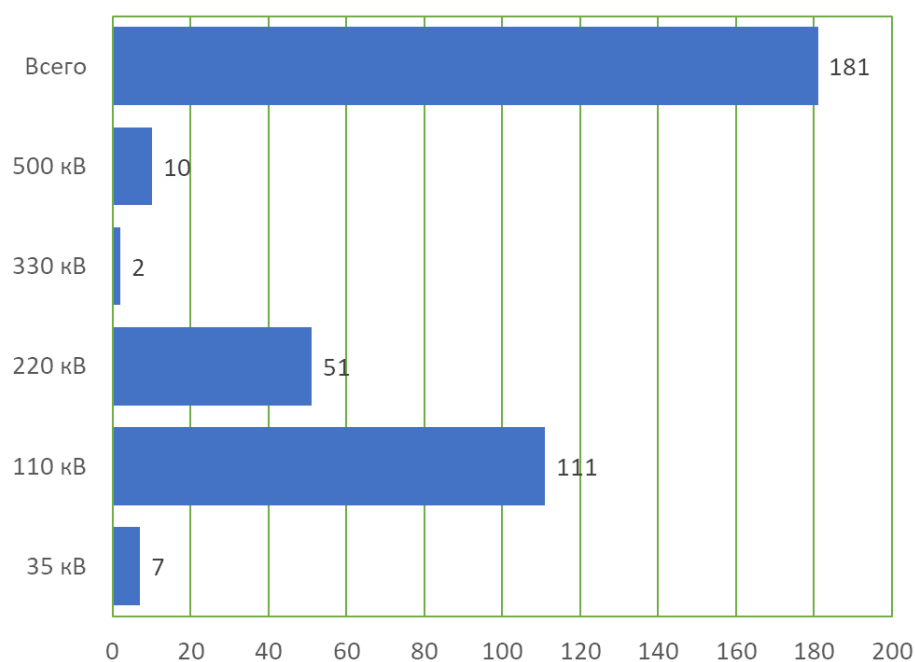


Рисунок 9 – Распределение числа повреждений, возникающих в системе РПН трансформаторов по классам напряжения

Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год. Как видно из рисунка 10 повреждение связанные с высоковольтными вводами встречаются у трансформаторов всех классов напряжения. Общее число зарегистрированных повреждений магнитопровода составляет 319 шт.

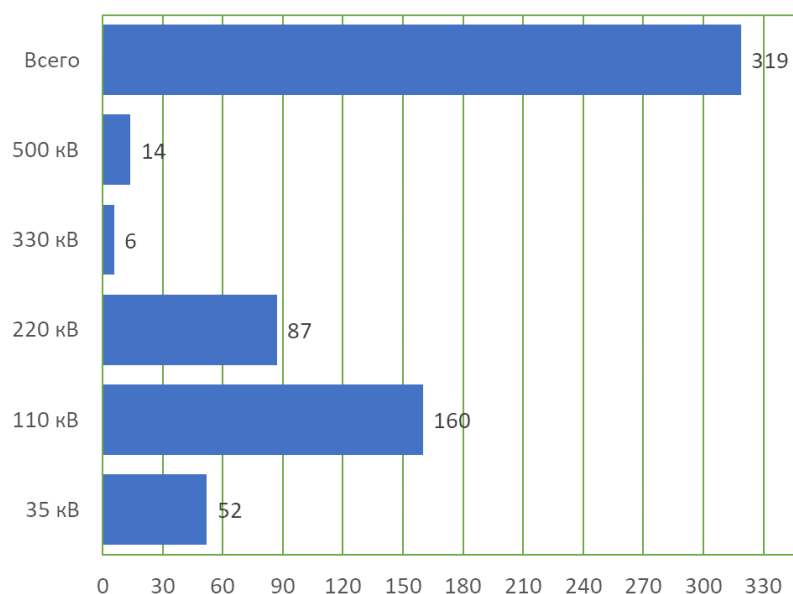


Рисунок 10 – Распределение числа повреждений, возникающих в высоковольтных вводах трансформаторов по классам напряжения

На рисунке 11 представлены статистические данные по количеству повреждений, связанных с течью масла из баков силовых трансформаторов классов напряжения 35 кВ и выше. Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год. Как видно из рисунка Рисунок повреждение связанные с течью масла из баков встречаются у трансформаторов всех классов напряжения. Общее число зарегистрированных повреждений магнитопровода составляет 147 шт.

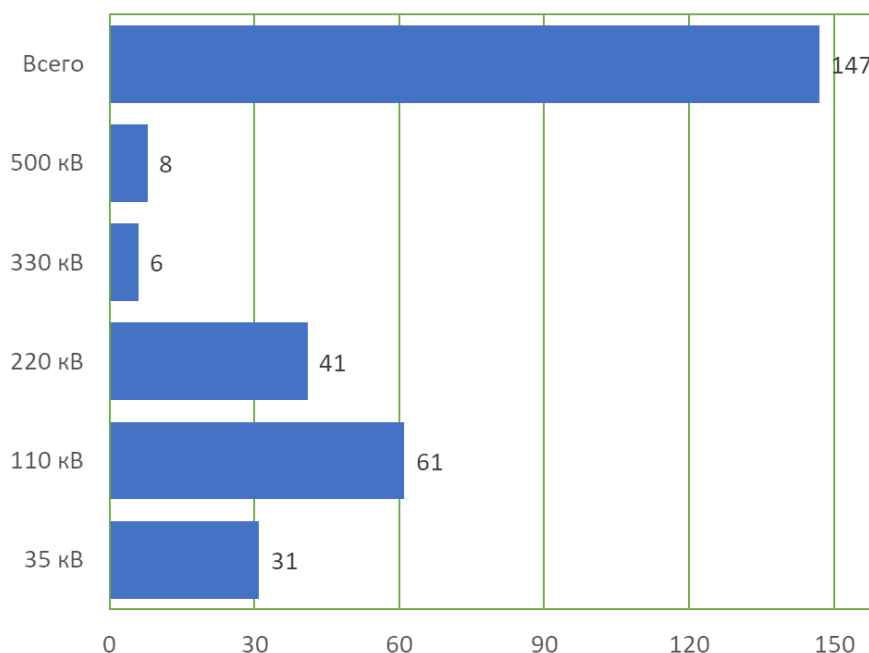


Рисунок 11 – Распределение числа повреждений, связанных с течью масла из бака силовых трансформаторов по классам напряжения

На рисунке 12 представлены статистические данные по количеству повреждений, связанных с упуском масла из баков силовых трансформаторов классов напряжения 35 кВ и выше. Данные представлены для периода с 2007 по 2017 год.

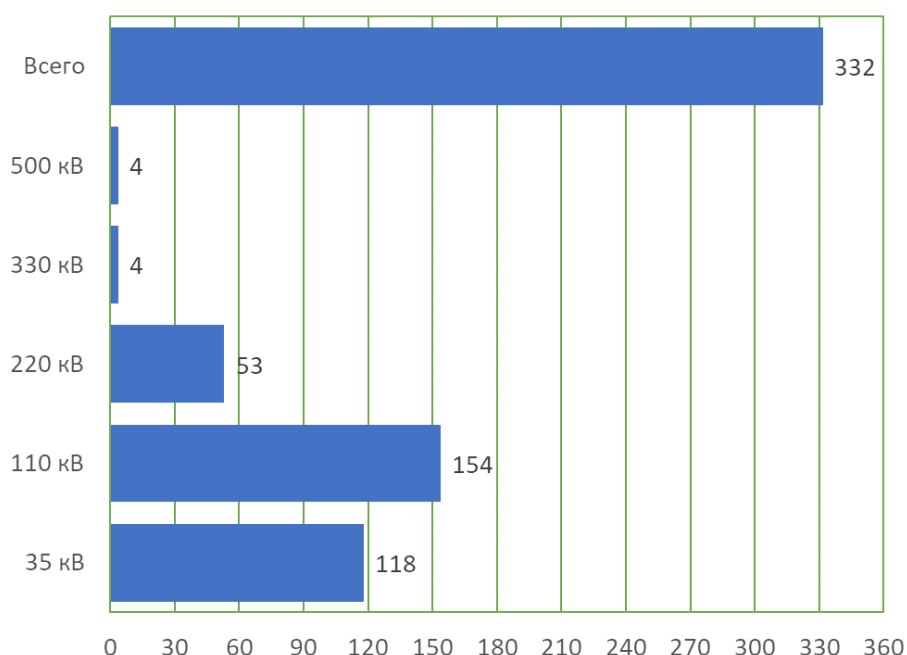


Рисунок 12 – Распределение числа повреждений, связанных с упуском масла из бака силовых трансформаторов по классам напряжения

Как видно из рисунка 12 повреждение связанные с упуском масла встречаются у трансформаторов всех классов напряжения. Общее число зарегистрированных повреждений магнитопровода составляет 332 шт.

Для определения наиболее часто встречающихся повреждений составим диаграмму, представленную на рисунке 13. Из диаграммы на рисунке 13 наиболее распространенным видом повреждения является упуск масла, на втором месте является повреждение высоковольтных вводов.

Анализ частотных характеристик широко используется для определения состояния обмоток и сердечника трансформатора. Этот метод использует электрические передаточные функции обмоток трансформатора в широком диапазоне частот. Низкое напряжение с сигналом переменной частоты подается на один вывод обмотки, а сигнал отклика измеряется на другом выводе. Измеренная частотная характеристика конкретной обмотки затем сравнивается с имеющимися эталонными данными [23]. На частотную характеристику конкретного трансформатора сильно влияет соотношение сопротивлений, индуктивностей и емкостей в структуре его обмотки. Поскольку частотная характеристика уникальна для конкретного

трансформатора, можно разработать сигнатуру характеристики отдельного трансформатора для последующих измерений.

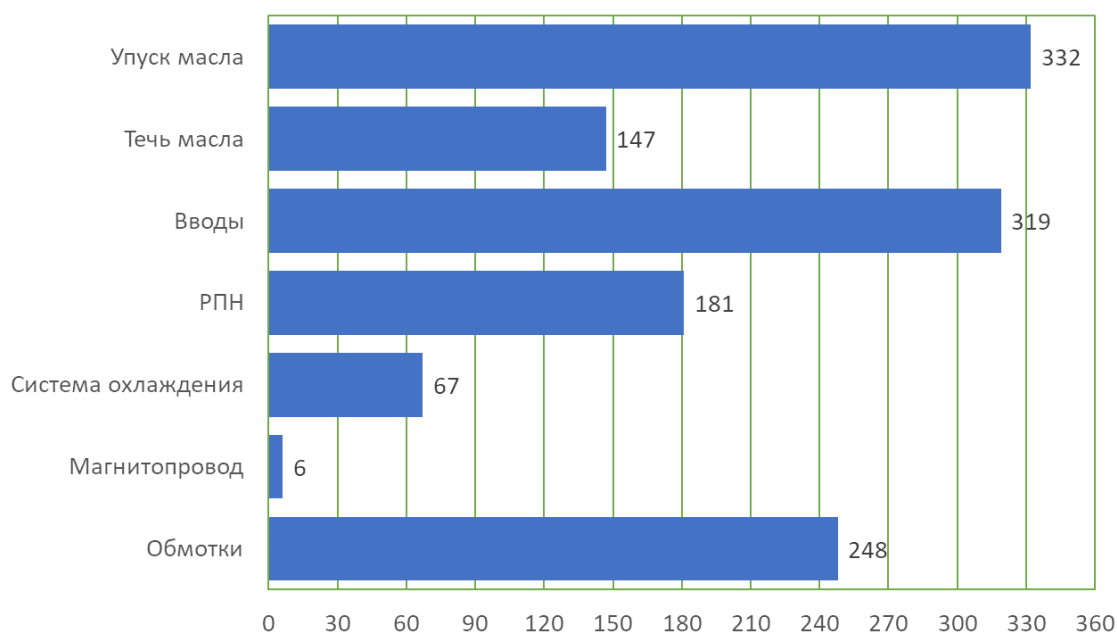


Рисунок 13 – Распределение числа по видам для силовых трансформаторов с масляной изоляцией

На сегодняшний день методы мониторинга состояния трансформатора с помощью АЧХ успешно помогают инженерам обнаруживать аномалии в трансформаторах, включая деформацию и смещение обмоток, замыкание или обрыв витков, неисправное заземление, перемещение сердечника, а также другие проблемы внутренней структуры и соединений. Однако, учитывая тот факт, что на частотную характеристику также очень сильно влияют многие факторы внутри трансформатора, необходимы дальнейшие исследования для изучения возможных влияющих параметров, таких как: остаточный магнетизм сердечника, температура масла и обмотки, уровень влажности и структура обмотки [17].

Частота для измерения обычно составляет от 20 Гц до 2 МГц, хотя некоторые исследователи используют частоты до 25 МГц. Величина отклика обычно изображается на диаграмме Боде, где горизонтальная и вертикальная оси представляют входную частоту и величину отклика, соответственно

Общий диапазон частот измерения можно разделить на различные участки, на которых частотная характеристика чувствительна к дефектам на отдельных компонентах структуры обмотки. Обычно весь диапазон частот делится на 3 участка, а именно:

- низкочастотный диапазон (до 20 кГц). В этом диапазоне частотная характеристика в основном определяется индуктивностью цепи.
- среднечастотный диапазон (от 20 кГц до 400 кГц). В этом диапазоне частот отклик определяется комбинацией индуктивности и емкости цепи, что может привести к возникновению нескольких резонансов.
- высокочастотный диапазон (выше 400 кГц). В этом диапазоне частот отклик обмотки определяется емкостью контура.

Метод контроля трансформатора по растворенным в масле газам весьма показателен, но с его помощью невозможно диагностировать отклонения в магнитной системе. Трансформаторное масло используется в качестве диэлектрика и непосредственного охлаждения активной части силового трансформатора [37]. В процессе эксплуатации трансформатора, при нарушении целостности изолятора и его перегреве, выделяется газ, который растворяется в масле. Для оценки технического состояния прибора используется хроматографический анализ, с помощью которого можно выявить или предположить тип неисправности прибора. Данный способ оценки технического состояния силового трансформатора регулируется РД 153-34.0-46.302-00.

На рисунке 14 представлено дерево повреждений трансформатора, на котором наглядно показан характер каждого из повреждений.



Рисунок 15 – Силовой трансформатор ТДН-16000/100У1

В таблице 2 приведены неисправности в соответствии с выделяемыми газами.

Таблица 2 – Первичные газы выделяющие в процессе эксплуатации силового трансформатора

Неисправность	Вырабатываемый газ в процессе эксплуатации трансформатора		
	CO	H_2	H_2O
Деградация бумажной изоляции	да	нет	+
Разложение масла	-	*	???
Утечка масла	-	-	+
Температурное разрушение целлюлозы	*	*	-
Перегрев металло-сердечника	*	*	-
Локальные перегревы (от 150°C до 300°C)	-	*	-
Локальные перегревы (от 300°C до 700°C)	-	*	-
Локальные перегревы (свыше 300°C)	-	*	-
ЧР	-	*	-
Искрение	-	*	-

В таблице 3 представлены методики анализа растворенных газов в масле силовых трансформаторов с описанием дефектов и повреждений конструкционных частей трансформатора в зависимости от состава и уровня растворенных газов.

Таблица 3 – Методики анализа газа и типы дефектов

Название метода	Описание метода	Типы дефектов	Выделяемые газы
Ключевой газ	анализ концентрации отдельных газов	частичные разряды, искрение, перегрев масла, перегрев целлюлозы	CO , H_2 , C_2H_2 , C_2H_4
Соотношения Доренберга	анализ соотношения четырех пар углеводородных газов	термическое разложение, частичные разряды, искрение	H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6
Соотношения Роджерса	анализ соотношения трех пар углеводородных газов	нормальное старение, частичные разряды, искрение, перегревы до 300 °С, перегревы от 300 °С до 700 °С, перегревы свыше 700 °С	H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6
Соотношения ИЕС	анализ соотношения трех пар углеводородных газов	низкоэнергетический разряд, высокоэнергетический разряд, частичные разряды, искрение, перегревы до 300 °С, перегревы от 300 °С до 700 °С,	H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6
Треугольник Дюваля	анализируется три газа соответствующие увеличению энергии или температуры разложения масла	низкоэнергетический разряд, высокоэнергетический разряд, частичные разряды, искрение, перегревы до 300 °С, перегревы от 300 °С до 700 °С,	H_2 , C_2H_2 , C_2H_4
Пятиугольник Дюваля	анализируются пять газов соответствующие увеличению энергии или температуры разложения масла	нормальное старение, низкоэнергетический разряд, высокоэнергетический разряд, частичные разряды, искрение, перегревы до 300 °С, перегревы от 300 °С до 700 °С	H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_2H_6

Вывод по разделу.

В данном разделе был проведён сравнительный анализ уже имеющихся методик мониторинга состояния силовых трансформаторов в ходе анализа также были выявлены преимущества и недостатки каждого из методов определено их место и распространенность. всего благодаря этому анализу была собрана вся необходимая информация для разработки собственной методики оценки технического состояния трансформатора разработкой программного продукта. также дополнительно были рассмотрены некоторые из повреждений силовых трансформаторов так или иначе влияющих на его работоспособность.

Проведенный анализ показал, что наиболее распространенным типом повреждения силового трансформатора с масляной изоляцией является упуск масла из бака силового трансформатора возникающий вследствие не герметичности последнего. Вторым по распространенности является повреждение высоковольтных вводов силового трансформатора.

Так же был произведён обзор реальной статистики повреждений трансформаторов исходя из их класса напряжения, что даёт более детальное представление о ситуации с состоянием силового трансформаторного оборудования. Данная статистика так же будет учитываться как в процессе создания программы мониторинга силовых трансформаторов, так и в последующих компаниях по продвижению и развитию разработанного продукта.

3 Разработка методики оценки технического состояния активной части силового трансформатора с программной реализацией

Специально для разработки методики оценки состояния силового трансформатора с функцией предиктивной аналитики был разработан специализированный стенд в его основу был положен частотный генератор, осциллограф однофазный трансформатор, первоначально использовался аналоговый осциллограф, но затем он был изменён на цифровой с гораздо более лучшим аналоговой цифровой преобразователем, который позволил расширить возможности стенда по снятию частотных характеристик, а так же по автоматизации обработки полученного сигнала [1].

Также стоит отметить то, что первоначальный трансформатор, положенный в основу моделирования затем, был изменён на серию других трансформаторов, которые были использованы для лучшего понимания методики снятия частотных характеристик. Первичный анализ технического состояния обмоток и магнитопроводов высокого и низкого напряжения был проведен в соответствии с ГОСТ 59239-2020 (IEC60076-18:2012) «Трансформаторы силовые и реакторы. Метод измерения частотных характеристик».

Для определения электрических параметров в физических цепях трансформаторов используется другой вид частотных характеристик – импедансы точки возбуждения. Эти частотные характеристики отличаются от тех, которые предлагаются международными стандартами (коэффициенты напряжения), и поэтому называются нестандартными частотными характеристиками. Всего существует четыре конфигурации нестандартных измерений, а именно: импеданс точки размыкания, короткого замыкания, индуктивный и емкостной импедансы [7].

Перед проведением эксперимента были изучены соответствующие научные работы [4,6] вследствие чего был определён перечень методик необходимых для более точного снятия частотных характеристики и

последующего моделирования исследуемого трансформаторов среде «Simulink» программы «Matlab», для этого впоследствии была проведена серия из пяти экспериментов первые два из которых были проведены с помощью использования синусоидального сигнала, впоследствии удачно заменённого на прямоугольный. в ходе серии из этих экспериментов была отработана методика первичного снятия амплитудно-частотных характеристики а также проблемы подобные методики в рамках экспериментального анализа.. Испытательный стенд представлен на рисунке 16.



Рисунок 16 – Испытательный стенд, используемый в эксперименте и также для снятия характеристик трансформатора

При индуктивном заземлении переходное напряжение в нейтральной точке трансформатора может принимать значения, близкие к 1,9 раза превышающие напряжение питания. Его доминирующая частота составляет около 80 кГц. Импеданс на частоте первого параллельного резонанса (37 кГц) составляет примерно 68 кОм. Это почти вдвое больше соответствующих значений на других параллельных резонансах [8]. При изолированной нейтрали переходное напряжение принимает значение, почти вдвое превышающее напряжение питания, на большей части обмотки. Напряжение на нейтрали достигает значений, близких к двукратному значению

напряжения источника [9]. Его доминирующая частота составляет около 330 кГц. Ток источника также колеблется на этой частоте.

Осциллограммы, полученные входе испытаний представлены на рисунках 17 и 18.

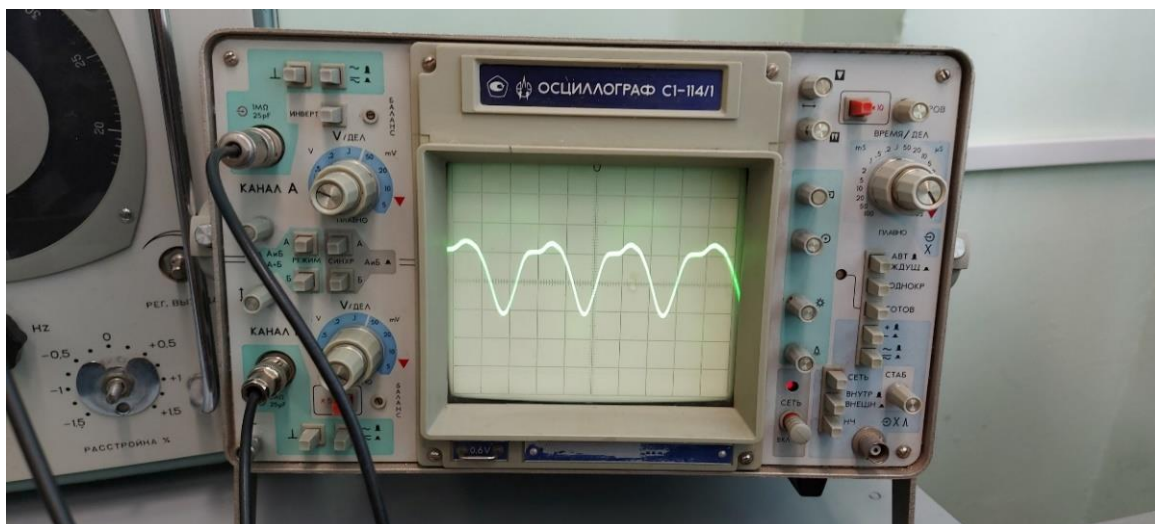


Рисунок 17 – Зашумление осциллограммы вследствие использования аналогового осциллографа

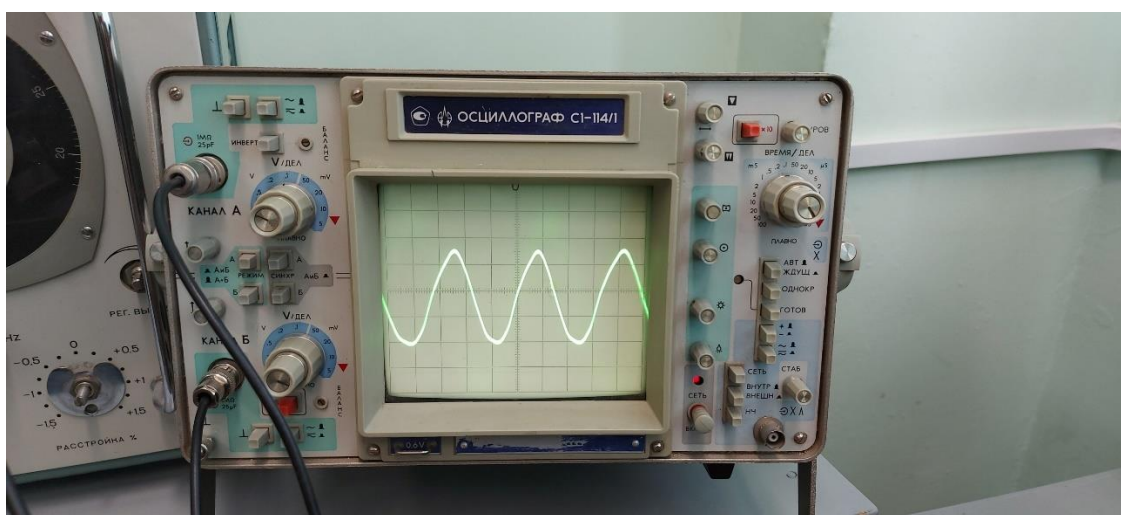


Рисунок 18 – Так же осциллограмма на частоте 3 МГц, присутствуют посторонние шумы

За последние десятилетия было изучено множество моделей силовых трансформаторов для различных применений. Большинство из этих моделей, часто в пониженной полосе частот, основаны на представлении

трансформатора в виде набора резистивных, индуктивных и емкостных элементов, которые могут учитывать физическое поведение силового трансформатора; некоторые другие представляют собой широкополосные модели, созданные по принципу черного ящика. Очевидно, что для получения хорошей модели можно также применить метод конечных элементов (МКЭ), но в этом случае необходимо знать точную конструкцию трансформатора. В следующих разделах мы представим предложенную эквивалентную модель и две методики, используемые для определения параметров трансформатора. Осциллограмма прямоугольного сигнала, поданного на низковольтную обмотку представлена на рисунке 19.

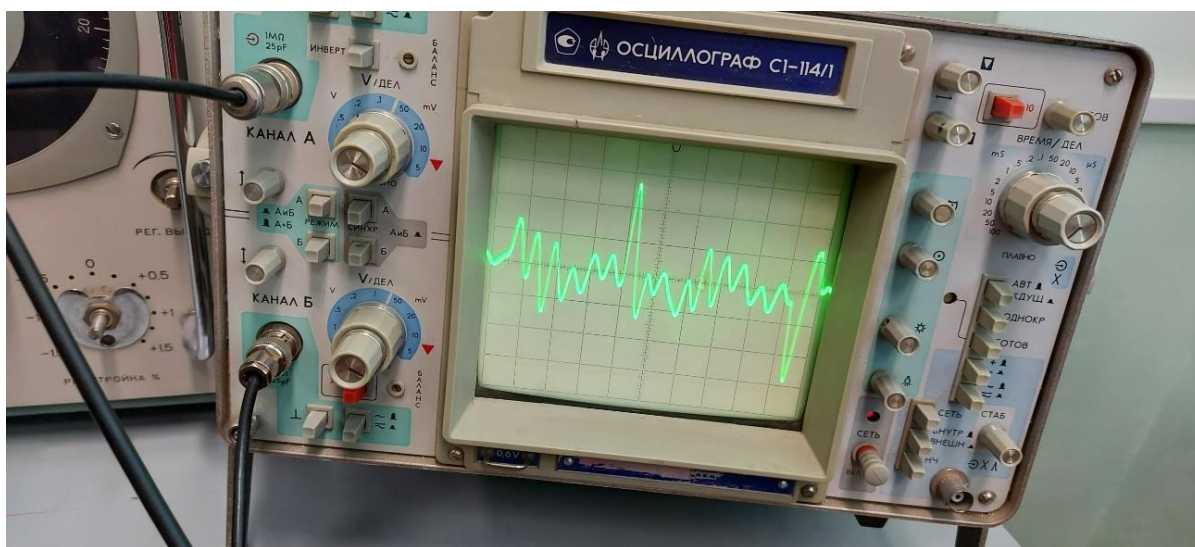


Рисунок 19 – Прямоугольный сигнал, поданный на трансформатор при частоте 1 МГц

Помимо этого, были так же использованы лабораторные трансформаторы 220/36 Вольт, которые в первую очередь использовались для лучшего понимания и совершенствования технологии получения данных непосредственно с работающего оборудования. Так же стоит отметить, что они находились в разной степени износа, что в том числе послужило фактором перехода от синусоидального сигнала к прямоугольному.

На рисунках 20 и 21 представлены два трансформатора, которые использовались для первичного тестирования снятия характеристик.

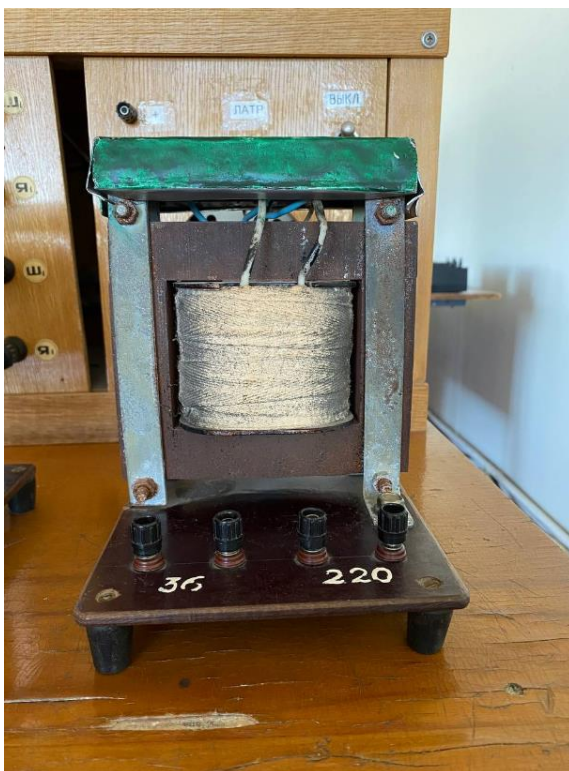


Рисунок 20 – Трансформатор слабого износа

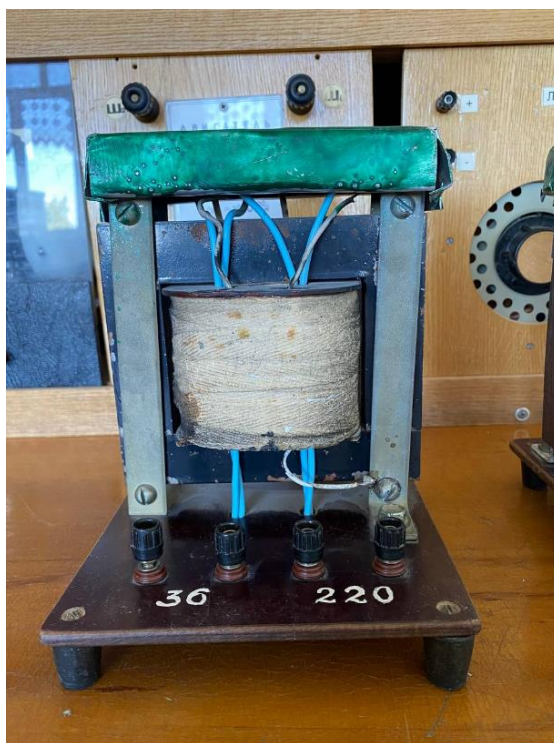


Рисунок 21 – Трансформатор сильного износа

На рисунке 22 представлена ранжированная группа из трёх трансформаторов, использованных при дальнейших опытах.



Рисунок 22 – Ранжированная группа трансформаторов

На рисунке 23 представлен общий вид испытательного стенда, на котором и происходила калибровка оборудования также на нём представлен первоначальный осциллограф, который использовался в экспериментах от которого было решено отказаться в пользу цифрового.



Рисунок 23 – Общий вид стенда для апробации методики снятия данных

На рисунке 24 показано также подключенная оборудование в том числе цифрового осциллограф и генератор сигналов, которые также был использован для апробации разрабатываемой методики

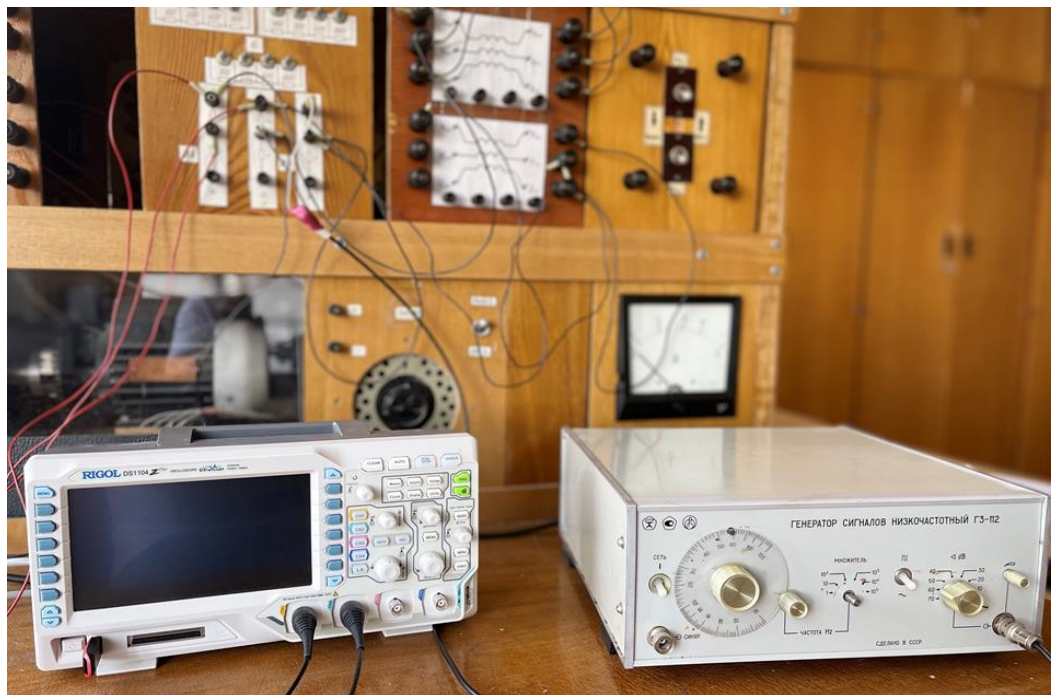


Рисунок 24 – Подключённое к стенду оборудования для снятия характеристик

На рисунке 25 также изображено схематичное подключение имеющегося оборудования, моделирующего реальный трансформатор.

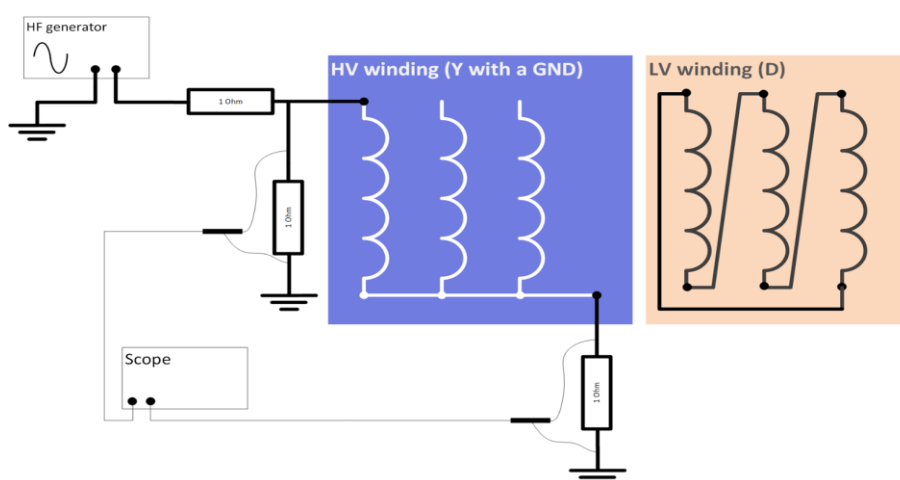


Рисунок 25 – Схематичное изображение подключения оборудования

Определение каждого параметра эквивалентной схемы модели трансформатора осуществляется на основе измерений импеданса в частотной области с помощью анализатора импеданса в различных тестовых конфигурациях. Намагничивающий импеданс оценивается по импедансу, измеренному на первичной обмотке при разомкнутой вторичной обмотке. Импеданс утечки измеряется при коротком замыкании вторичной обмотки. Различные емкости могут быть определены путем различных измерений в различных конфигурациях, а импеданс дополненной модели определяется с помощью программного обеспечения для подгонки, которое требует точных измерений на высокой частоте [2].

Для вычисления остаточного ресурса силового трансформатора необходимо произвести первоначальный расчёт его индукции; с помощью измерительных преобразователей напряжения производится замер напряжения U_1 , который затем приводится ко вторичному напряжению:

$$U'_1 = \frac{U_1}{K_T} \quad (1)$$

где K_T – заданный коэффициент трансформации, принимаемый в силовых трансформаторах за константу.

Данное приведённое напряжение используется для определения разности напряжений $\Delta U'$:

$$\Delta U' = U'_1 - U_2, \quad (2)$$

где U_2 – значение вторичного напряжения, измеренного первичным измерительным оборудованием.

Далее, происходит вычисление среднего напряжения, на основании уже полученных данных и произвольно заданных граничных значений времени.

$$u_{\text{ср}} = \frac{u_j(t_2) + u_j(t_1)}{2}, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 – заданные границы интервала времени.

Так же следует, на основании заданных граничных интервалов, вычисление временного приращения.

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{i_j(t_2) + i_j(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

где i_j – значение тока во вторичной обмотке, измеренного первичным измерительным оборудованием.

Затем, на основе прошлых вычислений, происходит вычисления значения индуктивности в данный момент, то есть мгновенного, на основании заданных выше граничных условий времени.

$$L_{j\text{изм}} = \frac{u_{\text{ср}}}{\frac{di_j}{dt}}, \quad (5)$$

Далее, на основе вычисленной мгновенной индуктивности, происходит приведение данного параметра к известной частоте.

$$L_j = L_{j\text{изм}} \cdot \frac{f_{\text{изм}}}{f_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

где $f_{\text{ном}}$ – номинальное значение частоты в питающей сети;

$f_{\text{изм}}$ – измеренное значение частоты в сети.

Следующим шагом является вычисление среднего значения индуктивности на каждый период.

$$L_{\text{Тср}} = \sum_{i=1}^N \frac{L_j}{N}, \quad (7)$$

где N – число интервалов разбиений.

В заключении расчёта индуктивности происходит расчёт её изменение за указанный период, которое позволит отследить динамику её изменения в указанный граничный интервал времени, на основании чего будет происходить оценка физического износа оборудования.

$$\Delta L = \frac{(L_{\text{Тср}} - L_{0j}) \cdot 100\%}{L_{0i}}, \quad (8)$$

где $L_{\text{Тср}}$ – среднее значение индуктивности за период;

L_{0j} – значение уставки, вычисляемое в ходе эксперимента.

Помимо индуктивности, для расчёта остаточного ресурса, так же необходимо вычислить ёмкость активной части трансформатора. Первым шагом к этому станет расчёт магнитного потока.

$$\Phi = \frac{I \cdot W \cdot \sqrt{2}}{R_m}, \quad (9)$$

где W – число витков;

R_m – магнитное сопротивление магнитопровода.

Далее производится расчёт действующей ЭДС.

$$\varepsilon = 4,44 W f \Phi, \quad (10)$$

где f – действующая частота тока.

На основе данных параметров, производится сам расчёт ёмкости активной части трансформатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 p h}{m^2} \sum_{k=1}^{m-1} \frac{1}{\Delta k} \quad (11)$$

где p – средний периметр витка;

h – высота (длинна) слоя;

m – кол-во слоёв одной обмотки;

Δk – толщина межслоевой изоляции.

Стоит упомянуть, что Влияние неравномерности емкости на резонансные частоты различных обмоток оценивается для разных вариантов подключения нейтрали.

На основании вычисленных ёмкости и индуктивности происходит расчёт частоты, в последующем используемой для расчёта остаточного ресурса трансформатора.

$$F = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad (12)$$

Вывод по разделу.

В данном разделе была проведена разработка математического аппарата разрабатываемой системы мониторинга, который в последующей главе будет переведён в вид программного алгоритма для последующего тестирования и реализации в качестве программного продукта.

4 Создание программного продукта предиктивного анализа активной части силового трансформатора в режиме реального времени

Для построения идеальной АЧХ силового трансформатора невозможно использовать существующие стандартные Т-образные или Г-образные схемы замещения, т. как они не учитывают множество факторов [25,28]. В данном случае высокую роль играют емкостные составляющие и индуктивные составляющие на высокой частоте и определение частоты резонанса колебательного контура – исследуемого трансформатора (Рисунок 26).

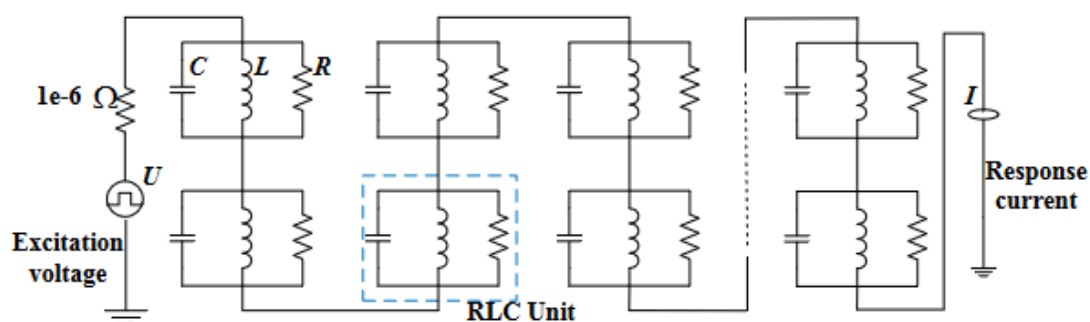


Рисунок 26 – Схема замещения фрагмента обмотки силового трансформатора

Цифровая модель двухобмоточного трансформатора подразумевает под собой разработку программной оболочки с математическим описанием систем управления, описывающих процессы, протекающие в трансформаторе и оказывающие влияние на работоспособность трансформатора согласно определенному при решении первой задачи перечню повреждений. Планируется, что цифровая модель трансформатора будет представлять собой многополюсник. Входные параметры многополюсника формируют значения параметров, характеризующих режим функционирования двухобмоточного трансформатора, а также параметры имитирующие воздействия. Выходные параметры — это параметры, характеризующие режим работы двухобмоточного трансформатора, а также параметры, значения которых необходимы для формирования текущей оценки и

прогноза технического состояния. Цифровая модель необходима для оптимизации разрабатываемых методик и для снижения требований к вычислительным ресурсам системы. На рисунке 27 представлено схематичное изображение работы программы, далее, на рисунке 28 приведена схема моделирования трансформатора, используемого в испытаниях.

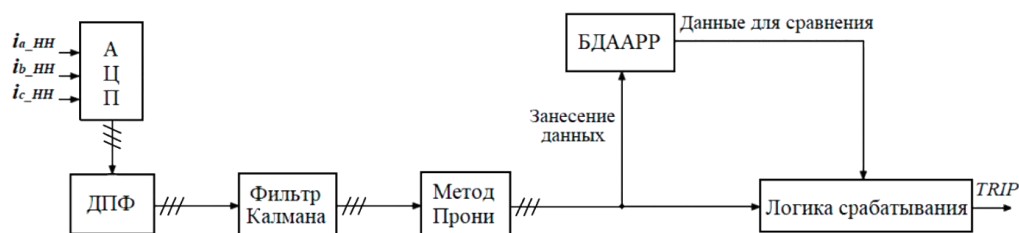


Рисунок 27 – Первый этап работы программы

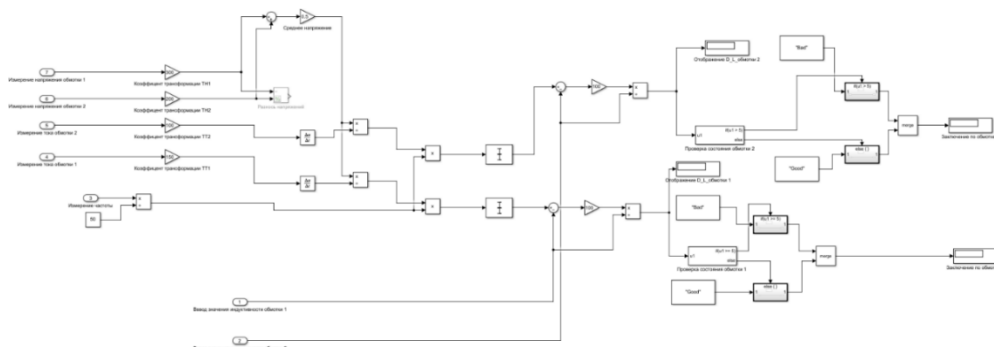


Рисунок 28 – Схема моделирования трансформатора

Как уже было сказано ранее, на текущий момент времени имеется проблема в плане отсутствия точных методов оценки технического состояния трансформатора. Используя полученные при проведении эксперимента данные и формулы расчёта индуктивности трансформатора, создаём алгоритм работы программного обеспечения.

Для определения текущего состояния обмоток ДСТ предварительно производятся замеры и/или расчеты паспортного (конструктивного) значения индуктивности активной части силового трансформатора – первичной и вторичной обмоток ДСТ. В процессе работы программы производится расчет текущей индуктивности первичной и вторичной обмоток ДСТ и на

основании определенных критериев (относительного отклонения индуктивности первичной и вторичной обмотки от конструктивного значения) определяется уровень технического состояния активной части ДСТ.

Разработанное программное обеспечение, представленное на рисунке 29 в виде алгоритма для упрощения понимания работы программы можно разделить на несколько составляющих.

Ручной ввод данных индуктивности
обмоток трансформатора или данные по индуктивности из базы данных

The diagram shows a rectangular box representing a data input form. Inside the box, there are two input fields. The first field is labeled '1' in a circle and 'Ввод значения индуктивности обмотки 1'. The second field is labeled '2' in a circle and 'Ввод значения индуктивности обмотки 2'. Two horizontal lines extend from the right side of the box, representing connections to other parts of the system.

Рисунок 29 – Ввод данных в систему

Поскольку тема исследования обширна и требует массивного объема данных за частую получаемых в процессе «ручного» измерения, то для простоты работы был сделан ручной ввод данных.

На рисунке 30 представлена имитация измерительных трансформаторов.

При разработке программного обеспечения и продумывая принципа функционирования разрабатываемой системы мониторинга главный принцип, который лежал в основе – универсальность системы и возможность ее интеграции без дорогостоящего измерительного оборудования. В связи с чем предполагается подключение системы мониторинга и получение данных для функционирования программы к измерительным трансформаторам тока и напряжения на подстанции.

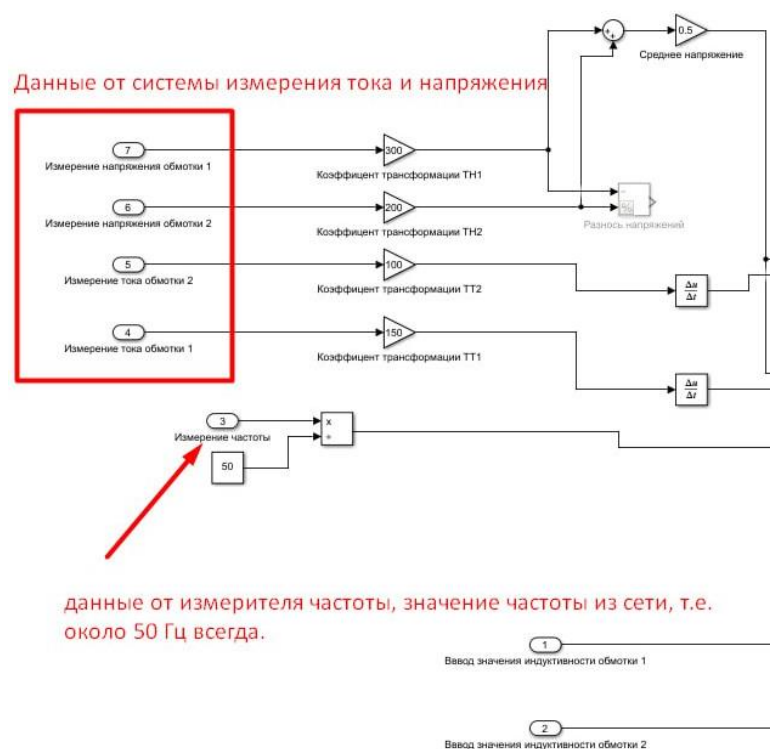


Рисунок 30 – Модель, имитирующая измерительные трансформаторы тока устанавливаемые на подстанции

На рисунках 31 и 32 показана схема расчета значений приборов и значения частоты.

Определение среднего значения напряжения с учетом коэффициентов трансформации.

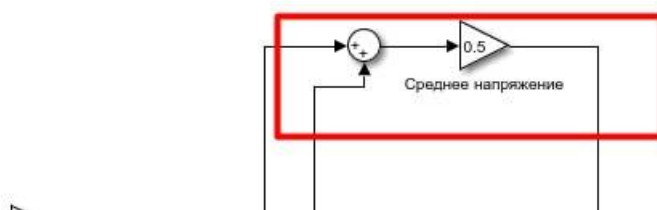


Рисунок 31 – Расчет средние значений показателей приборов



Рисунок 32 – Расчет значения частоты

В последние годы на рынке постоянно предлагаются новые устройства для контроля содержания газов и влаги в масле, оснащенные диагностическими программами. Это дорогостоящие устройства, но их роль в системе диагностического контроля очень важна. Эти устройства позволяют обнаружить развивающийся дефект на ранней стадии. Однако только сегодня уровень развития научных знаний в этой области достиг состояния, позволяющего диагностировать и рассчитать один из важнейших и труднодоступных показателей качества твердой изоляции - степень полимеризации целлюлозы. Чтобы спрогнозировать этот ресурс, необходимо располагать информацией о трех параметрах: производных фурана, метаноле и ацетилене. Конструкция может быть разной (реализована как в виде одного, так и в виде отдельных датчиков, входящих в один рабочий модуль), но размещение должно осуществляться непосредственно внутри исследуемого объекта (трансформатора). Примерами размещения могут быть: основной или расширительный бачок, радиатор системы охлаждения (с принудительной циркуляцией масла), газовое реле [15].

Основными крупными производителями на рынке систем мониторинга и диагностики силовых трансформаторов являются:

- GE Energy;
- Qualitrol;

- Camlin;
- Dimrus;
- Авикон.

До введения санкционных ограничений широкое распространение получили системы мониторинга растворенных газов в трансформаторном масле от таких иностранных компаний, как Qualitrol и GE Energy, однако в настоящее время ситуация изменилась и стали больше обращать внимание на отечественных производителей. Основной проблемой, замедляющей развитие и усовершенствование отечественных систем мониторинга растворенных газов в трансформаторном масле, является изготовление светопропускной мембраны.

На рисунках 33 и 34 представлены устройства серии Serveron и Transfix.



Рисунок 33 – Система мониторинга растворенных газов в трансформаторном масле серии SERVERON



Рисунок 34 – Система мониторинга растворенных газов в трансформаторном масле серии TRANSFIX

Анализатор частотных характеристик «FreDA» (Frequency Domain Analyzer) предназначен для анализа частотных характеристик изоляции высоковольтного оборудования и для обнаружения дефектов в силовых трансформаторах по методу SFRA (Sweep Frequency Response Analyzer) вследствие нарушения формы обмоток при ослаблении усилия прессовки обмоток и в результате воздействия сквозных токов короткого замыкания. Регистрация частотных параметров обмоток силовых трансформаторов по методу SFRA позволяет выявлять искажения геометрической формы обмоток, возникающие в процессе работы [16]. Такой опасный дефект, приводящий к деформации изоляционных промежутков в обмотке, возникает в силовых трансформаторах при наличии двух, взаимно связанных условий – при ослаблении усилия прессовки обмоток, и в результате протекания по обмоткам трансформатора сквозных токов короткого замыкания, имеющих большие значения. На рисунке 35 представлено устройство FreDA.



Рисунок 35 – Устройство мониторинга силового трансформатора серии FreDA

В силовом трансформаторе есть несколько критических узлов, которые в процессе эксплуатации наиболее подвержены износу или повреждениям в

случае возникновения аварийного режима работы или несвоевременного обслуживания оборудования.

На рисунке 36 показаны критические узлы силового трансформатора от состояния которых зависит общее качество работы объекта.

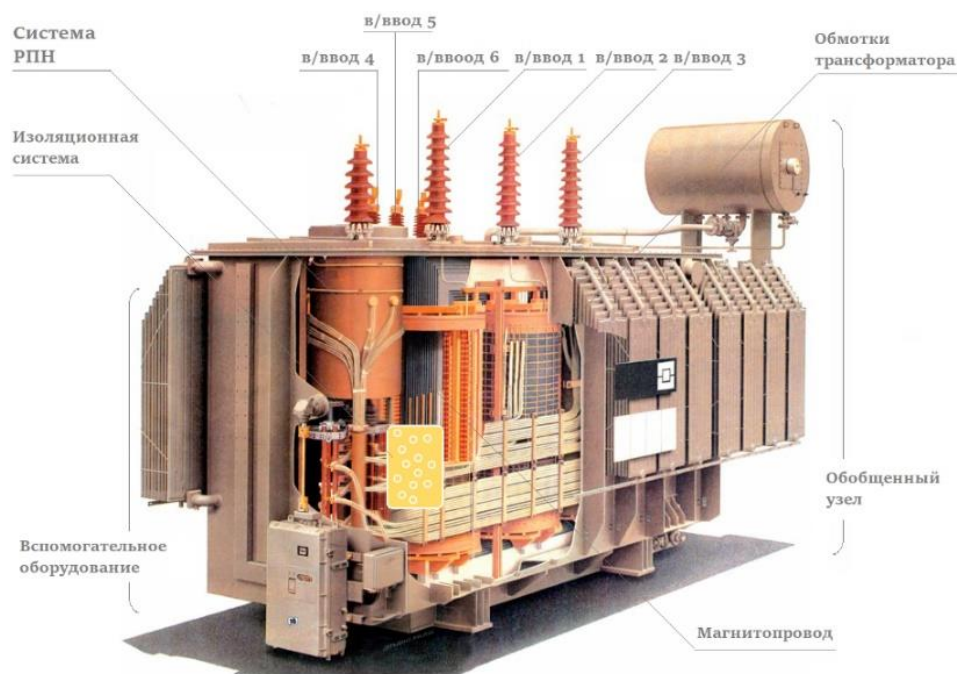


Рисунок 36 – Критические узлы силового трансформатора

Ввиду необходимости контроля максимально возможного количества узлов трансформатора существуют основные принципы установки системы мониторинга растворенных газов. Основной принцип установки системы мониторинга заключается в присоединении к вентилю на возврат масла в охлаждающем контуре. Такой принцип позволяет повысить репрезентативность полученных образцов.

На рисунке 37 представлены гипотетические места подключения системы мониторинга.

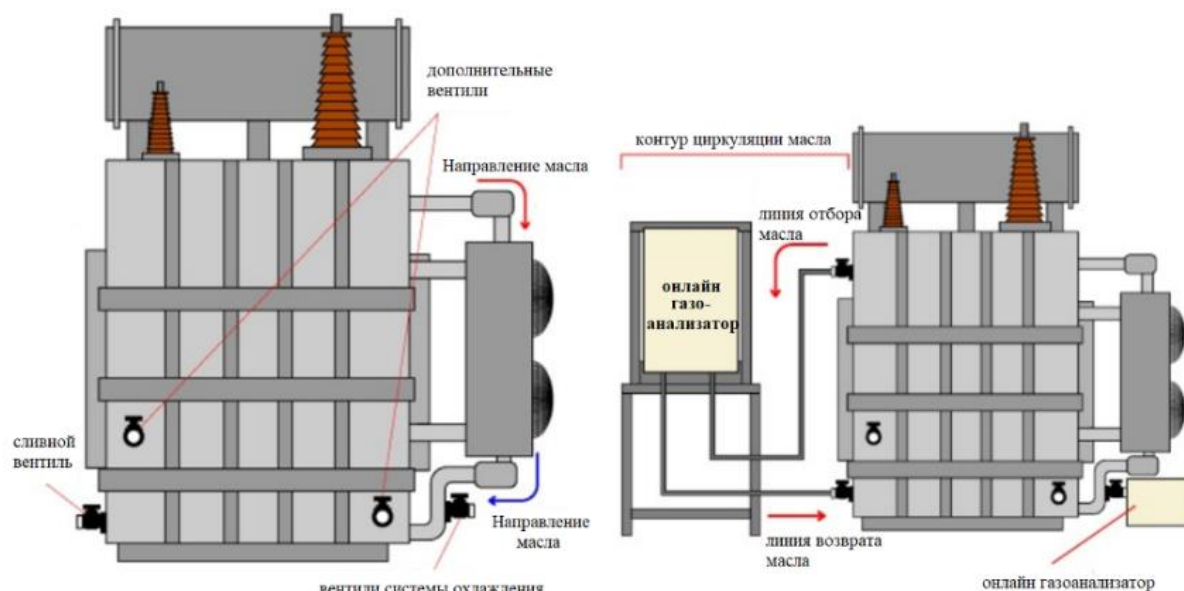


Рисунок 37 – Возможные места подключения системы мониторинга

Испытание FRA является признанным методом обнаружения повреждений обмоток трансформатора. В данной статье FRA используется для исследования нормального и неисправного устройства РПН трансформатора. Были сформированы три режима работы и наблюдения за частотными характеристиками обмоток в четырех тестовых конфигурациях. Это дает четкое представление о возможности использования FRA для обнаружения неисправностей трансформатора. Представлена процедура переходного и частотного анализа обмоток трансформатора с распределением емкости, зависящим от места установки. Решение в замкнутой форме позволяет получить распределения напряжения и тока в обмотке, а также ее входной импеданс [43]. Для получения переходной характеристики применяется численное обратное преобразование Лапласа.

На рисунке 38 приведено подключение разрабатываемой системы мониторинга к однофазному трансформатору.

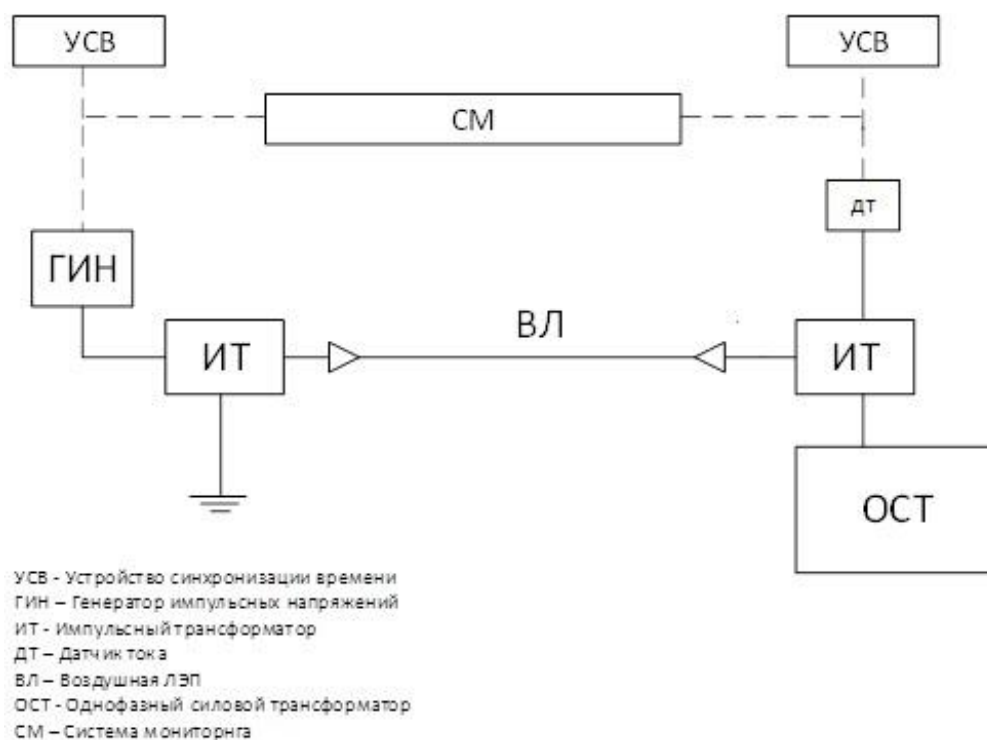


Рисунок 38 – Схематичное изображение подключения системы мониторинга с использованием однофазного трансформатора

Первоначально потребовалось провести два опыта для моделирования силового трансформатора [35] в среде «Simulink» программы «matlab», первым подобным опытом стал опыт холостого хода, результаты которого приведены ниже в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты измерений при проведении опыта холостого хода

Опыт	$U_{\text{вторичной обмотки}}, \text{В}$	$U_{\text{первичной обмотки}}, \text{В}$	$I, \text{А}$	$W, \text{Вт}$
1	38,8	220	0,62	28
2	31,2	180	0,26	17
3	24,6	140	0,15	10
4	17,4	100	0,095	6
5	10,4	60	0,055	3

Для более точного моделирования испытанного трансформатора, дополнительно был проведён опыт короткого замыкания (КЗ). Результаты опыта сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Результаты измерений при проведении опыта короткого замыкания

Опыт	$I_{\text{вторичной обмотки}}, \text{А}$	$I_{\text{первичной обмотки}}, \text{А}$	$U_{\text{первичной обмотки}}, \text{В}$	$W, \text{Вт}$
1	6,25	1,14	14,4	16
2	5,5	1	14,8	14,4
3	3,75	0,7	10,4	7,2
4	2,2	0,4	5,8	2,4

Вычисленные данный сопротивлений первичной обмотки испытанного трансформатора: $R_{\text{п}} = 0,00065 \text{ кОм}$, сопротивление вторичной обмотки равняется $R_{\text{в}} = 0,0043 \text{ кОм}$.

Обработки полученных данных необходимых данных в ходе проведение серии экспериментов в среде «Simulink» для моделирования в программе «matlab» была собрана схема замещения для последующей работы именно над математической частью.

Стоит так же отметить тот факт, что полученные данные, в силу своего экспериментального происхождения, не могут быть полностью использованы для создания системы мониторинга силовых трансформаторов; помимо снятия экспериментальных данных [41], их так же требуется верифицировать на реальном энергетическом объекте. Однако, в рамках моделирования, они принимаются за уже верифицированные и корректные для последующего использования.

Помимо этого также была внедрена и разработанная система по оптимизации и анализу данных. традиционно используемая быстрое преобразование Фурье [36] оказалось невозможно применить на практике так как оно раскладывает статичный сигнал который затем уже используется в последующем анализе Однако при этом теряется и времена составляющие что накладывает серьезный отпечаток на получение данных вследствие этого Некоторые из них могут быть утеряны. для того чтобы обойти эти технические и математические ограничения было принято решение использовать вейвлет преобразования которое как раз таки помогает анализировать данные в режиме реального времени [31].

Схема замещения, собранная в программе «MATLab» продемонстрирована на рисунке 39.

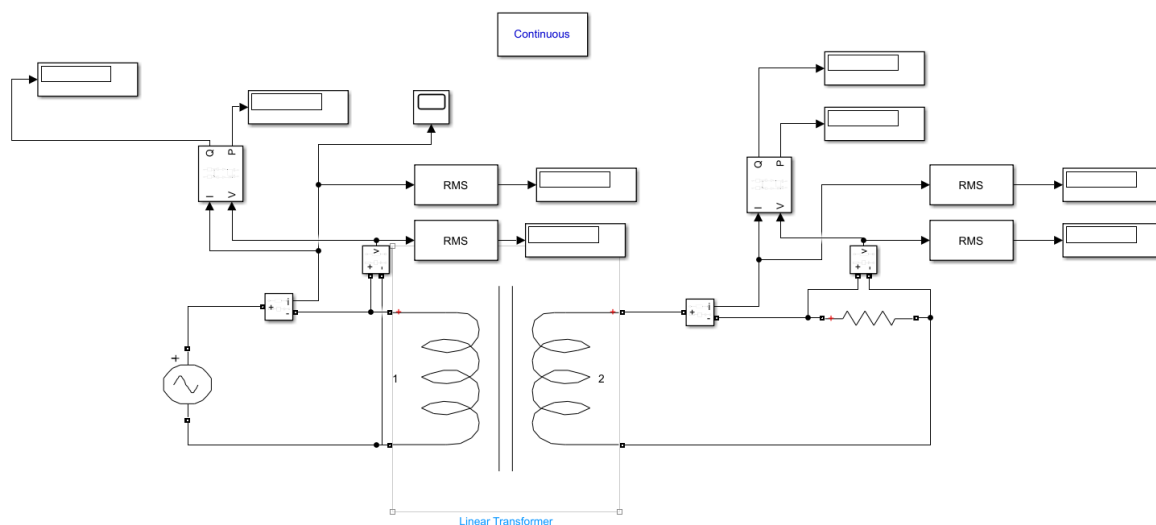


Рисунок 39 – Схема замещения лабораторного стенда

Тем не менее быстрое преобразование Фурье может быть применимо на первом этапе работы математического аппарата [29,31], то время как на последующих этапах преобразования и анализа применяется именно вейвлет преобразование которая несравненно обладает гораздо большим функционалом нежели обычное преобразование Фурье. важно также подчеркнуть то что имеющееся на трансформаторе оборудования как и окружающая среда могут вносить шум в снятые данные. в частности подобный шум может вызываться остаточный намагниченностью активной части трансформатора что негативно влияет на анализ данных и вносит свои корректировки прогноз остаточного ресурса. всё это приводит нас к тому что чистая модель выявят преобразование Даже при том что на ней применимы разного рода фильтры не может использоваться именно в чистом виде без сторонних расширений.

Подобными сторонними расширениями или же дополнительными методами может являться, например фильтр Калмана [32,38] который был выбран в качестве дополнительного математического аппарата. именно

благодаря фильтру Калмана получается устранить большинство попадающего в измерительное устройство шума вместе с измеряемым сигналом. Также важно понимать, что лабораторный стенд очень сильно отличается от реальных трансформаторных подстанций и важно разработать такую модель, которая могла бы учитывать возможные внештатные ситуации, случающиеся при неправильной обработке данных это также станет задачей при имплементировании разрабатываемой системы на реальный энергетический объект станция.

Проблема части данных при преобразовании сигнала на реальные подстанции, в частности, можно решить при помощи метода Прони [33,35]. подобная методика помогла бы и данные при утере после снятия первичной амплитудно-частотные характеристики. важным фактором также будет допустимость допустимый уровень потери данных [39].

Весь цикл работы расширения выглядит так: первично измерительное устройство фиксирует амплитудно-частотную характеристику далее производится фильтрация с помощью ненужных шумов или посторонних сигналов собственно фильтр Калмана также поможет нам отделить часть сигналов измерительных устройств . сигнал при превышении границы потери данных достраивается с помощью метода Прони. далее происходит работа математического аппарата а именно вы разложение сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье и Вейвлет преобразование. Сигнал уже используется для математических вычислений и составление прогноза по остаточному ресурсу трансформатора [40].

На рисунке 40 представлено типовое подключение системы мониторинга и генератора высокочастотных импульсов к двухобмоточному силовому трансформатору.

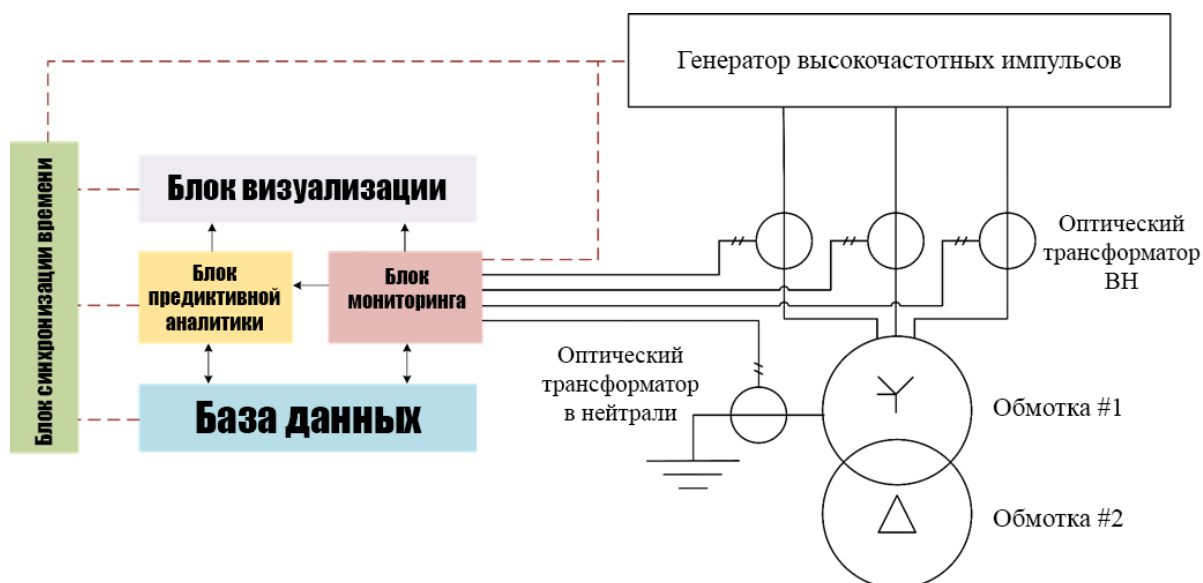


Рисунок 40 – Схематичное подключение схемы мониторинга

В следствие того что данная разрабатываемая система мониторинга находятся на втором и третьем уровне автоматизированной системы мониторинга и диагностики и непосредственно связано как с первым уровнем так и со вторым так и с третьим на блоке систему мониторинга в которой поступают данные от первичных измерительных приборов обязательно, согласно требованиям стандарта СТО 56947007-29.200.10.011-2008, должна находиться индикация как аварийная так и оперативная для персонала о режимах работы трансформаторного оборудования вследствие этого возникает необходимость дополнительной связи между вторым и третьим уровнем для того чтобы персонал как находящийся непосредственно в оперативной зоне трансформатора так и персонал находящийся на удалении от оборудования имел возможность непосредственно понимать в каком режиме сейчас работает трансформатор и какие действия нужно предпринять если это потребуется непосредственно от какого-либо оператора.

Далее, на основании уже упомянутого математического аппарата, а также схематичных подключений необходимого оборудования, была создана диаграмма, наглядно иллюстрирующая логику работы системы предиктивного мониторинга.

На рисунке 41 изображена диаграмма работы системы мониторинга.

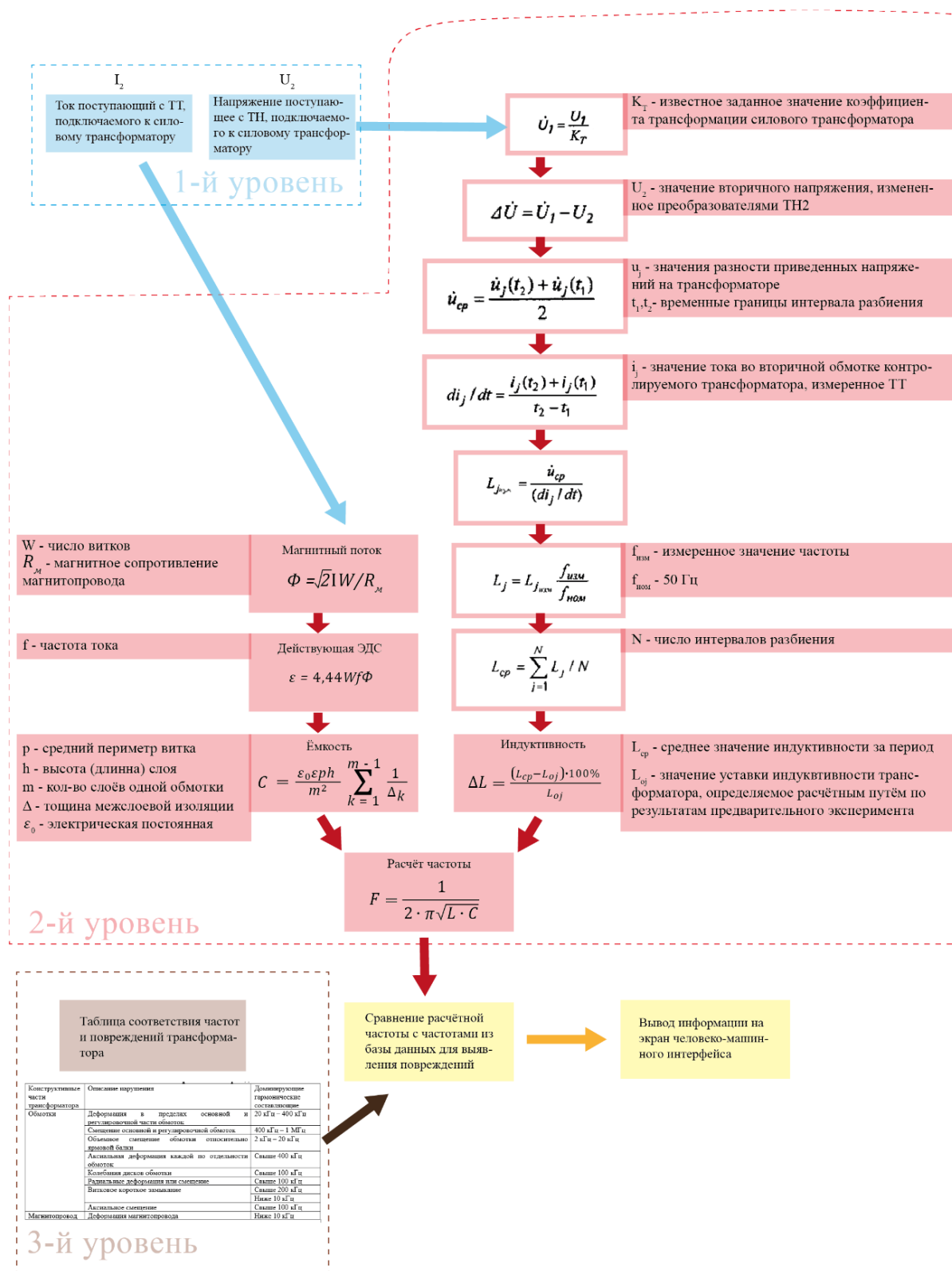


Рисунок 41 – Диаграмма работы разрабатываемой системы

Блок схема (рисунок 41) связывает между собой все три уровня АСМИД, начиная от первичных измерительных преобразователей,

заканчивая базой данных о поломках трансформаторного оборудования и вывода световой индикации. Наглядно показано, какие данные поступают в систему напрямую через измерения первичных величин, какие данные вводятся в математический аппарат в виде констант. Так же проиллюстрирована таблица соответствия частот и поломок характерных для каждого отдельного диапазона.

На основе данных диаграммы и математического аппарата был написан скрипт для программы matlab, в которой происходило моделирование работы трансформатора.

Эти переменные задают начальные параметры трансформатора: первичное и вторичное напряжение, а также коэффициент трансформации.

% Определение переменных

U1 = 220; % Первичное напряжение (Вольт)

U2 = 110; % Вторичное напряжение (Вольт), измененное преобразователем

Kt = 2; % Коэффициент трансформации силового трансформатора

Рассчитывается напряжение на первичной обмотке трансформатора, исходя из вторичного напряжения и коэффициента трансформации.

% Расчет известного заданного значения

Ui = U2 / Kt;

Вычисляется разность между первичным и вторичным напряжениями трансформатора.

% Значение разности напряжений

Delta_U = U1 - U2;

Эти строки вычисляют среднее значение напряжения на трансформаторе в два момента времени t1 и t2.

% Значения напряжений на трансформаторе в моменты времени t2 и t1

u_t2 = 120; % Напряжение в момент времени t2 (Вольт)

u_t1 = 115; % Напряжение в момент времени t1 (Вольт)

% Среднее значение напряжения

$$u_{cp} = (u_{t2} + u_{t1}) / 2;$$

Здесь вычисляется производная тока по времени (то есть изменение тока за единицу времени), используя значения тока в моменты времени t1 и t2.

% Значения тока во вторичной обмотке в моменты времени t2 и t1

i_t2 = 10; % Ток в момент времени t2 (Ампер)

i_t1 = 9.5; % Ток в момент времени t1 (Ампер)

t2 = 0.02; % Время t2 (секунды)

t1 = 0.01; % Время t1 (секунды)

% Производная тока по времени

$$di_{dt} = (i_{t2} - i_{t1}) / (t2 - t1);$$

Индуктивность трансформатора рассчитывается как отношение среднего напряжения к производной тока по времени.

% Индуктивность

$$L_{i_mean} = u_{cp} / di_{dt};$$

Корректируется значение индуктивности с учетом реальной и номинальной частоты.

% Измеренное значение частоты

f_real = 50; % Гц

f_nom = 50; % Номинальная частота (Гц)

Вычисляется среднее значение индуктивности за период.

% Коррекция индуктивности по частоте

$$L_j = L_{i_mean} * (f_{real} / f_{nom});$$

% Количество интервалов разбиения

N = 10; % Введи реальное значение

% Среднее значение индуктивности за период

$$L_{cp} = \text{sum}(L_j) / N;$$

Вычисляется относительное изменение индуктивности в процент

% Индуктивность

L0 = 1; % Введи реальное значение L0

```
Delta_L = ((L_cp - L0) / L0) * 100;
```

Эти строки кода рассчитывают емкость трансформатора, принимая во внимание геометрические параметры обмотки и изоляции.

```
% Расчет емкости
```

```
epsilon_0 = 8.854e-12; % Электрическая постоянная (Ф/м)
```

```
p = 0.05; % Средний периметр витка (метры)
```

```
h = 0.01; % Высота (длина) слоя (метры)
```

```
m = 10; % Количество слоёв одной обмотки
```

```
Delta = 0.001; % Толщина межслоевой изоляции (метры)
```

```
sum_term = 0;
```

```
for k = 1:m
```

```
    sum_term = sum_term + 1 / Delta;
```

```
end
```

```
C = (epsilon_0 * epsilon_0 * u_cp * p * h) / (m^2 * sum_term);
```

```
% Расчет частоты
```

```
F = 1 / (2 * pi * sqrt(L_cp * C));
```

Эти строки выводят результаты всех вычислений на экран.

```
% Вывод результатов
```

```
disp(['Известное заданное значение U_i: ', num2str(Ui), ' Вольт']);
```

```
disp(['Разность напряжений Delta_U: ', num2str(Delta_U), ' Вольт']);
```

```
disp(['Среднее значение напряжения u_cp: ', num2str(u_cp), ' Вольт']);
```

```
disp(['Производная тока di/dt: ', num2str(di_dt), ' Ампер/сек']);
```

```
disp(['Индуктивность L_i_mean: ', num2str(L_i_mean), ' Генри']);
```

```
disp(['Корректированная индуктивность L_j: ', num2str(L_j), ' Генри']);
```

```
disp(['Среднее значение индуктивности L_cp: ', num2str(L_cp), ' '
Генри']);
```

```
disp(['Изменение индуктивности Delta_L: ', num2str(Delta_L), ' %']);
```

```
disp(['Емкость C: ', num2str(C), ' Фарад']);
```

```
disp(['Расчетная частота F: ', num2str(F), ' Гц']);
```

Данный скрипт так же был переведён на язык программирования Python для последующего патентования.

Для разработки конструкторской документации разрабатываемой системы мониторинга была составлен перечень требований, которыми должен обладать корпус разрабатываемой системы мониторинга. Помимо этого, был учтён как уже имеющийся опыт отечественных производителей, так и специфика сферы применения данной системы мониторинга.

Принципы, положенные в основу разработки:

- централизованная система с одним блоком приема и контроля, и управления АСТУ. АСТУ обеспечивает: логику работы всей системы нижнего уровня; информирование о состоянии (индикация); пульт управления; управление исполнительными устройствами входящих в состав системы мониторинга;
- максимальное использование серийных контроллеров, модулей и устройств;
- адресная система подключения датчиков и устройств;
- линии приема аналоговых показателей – не адресные;
- адресная линия связи на основе открытого стандартного промышленного интерфейса;
- система предназначена для распределительных подстанций классом напряжения от 10 кВ. Простая система с минимальным набором только самых необходимых функций, но при этом остается возможность для добавления новых модулей-функций. Приоритет – гибкость и модульность, а не размер и не масштабируемость до больших размеров;
- адресная линия связи может в дальнейшем использоваться для подключения модулей расширения, например модулей оповещения или контрольно-пусковых модулей. При этом система преобразуется в блочно-модульную с увеличением контролируемых объектов электроэнергетической системы;

- максимально простая настройка при запуске в эксплуатацию;
- соответствие СТО 34.01-12-001-2020.

Так же, в конструкции должны быть предусмотрены элементы, отражённые в таблице 6.

Таблица 6 – Перечень элементов на корпусе блока мониторинга

Наименование	Количество
RS-485	2
RS-232	2
Ethernet-порт	3
USB 2.0	6
HDMI (видеовыход)	3
Световая индикация	1

Так же сам корпус устройства должен быть взрывозащитный и иметь рабочий диапазон температур от -40 до +40 градусов цельсия, чтобы обеспечить надлежащую работу в широком спектре климатических зон Российской Федерации.

Учитывая все эти требования и положения, в ходе выполнения первого этапа Работ, была разработана конструкторская документация системы мониторинга. Данная документация состоит из следующих элементов:

- пояснительная записка;
- эксплуатационные документы;
- электронная структура изделия.

Помимо этого, на основе разработанной конструкторской документации, был так же проработан электронный макет системы мониторинга силового трансформатора с функциями предиктивной аналитики. Данный макет представлен в.

На рисунке 42 приведено место разрабатываемой системы мониторинга трансформаторов (Программно-аппаратный комплекс) в энергосистеме.

Макет разрабатываемой системы предполагается использовать для более точного моделирования и масштабирования конечного продукта, а

также для маркетинговой компании. Изометрический вид 3д макета представлен на рисунке 43.

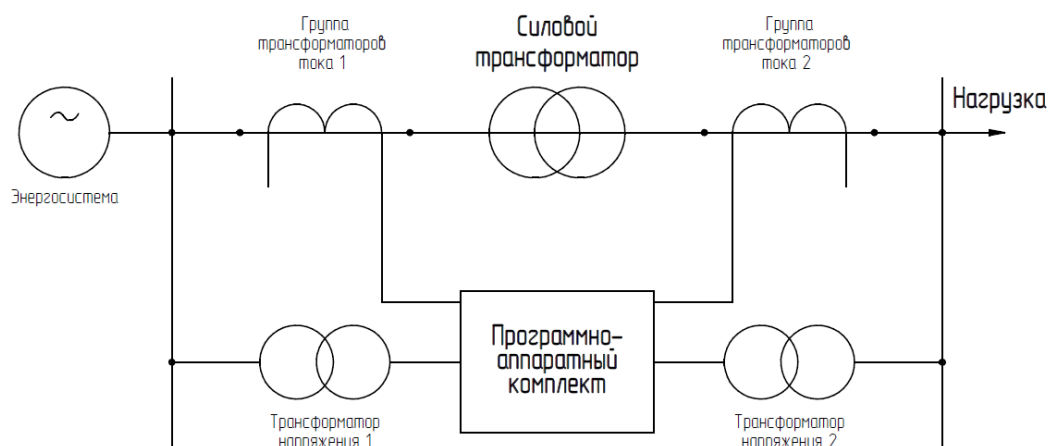


Рисунок 42 – Схема подключения системы мониторинга к оборудованию

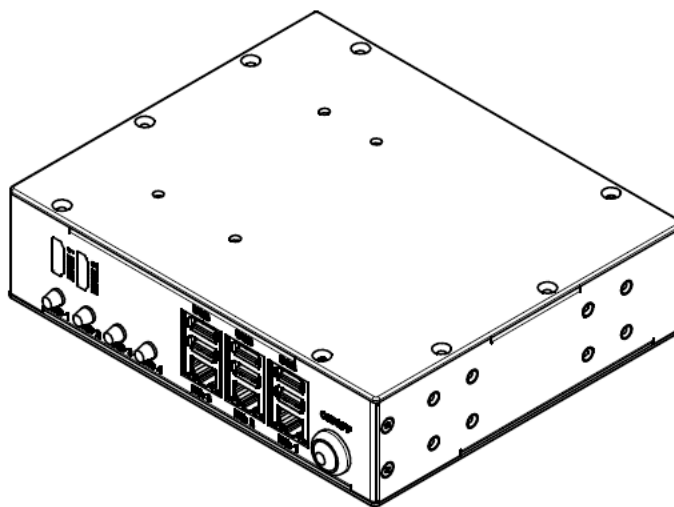


Рисунок 43 – Макет корпуса разрабатываемой системы мониторинга

На лицевой стороне имеются разъёмы USB и HDMI для подключения оборудования, такого как монитор или ноутбук для вывода изображения и визуализации процесса мониторинга. Так же на лицевой стороне присутствует световая индикация работы устройства.

При разработке корпуса так же была учтена возможность эксплуатации разрабатываемой системы в шкафном оборудовании, для чего на корпусе

были предусмотрены посадочные места для болтового крепления или же переходников.

На рисунках 44 и 45 представлены реальные трансформаторы на энергетическом объекте Самарской области, благодаря знакомству с функционированием реальной подстанции были приняты решения по оптимизации полученного опыта и последующего прототипирования.



Рисунок 44 – Силовой трансформатор, находящийся на территории подстанции



Рисунок 45 – Силовой трансформатор на территории подстанции

В ходе разработки программного обеспечения была получена поддержка от Тольяттинского государственного университета (Приложение А), от отраслевых энергетических компаний (Приложения Б и В), а также от государственной межрегиональной организации «Ассоциация региональной молодежи» (Приложение Г).

Прямым следствием заинтересованности в проекте и его практических результатах стало участие и победа в грантовом конкурсе по программе «Студенческий Стартап» (Приложение Д)

Вывод по разделу.

В данном разделе была произведена разработка программного продукта системы мониторинга силового трансформатора с функциями предиктивной аналитики. Опираясь на уже имеющиеся разработки и методы контроля состояния силового трансформатора, был разработан совершенно новый математический аппарат, с положенной в его основу функцией предиктивной аналитики; всё это было отражено при помощи диаграмм и схем подключения. Помимо этого, так же был разработан набор конструкторских требований к блоку мониторинга, определён его внешний вид и создана трёхмерная модель.

Так же важным этапом стало имплементирование разрабатываемой системы мониторинга на реальный распределительный объект, для тестирования и верификации методик и алгоритмов с целью повышения работоспособности и точности уже имеющихся алгоритмов.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была произведена разработка программного продукта системы мониторинга силовых трансформаторов с функциями предиктивной аналитики.

В первой главе был составлен бизнес-план по развитию и реализации продукта в перспективе перехода к планомерному выходу на рынок систем мониторинга.

Во второй главе был произведён анализ имеющихся методик определения состояния силовых трансформаторов с целью разработки собственной методики на основе анализа частотных характеристик.

В третьей главе было произведено составление математической модели системы мониторинга с последующей реализацией в виде программного продукта. Для этого был прописан алгоритм работы данной системы мониторинга исходя из которой был определён перечень математических моделей, которые должны будут быть использованы при её разработке таким математическими моделями стали в первую очередь быстрое преобразование Фурье, а также выявят преобразование для разложения полученного сигнала с последующей математической обработкой. Для упрощения работы математического аппарата был также применён фильтр Калмана который непосредственно будет отвечать за фильтрацию шумов, генерируемых оборудованием трансформатора, а также окружающей средой, а также помимо этого был выбран для работы с тем мониторинга математический аппарат с методом Прони который бы позволил восстанавливать недостающие для обработки данные снятого с сигнала. Учитывая предполагаемые условия работы системы мониторинга также в этой главе, была выбрана модель по которой будет происходить имплементирование блока мониторинга в систему работы существующего силового трансформатора, а также рассмотрены некоторые примеры остальных

методик частотного отклика, так или иначе использующиеся для написания алгоритма работы системы предиктивного мониторинга.

В четвёртой главе был создан программный продукт системы мониторинга, на основе ранее разработанной математической модели. Помимо создания программного продукта была также разработана концепция применения и встраивания в существующие системы разработанной системы предиктивного мониторинга силового трансформатора. Также был разработан 3D макет данной системы подготовленных к последующему выпуску и также было определено место предполагаемой установки данной системы для тестирования в реальных условиях, вследствие чего будет также произведена доработка

Дальнейшими шагами для создания системы предиктивной аналитики состояния силовых трансформаторов станет её тестирование и апробация на реальном энергетическом объекте. Данные мероприятия рассчитаны на лето и осень 2024-го года.

Использование подобной системы предиктивной аналитики состояние силовых трансформаторов позволит не только вовремя распознать зарождающиеся дефект на ранних стадиях чем поможет предотвратить ранние выход оборудования из строя, так и даст более объёмное представление о состоянии имеющегося оборудования в данный момент времени что в перспективе позволит подготовиться ремонта трансформаторов на ранней стадии в том числе произвести заказ необходимых запчастей а также составить график проведения работ для последующего проведение ремонтных работ.

Так же в ходе выполнения выпускной квалификационной работы была получена поддержка от некоммерческих и государственных организаций; помимо этого было принято участие в программе «Студенческий Стартап» – в рамках данного мероприятия были получены средства для финансирования проекта системы предиктивного мониторинга.

Список используемой литературы

1. Александров Н.М. Методы интерпретации результатов частотного анализа обмоток силовых трансформаторов / Хренников А.Ю. // Материалы III Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». – 2019. - С.415-421.
2. Александров Н.М. Моделирование обмотки силового трансформатора ТДТН 16000-35 / Хренников А.Ю. // Материалы III Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». – 2019. - С.421-426.
3. Александров Н.М. Применение искусственного интеллекта в управлении электрическими сетями / Любарский Ю.Я. // Энергия единой сети. – 2020. - №1(50). С. 34-39. Автореферат
4. Александров Н.М., Совершенствование метода диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов, дис., к.т.н.: 05.09.01, Самарский государственный университет, Самара, 2020 – с. 40.
5. Ведомственный проект «Цифровая энергетика» [электронный ресурс] Министерство энергетики РФ URL: <https://minenergo.gov.ru/activity/project-activities/projects/departamental-project-digital-energy> (дата обращения 13.04.2024)
6. Голоднов Ю.М. Контроль за состоянием трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 88 с.
7. ГОСТ 20243-88. Трансформаторы силовые. Методы испытаний на стойкость при коротком замыкании. Госстандарт.
8. Зима Т.Е., Зима Е.А. Теоретические основы электротехники. Основы теории электромагнитного поля // Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 198 с.

9. И.В. Давиденко Оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам традиционных испытаний и измерений: учебно-методическое пособие / И.В. Давиденко – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 96 с.
10. Кривоконева О.О., Кудояров Р.И., Мавлекаев Е.Ю., Коныс Е.М., Прахов И.В., Хисматуллин А.С. Продление ресурса масляных трансформаторов с длительным сроком эксплуатации // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering, Vol. 17, No. 3, 2017. pp. 60-66.
11. Методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей URL:<https://docs.cntd.ru/document/456088008> (дата обращения: 09.01.2024).
12. Мировое производство электроэнергии [электронный ресурс] EnerData URL: <https://energystats.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html> (дата обращения 14.04.2024)
13. Ндайизейе М., Ильдарханов Р.Г., Усачёв А.Е. Диагностика обмоток силовых автотрансформаторов на основе анализа резонансных частот их модели // Материалы докладов X международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» 25–27 марта 2015 г. Казань, КГЭУ. Том 1с 108-109.
14. Ндайизейе М., Ильдарханов Р.Г., Усачёв А.Е. Оценка состояния обмоток силовых трансформаторов на основе методики допустимых отклонений частот резонансов // Молодая мысль – развитию энергетики: Материалы VII Межвузовской (XII) научно-технической конференции студентов и магистров. Братск: Изд-во БрГУ, 2014 с 79-83.
15. Обзор оборудования онлайн-мониторинга трансформаторного масла для анализа растворенных газов URL:<https://itc-avikon.ru/materials/obzor-oborudovaniya-onlajn-monitoringa-transformatornogo-masla-dlya-analiza-rastvorenyyh-gazov/> (дата обращения: 09.01.2024).

16. ООО "Димрус". Системы диагностического контроля вводов трансформаторного оборудования. Пермь: ООО "Димрус", 2019.
17. Орехов, Э. А. Методы неразрушающего контроля электротехнического оборудования / Э. А. Орехов, В. В. Абрамов // Энергоэксперт. – 2020. – № 2(74). – С. 16-19. – EDN KJOSYW
18. Показатель технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ) [электронный ресурс] Министерство энергетики РФ URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22767> (дата обращения 13.04.2024)
19. Показатель энергетической эффективности объектов электроэнергетики [электронный ресурс] Министерство энергетики РФ URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22442> (дата обращения 08.04.2024)
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614477 Российская Федерация. Оценка технического состояния обмоток силового трансформатора по величине индуктивности: № 2023613329: заявл. 15.02.2023: опубл. 02.03.2023 / В. В. Чиндин.
21. Статистический обзор мировой энергетики [Электронный ресурс] URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 21.10.2023)
22. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации»
23. Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей LXIII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – 408-412 с.
24. Хренников А.Ю., Шлегель О.А., Шифрин Л.Н. Электродинамические испытания трансформатора типа ТЦ-666000/500 на МИС, г. Тольятти // Известия вузов. “Электромеханика”. – 2006. – № 6.

25. Харламов Виктор Васильевич, Скляр Андрей Владимирович, Попов Денис Игоревич, Ерошенко Александра Викторовна Математическая модель асинхронного двигателя с учетом пазовых гармоник в индукции магнитного поля и неисправностей различного типа // ОНВ. 2018. №4 (160). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-asinhronnogo-dvigatelya-s-uchetom-pazovyh-garmonik-v-induktsii-magnitnogo-polya-i-neispravnostey-razlichnogo> (дата обращения: 10.04.2024).

26. Чиндин В.В., Москалёв Л.Б. РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА. / Чиндин В.В., Москалёв Л.Б., Кретов Д.А. // Молодежь. Наука. Общество - 2021. Сборник студенческих работ Всероссийской студенческой научно-практической междисциплинарной конференции. Отв. за выпуск С.Х. Петерайтис. Тольятти, 2023. С. 908-912.

27. Чиндин В.В., Москалёв Л.Б., Кретов Д.А. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ФУНКЦИЕЙ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ. / Чиндин В.В., Москалёв Л.Б., Кретов Д.А. // Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации. Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 49-54.

28. Ю. В. Румянцев Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора Т. 59, № 3 (2016), с. 203–224

29. Arri, E. and Moeei, F. (1994) Status Assessment of Transformer Windings Via On-line Stray Inductance Measurement. IEEE Instrum. Meas. Technology. Conf IMTC94, Hamamatsu, May 1994, 1171-1174.

30. C. Yao, Z. Zhao, Y. Chen, X. Zhao, Z. Li, Y. Wang, Z. Zhou and G. Wei, "Transformer Winding Deformation Diagnostic System Using Online High Frequency Signal Injection by Capacitive Coupling," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21 , No.4, Aug. 2014.

31. E. Aburaghiega, M. Emad Farrag, D. M. Hepburn and B. Garcia, "Power transformer health monitoring: A shift from off-line to on-line detection," 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2015.7339901.
32. H. Ahrens, et al, "Comparison of the extended kalman filter and the unscented kalman filter for magnetocardiography activation time imaging," Advances in Radio Science, vol. 11, no. 23, pp. 341 - 346, 2013.
33. H. Rahimpour, S. Mitchell, J. Tusek, "The Application of Sweep Frequency Response Analysis for the Online Monitoring of Power Transformers", Australian Universities Power Engineering Conference Sep 2016
34. Hormatollah Firoozi, Mohammad Kharezi, Hasan Bakhshi. Turn- to - turn fault localization of power transformers using neural network techniques // Proceedings of the 9th International conference on properties and applications of dielectric materials. July 19-23, 2009, Harbin, China B-11 p. 249-252.
35. J. Gui, W. Gao, K.Tan, S. Gao "Deformation Analysis of Transformer Winding by Structure Parameter" Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5 2003, Nagoya
36. M. M. Shabestary, A. J. Ghanizadeh, G. B. Gharehpetian, and M. Agha- Mirsalim, "Ladder network parameters determination considering nondominant resonances of the transformer winding," IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 1, pp. 108–117, Feb. 2014.
37. N. A. Muhamad, B. T. Phung and T. R. Blackburn, "Comparative study and analysis of DGA methods for mineral oil using fuzzy logic," 2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007), Singapore, 2007, pp. 1301-1306
38. N. Y. Ko and T. G. Kim, "Comparison of kalman filter and particle filter used for localization of an underwater vehicle," in URAI, 2012 9th International Conference on. IEEE, pp. 350 - 352, 2012.
39. Pradnya Jadhav "Study of Transformer Winding Deformation Diagnostics Techniques using Transfer Function" International Conference on

Control, Communication, Power Engineering CCPE 2013, LNCS pp. 455-463, 2013.

40. S. Gopalakrishna, V. Jayashankar, K. V. Jagadeesh, and N.M.Mohan, "Online assessment of winding deformation based on optimised excitation," in Proc. IEEE Int. Workshop Appl. Meas. Power Syst., 2010, pp. 84-89.

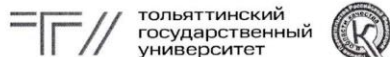
41. S. Julier, et al, "A new approach for the nonlinear transformations of means and covariances in linear filters," IEEE Transactions on Automatic Control, 1996.

42. W. Portilla, G. Mayor, J. Guerra, and C. Gonzalez-Garcia, "Detection of transformer faults using frequency-response traces in the low-frequency bandwidth," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 9, pp. 4971–4978, Sep. 2014.

43. Wang, Y., Li, Y.-M. and Zhang C.-L. (1997) The Comparison Study on LVI and FRA Method of Detecting Winding Deformation Faults in Transformers. High Voltage Engineering, 23, 13-15.

Приложение А

Письмо поддержки от Тольяттинского государственного университета



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
(ТГУ)

ОКПО 55914968
ОГРН 1036300997567
ИНН 6320013673
КПП 632401001
Белорусская ул., 14, г. Тольятти,
Самарская обл., 445020
Телефоны: (8482) 44-94-44, 44-94-24
Факс (8482) 37-85-89
E-mail: office@tltu.ru
<https://www.tltu.ru>



В Федеральное государственное
бюджетное учреждение «Фонд
содействия развитию малых
форм предприятий в научно-
технической сфере»

27.03.2023 № 010449
на № _____ от _____

ПИСЬМО ЗАИНТЕРЕСОВАННОСТИ

Уважаемые коллеги!

Тольяттинский государственный университет рекомендует магистранту первого курса Москалеву Льву Борисовичу участвовать в конкурсе «Студенческий стартап» (в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства») и подтверждает наличие заинтересованности со стороны университета в реализации проекта "Оценка технического состояния активной части двухобмоточного силового трансформатора", поданного на конкурс в направлении «Цифровые технологии».

Цифровизация энергосистемы является наиболее приоритетным направлением современной российской энергетики. Возрастающая нагрузка на распределительные системы и силовые трансформаторы создаёт новые трудности для традиционных систем мониторинга, которые оказываются слишком громоздкими и медленными. На фоне этого, а также на фоне развивающихся цифровых технологий, предиктивная аналитика и системы мониторинга являются ключом к повышению надёжности, качества и экономичности энергосистемы РФ.

Проект Москалева Льва направлен не только на повышение качества мониторинга силовых трансформаторов, а также на ликвидацию человеческих факторов и излишних процессов, которые усложняют всю процедуру.

Университет готов поддержать студенческий проект информационно - размещать информацию и новости на информационных ресурсах ТГУ, предоставить свою материально-техническую базу и консультативную помощь научно-педагогических кадров на период обучения студента в университете.

Проректор
по научно-инновационной деятельности

Кичатова Оксана Ивановна
8(8482)449689



С.Х. Петерайтис

Приложение Б

Письмо поддержки от ООО «СК ЛАЙФ»



sk·life

ООО «СК ЛАЙФ»

445131, РФ, Самарская обл., Ставропольский
район, с.Узюково, ул. Чкалова д.25
ИНН/КПП 6382080503/638201001

Генеральному директору
ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм
предприятий в научно-технической сфере»
Полякову С.Г.

Уважаемый Сергей Геннадьевич!

Компания ООО "СК ЛАЙФ" выражает заинтересованность в проекте Москалева Льва Борисовича. Автор проекта намерен разработать программное обеспечение для раннего определения зарождающегося дефекта в двухобмоточном трансформаторе с целью определения срока его службы. Мы считаем данную разработку перспективной и востребованной на рынке систем мониторинга трансформаторов. После успешной реализации проекта компания ООО "СК ЛАЙФ" намерена заключить договор о сотрудничестве и оказать поддержку создания полноценного продукта.

С уважением:



Директор ООО «СК ЛАЙФ»
Платонов Д.А.

Приложение В

Письмо поддержки от ООО «РУРИКО»

РУРИКО

Общество с ограниченной ответственностью
445004, г. Самара, пр-д. Большой, домовладение 29,
Тел. +7 996 342-56-62
E-mail: vladislav.chindin@gmail.com
ИНН 6382093118, КПП 638201001,
ОГРН 1226300037512, ОКПО 98018374

№ 132 от 15.05.2024

R U R I C O

Уважаемый Сергей Геннадьевич!

Компания ООО РУРИКО настоящим письмом подтверждает свою заинтересованность в сотрудничестве с Москалевым Львом Борисовичем с целью реализации проекта «Разработка системы мониторинга силового трансформатора с функциями предиктивной аналитики».

Указанный проект важен для компании ООО РУРИКО, поскольку продукция, полученная в процессе сотрудничества позволит выйти на рынок предиктивного мониторинга, а также будет пользоваться спросом у потенциальных покупателей в связи с высокими темпами цифровизации энергосистемы Российской Федерации.

Генеральный директор Чиндин В.В.

Подпись



Приложение Г

Письмо поддержки от МОО «Ассоциация региональной молодежи»

Межрегиональная общественная организация «Ассоциация региональной молодежи»

 Ассоциация
региональной
молодежи

В Федеральное государственное
бюджетное учреждение «Фонд содействия
развитию малых форм предприятий в
научно-технической сфере»

Исх. № АПМ-21/24 от 13.06.24

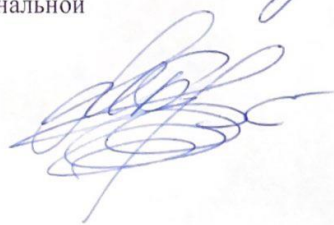
Проект Москалева Льва «Разработка системы мониторинга силового трансформатора с функциями предиктивной аналитики» направлен на создание системы мониторинга технического состояния силового трансформатора в режиме реального времени. Данный подход к мониторингу силовых трансформаторов новаторский. Проектная группа планирует реализовать не только систему мониторинга активной части в режиме реального времени, но и на основании ретроспективных и прогнозных значений режимов эксплуатации и аварий прогнозировать возникновение возможных дефектов в оборудовании.

Силовой трансформатор является одним из ключевых и дорогостоящих элементов электроэнергетической системы Российской Федерации. Его стабильная и безаварийная работа является задачей, к которой стремятся компании, связанные с генерацией, распределением и потреблением электроэнергии. В настоящее время для определения технического состояния силового трансформатора устанавливают множество сложносоставных систем мониторинга или отключают его от сети для подключения специализированного оборудования, которое неспособно работать на подключенном к сети трансформаторе.

При успешной реализации проекта потенциальными потребителями могут быть многие сетевые компании, эксплуатирующие силовые трансформаторы. В связи с этим МОО «Ассоциация региональной молодежи» заинтересована и рекомендует поддержку проекта в конкурсном отборе.

Председатель
Координационного совета МОО
«Ассоциация региональной
молодежи»


М.И. Бахчев



Приложение Д
Сертификат участия в очной защите проекта в рамках программы
«Студенческий Стартap»

