

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
И ИННОВАЦИЙ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

ОТЧЕТ

за 2025 год по научному проекту:

**«РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ
И СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ»**

(промежуточный)

Директор НИИ Энергетики,

доктор эконом. наук, профессор

Касымова В. М.

Руководитель НИР,

доктор техн. наук, профессор

Бочкарев И. В.

Бишкек 2025 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, г.н.с., д.т.н., проф. _____ Бочкарев И. В.
(разделы 1, 2, 4, 5)

Отв. исполнитель, г.н.с., д.т.н., проф. _____ Брякин И. В.
(разделы 1, 3, 4)

Г.н.с., д.т.н., доцент _____ Верзунов С. Н.
(раздел 5)

Г.н.с., д.т.н., проф. _____ Лыченко Н. М.
(раздел 5)

Г.н.с., д.т.н., доцент _____ Галбаев Ж.Т.
(раздел 1, 2)

С.н.с., к.т.н., доцент _____ Гунина М. Г.
(разделы 2, 2)

С.н.с. _____ Попова И.Э.
(раздел 2)

С.н.с. _____ Сандыбаева А. Р.
(введение, раздел 3)

С.н.с. _____ Корякин С.В.
(разделы 1, 2)

С.н.с. _____ Усацева Л. А.
(раздел 1, 2, заключение)

РЕФЕРАТ

Отчет: стр. 146, рис. 36, использованных источников 100.

Перечень ключевых слов: диагностика и неразрушающий контроль, электроэнергетическое оборудование, нагрев обмоток, системы теплового контроля, вибродиагностика, интеллектуальный мониторинг.

Объект исследования – способы и устройства для контроля и диагностики состояния технических компонентов, входящих в состав систем электроэнергетики Кыргызстана.

Цель работы – повышение надежности и эффективности эксплуатации технических систем электроэнергетики Кыргызстана путем разработки новых неразрушающих методов и средств контроля и диагностики оборудования и сооружений, входящих в их состав.

Основные задачи исследований на 2025 год:

- Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений, входящих в состав электроэнергетических систем.
- Разработка принципов построения сенсорных компонентов систем контроля и диагностики.
- Анализ систем контроля нагрева обмоток электрооборудования.
- Разработка и научное обоснование нового способа теплового контроля электрооборудования переменного тока.
- Анализ систем вибродиагностики и неразрушающего контроля энергетического оборудования, позволяющих оценить состояние энергетического оборудования без вывода его из процесса работы.
- Разработка дифференциального параметрического индуктивного вибродатчика и теоретическое обоснование его работоспособности.
- Разработка концепция построения системы мониторинга целостности опор ЛЭП.
- Разработка системы комплексного интеллектуального мониторинга электроэнергетических объектов на основе мультимодальных сигналов с использованием периферийного искусственного интеллекта и технологий PLC.

Используемые методы исследования – фундаментальные законы физики и теоретической электротехники, а также принципы построения измерительных систем и методы интеллектуального анализа данных с использованием периферийного искусственного интеллекта.

Основные результаты:

В первой главе рассмотрены и проанализированы технические средства для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений, входящих в состав электроэнергетических систем.

Выполнены следующие работы:

1. Рассмотрены вопросы диагностики и неразрушающего контроля технических объектов. Проанализированы задачи диагностирования, рассмотрены системы тестового и функционального диагностирования, описана классификация средств контроля и диагностирования по различным признакам.

2. Рассмотрены особенности неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования, описана структура системы технической диагностики. Рассмотрены основные этапы и задачи такой диагностики.

3. Выполнен анализ известных методов неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования, а также принципов построения технических средств для их реализации.

4. Рассмотрены принципы построения сенсорных компонентов систем контроля и диагностики и принципы построения интеллектуальных систем диагностирования на основе самообучающейся нейронной сети.

Во второй главе выполнены следующие работы:

5. Рассмотрены причины нагрева обмоток электрических машин, а также влияние нагрева на работоспособность электрических машин.

6. Рассмотрены и проанализированы основные методы непосредственного контроля температуры обмоток электрических машин переменного тока, а также косвенные методы контроля, основанные на результатах измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

7. Показано, что наиболее целесообразным методом контроля температуры обмотки является метод сопротивления, основанный на принципе зависимости активного сопротивления проводника от температуры, в котором в качестве термодатчика используется непосредственно сама обмотка. Сформулирована задача и направление дальнейших исследований.

В третьей главе описаны результаты разработки системы контроля нагрева обмоток и тепловой защиты электрических машин переменного тока. Выполнены следующие работы:

8. Разработан новый способ контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока в рабочем режиме без отключения их от питания. Его реализация осуществляется посредством двух независимых измерительных каналов, один из которых выполняет измерение электрического напряжения

на измерительном шунте, а другой – измерение активной составляющей электрического напряжения на фазной обмотке АД, и вычислением значений активного сопротивления обмотки и ее температуры.

9. Выполнено теоретическое обоснование предложенного способа контроля.

10. Разработан и запатентован модернизированный способ контроля нагрева обмотки. Поскольку температурные процессы имеют большую инерционность, предлагается реализовать процесс измерения информационных сигналов с определенной периодичностью. Показан алгоритм этого подключения в зависимости от условий нагрева АД в процессе эксплуатации.

11. Разработана автоматизированная система управления АД с использованием разработанного способа тепловой защиты, управление которой осуществляется микроконтроллером. Приведена обобщенная блок-схема этой системы, показаны временные диаграммы работы таймеров в зависимости от режимов работы АД.

В четвертой главе выполнены следующие работы:

12. Проанализированы факторы, влияющие на эксплуатационное состояние конструктивных элементов линий электропередач. Показано, что опоры воздушных ЛЭП в значительной степени определяют надежность и долговечность ЛЭП в целом. Проведен анализ систем неразрушающего контроля опор ЛЭП, показано, что наиболее достоверная и информативная оценка надежности элементов ЛЭП может быть получена с помощью вибродиагностики.

13. Разработана конструкция дифференциального параметрического индуктивного преобразователя значений вибрации в электрический сигнал в виде вибродатчика соленоидного типа, в основе работы которого заложен новый принцип действия. В предложенном датчике отсутствуют катушки возбуждения, а его функциональные элементы образуют измерительный мост, в плечи которого входят межвитковые емкости обмоток первой и второй измерительных катушек, а также емкости, образованные металлическим цилиндрическим электродом с расположенным внутри него ферромагнитным стержнем и первыми нижними рядами обмоток измерительных катушек. Мостовая схема функционирует в резонансном режиме, что обеспечивает высокую чувствительность датчика, а квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности.

14. Выполнено теоретическое обоснование работоспособности предложенного вибродатчика.

В пятой главе рассмотрены вопросы комплексного интеллектуального мониторинга электроэнергетических объектов на основе мультимодальных сигналов и технологий периферийного искусственного интеллекта. Получены следующие результаты:

16. Рассмотрены физико-информационные основы акусто-диэлектрометрического мониторинга, проведен обзор и анализ известных коммерческих и исследовательских решений систем контроля. Определено, что с их помощью невозможно проводить одновременный контроль электрических и механических параметров ЛЭП.

17. Разработана структурная схема комбинированного интеллектуального акусто-диэлектрометрического прибора для диагностики электрических и механических подсистем энергосетевой инфраструктуры. Комбинирование различных физических каналов (акустических, электромагнитных, диэлектрических) обеспечивает повышение достоверности диагностики, а использование встроенного ИИ позволяет выполнять реалтайм-анализ и классификацию дефектов непосредственно на месте эксплуатации без обращения к облачным сервисам. Объединение данных с разных сенсоров повышает точность решений и устойчивость к шумам и помехам, что особенно важно для условий подстанций и линий электропередачи.

18. Проведены исследования методов предварительной обработки и особенностей архитектуры модели, обеспечивающей интеллектуальные функции предлагаемого прибора при контроле ЧР и акустического сигнала, зарегистрированного пьезодатчиком. Для комплексного анализа этих данных и объединения разнородных признаков была спроектирована специализированная нейросетевая архитектура, обеспечивающая совместную обработку сигналов и изображений.

19. Разработана и описана последовательность интеграции разработанного интеллектуального прибора в системы техобслуживания энергетических сетей. Показано, что мультимодальный неразрушающий мониторинг с периферийным искусственным интеллектом следует рассматривать как перспективное направление развития цифровых технологий в электроэнергетике.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СООРУЖЕНИЙ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	14
1.1. Общие вопросы технической диагностики и неразрушающего контроля	14
1.2. Средства контроля и диагностирования	18
1.3. Особенности неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования	20
1.4. Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования	28
1.5. Принципы построения сенсорных компонентов систем контроля и диагностики	39
1.6. Выводы	43
ГЛАВА 2. СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	44
2.1. Постановка задачи исследования	44
2.2. Нагрев обмоток электрических машин	47
2.2.1. Влияние нагрева на работоспособность электрических машин	47
2.2.2. Причины нагрева и перегрева обмоток электрических машин	49
2.3. Аналитический обзор систем теплового контроля обмоток электрооборудования переменного тока	50
2.3.1. Способы непосредственного контроля температуры	52
2.3.2. Способы косвенного контроля температуры	54
2.4. Выводы	61
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ НАГРЕВА ОБМОТОК И ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	62
3.1. Разработка нового способа контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока в рабочем режиме без отключения их от питания	62

3.2. Разработка модернизированного способа контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока	68
3.3. Экспериментальная проверка разработанного устройства	74
3.4. Разработка автоматизированной системы управления электродвигателя с тепловой защитой	76
3.5. Выводы	82
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ СИСТЕМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	83
4.1. Причины и цель диагностического обследования основных элементов ЛЭП	83
4.2. Современное состояние вопроса контроля и диагностики опор ЛЭП	86
4.3. Разработка датчика виброперемещения	89
4.4. Теоретическое обоснование работоспособности предложенного датчика виброперемещения	91
4.5. Выводы	99
ГЛАВА 5. КОМПЛЕКСНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРИФЕРИЙНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	100
5.1. Интеграция акустических и диэлектрических подходов в мониторинге высоковольтных систем	100
5.2. Физико-информационные основы акусто-диэлектрометрического мониторинга	102
5.2.1. Акустические индикаторы ЧР и дефектов конструкций	102
5.2.2. Диэлектрометрические методы и каналы регистрации ЧР и увлажнения	103
5.2.3. Алгоритмы обработки на периферии (Edge AI): от PRPD к CNN	105
5.2.4. Байесовская интеграция акустических и электромагнитных признаков	106
5.3. Обзор коммерческих и исследовательских решений	108
5.4. Возможности интеллектуального прибора	111
5.4.1. Функциональная структура системы	111
5.4.2. Режимы применения: портативный и стационарный	114

5.4.3. Реалтайм-обработка сигналов и инференс на устройстве	114
5.5. Методы сбора, разметки и предварительной обработки данных	115
5.6. Архитектура мультимодели для интеграции акустических и электромагнитных признаков	118
5.7. Интеграция интеллектуального комплекса в инфраструктуру энергетических сетей	122
5.8. Научно-практическая интерпретация результатов	123
5.9. Выводы	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	128
ПРИЛОЖЕНИЯ	136

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая система (энергосистема) — это совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединённых между собой и связанных общностью режимов в непрерывном процессе производства, преобразования, передачи и распределения электрической и тепловой энергии при общем управлении этим режимом (рис. В.1).

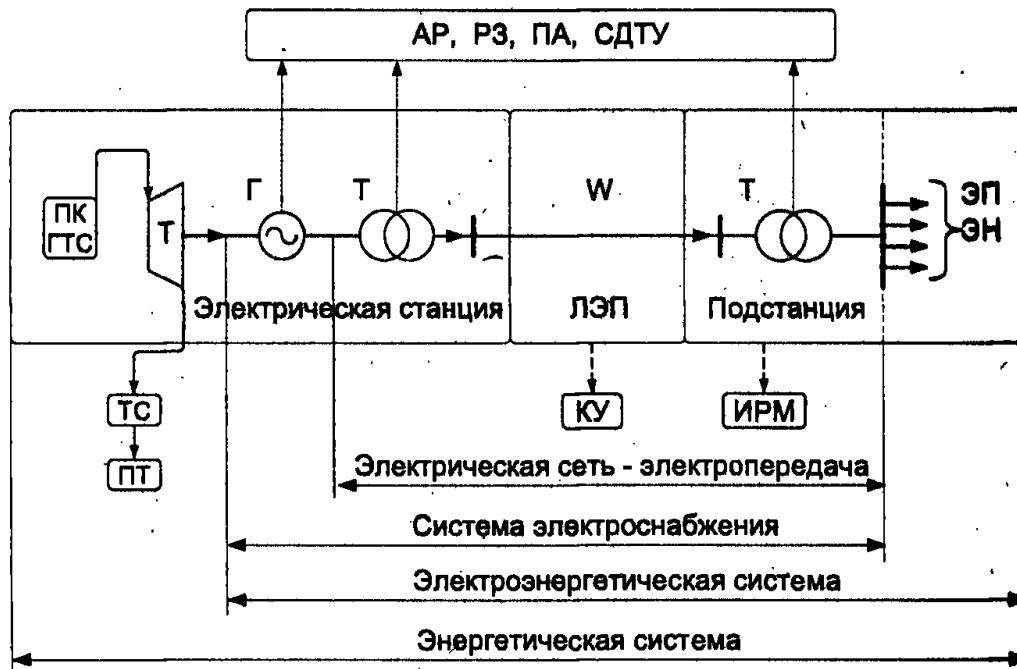


Рис. В.1. Структура энергетической системы

Электроэнергетическая система (ЭЭС) – это совокупность установок и устройств, предназначенных для непрерывного процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической. Из нее исключаются тепловые сети и тепловые потребители.

Таким образом, ЭЭС – это электрическая часть энергетической системы, в состав которой входят [1]:

- электрические части электрических станций, включая генераторы;
- электрические распределительные устройства с повышающими и понижающими трансформаторами;
- повышаительные и понижаительные подстанции;
- линии электропередач;
- приёмники электроэнергии.

Таким образом, ЭЭС включает в себя электростанции, а также установки, потребляющие электроэнергию, электрические линии, связывающие их с электростанциями, электрические распределительные устройства с повышающими и понижающими трансформаторами.

ЭЭС характеризуется следующими особенностями [2]:

- тесное взаимодействие в едином производственном процессе большого количества энергетических объектов, расположенных на большой территории;
- строгое соответствие выработки и потребления электроэнергии в каждый момент времени, отсутствие её крупномасштабных накопителей;
- резкая неравномерность производственного процесса, обусловленная суточными, сезонными и территориальными изменениями потребления электрической и тепловой энергии.

Структура энергетической системы Кыргызской Республики включает несколько элементов, которые разделены по видам деятельности:

1. Производство электрической энергии. В основном его осуществляет открытое акционерное общество «Электрические станции».
2. Передача электрической энергии по высоковольтным сетям — открытое акционерное общество «Национальная электрическая сеть Кыргызстана» (ОАО «НЭС Кыргызстана»).
3. Распределение электрической энергии по сетям 35 кВ и ниже до конечного потребителя выполняют четыре региональные электрораспределительные компании: ОАО «Северэлектро», ОАО «Жалалабадэлектро», ОАО «Ошэлектро» и ОАО «Востокэлектро».

В сложившихся экономических условиях в КР очень актуальной проблемой является обеспечение надежности работы электроэнергетических систем и продление срока службы электрооборудования, исчерпавшего назначенного срока службы [3, 4]. Правильно спланированные диагностические мероприятия могут значительно увеличить срок реальной эксплуатации оборудования, что, безусловно, обеспечит снижение затрат. При этом имеющиеся мощности по выработке электроэнергии используются зачастую недостаточно эффективно из-за отсутствия у эксплуатационников приборов контроля и диагностики оборудования, что исключает возможность оперативной замены тех устройств, технические параметры которых выходят за допустимые пределы.

Основной задачей контроля и диагностики является определение состояния оборудования и сооружений и прогнозирование их работоспособности, определение путей и средств продления их эксплуатационных ресурсов [5].

Разработка мероприятий диагностического контроля непременно является составной частью процесса эксплуатации электрооборудования.

Объекты диагностического контроля определяются главным образом функциональной значимостью конкретного элемента в электроэнергетической системе. В последние годы широкое распространение получила диагностика электрооборудования (генераторов, трансформаторов и т.д.), как наиболее дорогостоящих и ответственных элементов электроэнергетических систем, а также диагностика элементов электрической части воздушных линий (ВЛ) и подстанций (ПС) – проводов, контактных соединений и изоляции. Кроме того, весьма актуальна и диагностика механической части ВЛ и ПС – опор, стоек под оборудование и фундаментов. Учитывая массовость этих элементов в составе любой электрической сети, вероятность возникновения аварий из-за повреждения механической части отдельных конструкций достаточна высока. При этом, более серьезное внимание следует уделять проблеме диагностики электрической и механической частей электроэнергетической системы, которые находятся в длительной эксплуатации.

В настоящее время нормативные сроки службы большого количества объектов, входящих в состав электроэнергетических систем Кыргызской Республики, заканчиваются. Отсутствие необходимых и достаточных инвестиций для реконструкции этих объектов на протяжении последних лет привело к накоплению больших объемов отложенных работ. В итоге существует крайне серьезная проблема: с одной стороны – огромное число объектов, требующих незамедлительной реконструкции исходя из нормативных сроков службы; а с другой стороны – отсутствие финансовых возможностей для ее выполнения. Поэтому необходимо отказаться от тотальной замены или реконструкции объектов с просроченным нормативным сроком их службы и использовать их адресную замену и адресно-восстановительный ремонт.

Очевидно, что начальным этапом этой работы является диагностика этих объектов с использованием современных методов диагностики. Целью этой диагностики является ранжирование оборудования и конструкций по их остаточным эксплуатационным характеристикам с разделением на 3 группы:

1) группа продления ресурса, которая включает объекты с нормальными остаточными эксплуатационными характеристиками, несмотря на окончание их нормативного срока службы;

2) группа объектов, остаточные эксплуатационные характеристики которых могут быть восстановлены в результате выполнения текущего или капитального ремонта (адресно-восстановительный ремонт);

3) объекты, остаточные эксплуатационные характеристики которых ниже нормируемых значений и не могут быть восстановлены в результате выполнения ремонта (адресная замена).

Следует отметить, что в настоящее время нет достаточно точных и надежных методов и технических средств контроля и диагностики указанных элементов. В связи с этим разработка новых технологий и систем автоматического контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики является актуальной научной и практической задачей, требующей своего оперативного решения.

При выполнении указанных работ основное внимание будет направлено на разработку новых способов и диагностического оборудования для неразрушающего контроля, обладающих повышенной чувствительностью и точностью при расширении диапазона контролируемых параметров, увеличении надежности поиска и контроля.

Решение поставленных задач позволит:

- улучшить систем теплового контроля за счет использования новых подходов к измерению температуры, основанных, в частности, на использовании различных систем выделения информационных сигналов непосредственно из фазных напряжений и токов электрооборудования переменного тока непосредственно во время эксплуатации в режиме реального времени без вывода электрооборудования из работы;

- на базе созданных систем теплового контроля разработать, научно обосновать и запатентовать новые эффективные средства тепловой защиты, что является важным направлением повышения технико-экономического уровня современного электрооборудования;

- разработать и научно обосновать новый способ и устройство вибродиагностики, которые позволяют без разборки и вывода из процесса работы оценить состояние энергетического оборудования и обеспечить не только выявление отказов, в том числе и еще до их возникновения, но и позволяют получить информацию о тенденциях изменения различных параметров. Это делает возможным проводить оценку потенциальных рисков и предпринимать своевременные действия для предотвращения выхода оборудования из строя.

- оптимизировать процессы ремонта и устранения конкретного дефектного элемента в линии электропередач;

- осуществлять комплексный интеллектуальный мониторинг электроэнергетических объектов на основе мультимодальных сигналов и технологий периферийного искусственного интеллекта

ГЛАВА 1.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СООРУЖЕНИЙ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1.1. Общие вопросы технической диагностики и неразрушающего контроля

Техническая диагностика - отрасль научно-технических знаний, сущность которой составляют теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы. Основное назначение технической диагностики - повышение надежности объектов на этапе их эксплуатации, а также в предотвращении производственного брака на этапе изготовления объектов и их частей [6, 7].

Неразрушающий контроль (НК) — это комплекс методов технической диагностики, которые позволяют выявлять дефекты и контролировать качество материалов, изделий и конструкций без их разрушения или нарушения целостности. Цель НК — обеспечение безопасности и надёжности эксплуатации технических объектов на этапах производства, строительства и эксплуатации [8, 9]. Поскольку неразрушающий контроль не приводит к необратимым изменениям проверяемого объекта, то это очень ценный метод, который может сэкономить как деньги, так и время при оценке качества, диагностики, устранении неполадок и исследованиях.

Повышение надежности обеспечивается улучшением таких показателей:

- коэффициент готовности;
- коэффициент технического использования;
- время восстановления работоспособного состояния;
- ресурс или срок службы и наработка до отказа или наработка на отказ для резервированных объектов с восстановлением.

Кроме того, диагностическое обеспечение позволяет получать высокие значения достоверности. Предотвращение правильного производственного функционирования брака организацией диагностирования достигается операциях объектов, правильной входного контроля комплектующих изделий и материалов, а также контроля технологических процессов изготовления объектов, включая выходной контроль последних.

В общем случае, задачами диагностирования являются:

- проверка исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта;
- поиск дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования.

Постановка этих задач предполагает:

- прямое или косвенное задание класса возможных (рассматриваемых, заданных, наиболее вероятных) дефектов;
- наличие формализованных методов построения алгоритмов диагностирования, реализация которых обеспечивает обнаружение дефектов из заданного класса с требуемой полнотой или поиск последних с требуемой глубиной.

Диагностирование технического состояния любого объекта осуществляется теми или иными средствами диагностирования.

Средства могут быть:

- аппаратурными;
- программными;
- в качестве объекта средств диагностирования может также выступать человек-оператор, контролер, наладчик.

Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют систему диагностирования.

Взаимодействующие между собой объект диагностирования (ОД) и средства диагностирования (СД) образуют систему диагностирования. Различают системы тестового и функционального диагностирования [10]. В системах *тестового диагностирования* на ОД подаются специально организуемые тестовые воздействия. В системах *функционального диагностирования*, которые работают в процессе применения объекта по назначению, подача тестовых воздействий, как правило, исключается; на ОД поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его алгоритмом функционирования. На рис. 1.1 приведены обобщенные функциональные схемы систем тестового (рис. 1.1,а) и функционального диагностирования (рис. 1.1,б) соответственно.

Системы тестового диагностирования могут применяться на всех этапах жизненного цикла объекта ОД (в частности, при производстве и ремонте, хранении, перед каждым применением по назначению); функциональные обычно обеспечивают диагностирование в процессе применения ОД по назна-

чению. Основная функция последних – контроль правильности функционирования ОД в процессе выполнения им его функций и, если это возможно, указание вида ошибки либо неправильно работающего узла.

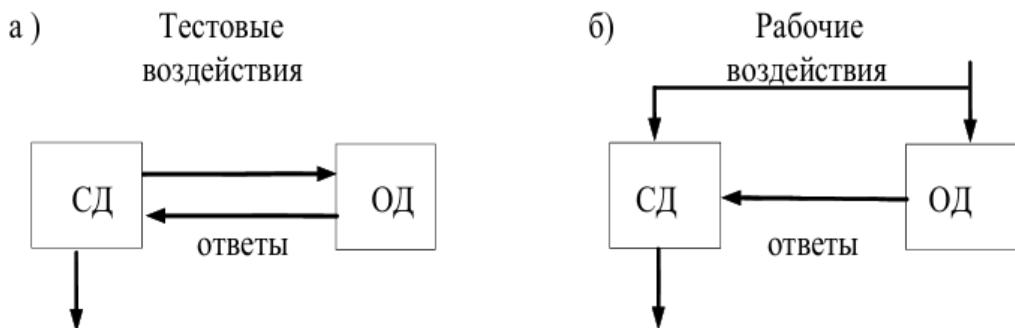


Рис. 1.1. Обобщенные схемы диагностирования:
 а – система тестового диагностирования;

б – система функционального диагностирования

Системы функционального диагностирования являются, как правило, встроенными и создаются одновременно с ОД. Они могут осуществлять диагностирование как непрерывно, так и периодически или эпизодически.

В системах обоих видов средства диагностирования воспринимают и анализируют ответы объекта на входные (тестовые или рабочие) воздействия и выдают результат диагностирования, т.е. ставят диагноз: объект исправен или неисправен, работоспособен или неработоспособен, функционирует правильно или неправильно, имеет такой-то дефект или в объекте повреждена такая-то его составная часть и т.п. Системы тестового диагностирования необходимы для проверки исправности и работоспособности, а также поиска дефектов, нарушающих исправность или работоспособность объекта. Системы функционального диагностирования необходимы для проверки правильности функционирования и для поиска дефектов, нарушающих правильное функционирование объекта.

При большом объеме контрольно-диагностических операций используемые системы тестового диагностирования обычно управляются от ПЭВМ. Основные составляющие систем тестового диагностирования показаны на рис. 1.2.

Прикладное программное обеспечение таких систем условно можно разделить на две части: программы подготовки информационного обеспечения и программы управления процессами диагностирования (включая обработку результатов диагностирования).



Рис. 1.2. Структурная схема системы тестового диагностирования

Для работы систем диагностирования необходимо заранее подготовить некоторые данные (информационное обеспечение), причем в удобной для после дующего использования форме. Обычно они готовятся заранее, до проведения процесса диагностирования. Это могут быть, например, результаты моделирования поведения исправного (эталоны) и неисправного ОД, параметры тестовых воздействий, значения допусков на аналоговые контролируемые параметры, электрическая схема ОД, тестовые задачи и др. Их качественное и быстрое по лучение невозможно без использования вычислительной техники и специальных программных средств моделирования. Современные системы автоматизации проектирования, так называемые САПР, включают подсистемы подготовки информации для диагностирования.

Вторую часть программных средств составляют программы, обеспечивающие управление собственно процессом диагностирования. Они реализуются на языке управляющей ЭВМ. Основные функции – организация подачи тестовых воздействий и измерение контролируемых параметров с помощью соответствующих технических средств, обеспечение диалога «оператор – ЭВМ» в ходе диагностирования, определение технического состояния ОД по результатам выполнения проверок и т.д.

Таким образом, система диагностирования в процессе определения технического состояния объекта реализует определенный алгоритм (тестового или функционального) диагностирования.

Алгоритм технического диагностирования состоит из совокупности элементарных проверок объекта и правил, устанавливающих последовательность

реализации элементарных проверок, и правил анализа результатов этих проверок. Эффективность процессов диагностирования зависит от качества алгоритмов диагностирования и качества средств диагностирования. Алгоритм диагностирования включает последовательность этапов, использование определённых методов контроля и оформление результатов. Его цель — определить техническое состояние объекта и оценить возможность его дальнейшей эксплуатации.

1.2. Средства контроля и диагностирования

Средства технического контроля и диагностики являются основной частью любой системы диагностирования, определяют эксплуатационно-технические характеристики этих систем и предоставляют всю необходимую информацию потребителям о техническом состоянии диагностируемых объектов. В диагностике они играют роль окончных устройств, являясь источниками информации для потребителя и одновременно приемником и устройством обработки диагностической информации. Эти средства относятся к широкому классу информационно-измерительных систем (ИИС) и своими параметрами определяют все выходные параметры системы [11].

Средства контроля и диагностирования могут быть:

- аппаратурными или программными;
- внешними или встроенными;
- ручными, автоматизированными или автоматическими;
- специализированными или универсальными.

Средства контроля и диагностирования (СКД) классифицируют по различным признакам, например:

- **По конструктивному исполнению.** Выделяют встроенные средства (составная часть объекта) и внешние (выполненные отдельно).
- **По области применения.** Средства могут быть специализированными (для диагностирования одного объекта или группы однотипных объектов) и универсальными (для объектов различных типов).
- **По степени автоматизации.** Средства могут быть ручными, автоматизированными и автоматическими.
- **По способу получения информации.** Выделяют средства для определения состояния по совокупности параметров и для оценивания состояния по сигналам.
- **По способу обработки информации.** Средства могут быть последовательного, параллельного и параллельно-последовательного действия.

Основными параметрами СКД являются: точность измерения, точность воспроизведения эмитируемых сигналов, информационная производительность, инструментальная достоверность, разрешающая способность, степень автоматизации.

Средства диагностирования являются так же объектами технической эксплуатации и объектами диагностирования, для этого в них предусматривается режимы самоконтроля, которые реализуются с помощью встроенных или внешних систем средств контроля и диагностики.

Выбор или разработка средств тестового диагностирования должны осуществляться с учетом следующих факторов:

- наличия серийного выпуска требуемых средств;
- наличия подходящих средств на заводе-изготовителе объекта;
- массовости выпуска объекта и его сложности;
- требуемой производительности средств и т.п.

Средства функционального диагностирования являются встроенными, поэтому разрабатываются и создаются одновременно с объектом.

Задачи определения технического состояния объектов:

- задача диагностирования (техническая диагностика);
- задача прогнозирования (техническая прогностика);
- задача генеза (техническая генетика).

Задача технической генетики возникает, например, при расследовании аварий и их причин, когда техническое состояние объекта в рассматриваемое время отличается от состояния, в котором он был в прошлом, в результате появления первопричины, вызвавшей аварию. Эти задачи решаются путем определения возможных или вероятных предысторий, ведущих в настоящее состояние объекта.

К задачам технической прогностики относятся, например, задачи, связанные с определением срока службы объекта или с названием периодичности его профилактических проверок и ремонтов. Решение задач прогнозирования важно для организации технического обслуживания объектов по состоянию.

Тестовое и функциональное диагностирование. Объекты в технической диагностике в общем случае делятся на дискретные и аналоговые. Для дискретных объектов задачей технической диагностики является построение тестов. В качестве диагностических моделей аналоговых объектов используются логические модели, графы причинно-следственных связей. Эти модели могут быть использованы при организации диагностирования на принципах допускового контроля параметров объектов.

Параметры диагностирования. Для определения работоспособности изделия, поиска дефектов и прогнозирования состояния оборудования необходимо измерять диагностические параметры. К основным измеряемым диагностическим параметрам относятся параметры назначения и надежности объекта, находящиеся в функциональной зависимости от измеряемых физических величин. Измерение физических параметров является основой различных методов и средств диагностирования объектов.

Для исследования технического состояния объекта применяются все известные виды электромагнитного излучения (акустические, звуковые, вибрационные методы исследования, электромагнитные поля и т.п.).

Для диагностирования объектов используют широкую номенклатуру испытательной техники.

Для технического диагностирования оборудования используются часто следующие виды измерений [7, 8, 12]:

- электрометрия;
- измерение температуры;
- измерение вибрации;
- измерение шума;
- измерение механических свойств;
- измерение состава вещества;
- измерение давления, влажности и т.д.

1.3. Особенности неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования

Среди сложных технических устройств, требующих диагностирования при эксплуатации, электроэнергетическое оборудование занимает особое место [13]. Это оборудование как никакое другое подвержено комплексному воздействию сильных электрических, электромагнитных и тепловых полей, а также механических и электродинамических усилий. В связи с этим электрооборудование подвержено риску образования дефектов, неисправностей и отказов. С целью сокращения времени обслуживания и восстановления большая роль отводится методам и средствам диагностирования. Поэтому для подобного оборудования широко применяется контроль в виде системы технической диагностики, которая представляет собой совокупность объекта и средств, необходимых для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в нормативно-технической документации.

Структурно система технической диагностики является информационно-измерительной системой и содержит в общем случае следующие компоненты:

- датчики контролируемых параметров;
- блок сбора информации;
- блок обработки информации;
- блоки вывода и отображения информации;
- исполнительные устройства;
- устройства сопряжения с другими информационно-измерительными и управляющими системами.

Следует отметить, что система технической диагностики может проектироваться как самостоятельная, так и в качестве подсистемы в рамках уже существующей информационно-измерительной системы предприятия, в частности, с системой противоаварийной автоматики, сигнал в которую поступает при выходе контролируемых параметров за установленные пределы.

Надежность и бесперебойность работы различных функциональных объектов в виде электромеханических устройств и сооружений, входящие в состав электроэнергетических систем, во многом определяются работой элементов, составляющих их и обеспечивающих согласование этих объектов с системой и преобразование ряда параметров электроэнергии в требуемые величины для дальнейшего ее использования.

Правильный выбор типов и рабочих параметров этих функциональных объектов имеет большое значение для устойчивой работы электроэнергетических систем и систем электроснабжения. Важно отметить, что воздействие множества случайных факторов на данные объекты в процессе их эксплуатации по-разному влияют на их техническое состояние. В результате при одной и той же наработке или продолжительности эксплуатации даже однотипные объекты имеют различную степень износа.

Различают четыре возможных состояния оборудования:

- исправное (отсутствуют любые повреждения);
- работоспособное (имеющиеся дефекты не мешают работе оборудования в данный момент времени);
- неработоспособное (оборудование выводится из эксплуатации, но после соответствующего технического обслуживания может работать в одном из предыдущих состояний);
- предельное (на этом этапе принимается решение о возможности дальнейшей эксплуатации оборудования после ремонта, либо о его списании).

Основные причины изменения состояния электроэнергетического оборудования показаны на рис. 1.3.

Практически на каждом этапе работы оборудования должна проводиться уточненная оценка его технического состояния с выдачей заключения о возможности его дальнейшего использования.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования электромеханических устройств и сооружений, входящие в состав электроэнергетических систем, является совершенствование системы их технического обслуживания и ремонтов.

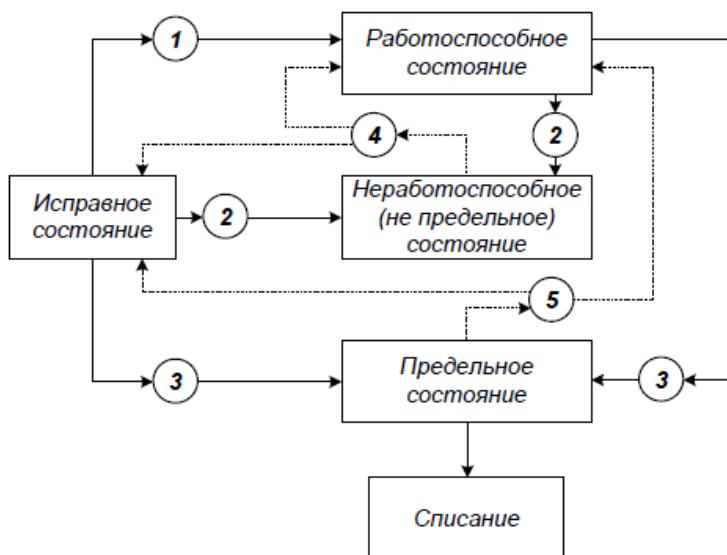


Рис. 1.3. Причины изменения состояния электроэнергетического оборудования:

1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход в предельное состояние из-за неустранимого дефекта, морального старения и других факторов; 4 – восстановление; 5 – ремонт

В настоящее время кардинальным путем снижения объемов и стоимости технического обслуживания электрооборудования, а также снижения численности обслуживающего и ремонтного персонала является переход от предупредительного принципа и регламентации периодичности проведения ремонтов к обслуживанию на основе нормативов планово-предупредительных ремонтов. Поэтому в настоящее время особенное внимание уделяется концепция эксплуатации электротехнического оборудования по техническому состоянию путем более глубокого подхода к назначению периодичности и объемов технических обслуживаний и ремонтов по результатам диагностических обследований и мониторинга электротехнического оборудования в целом.

При переходе к системе ремонтов по техническому состоянию качественно изменяются требования к системе диагностирования электрооборудования, при которой главной задачей диагностирования становится прогноз технического состояния на относительно длительный период.

Решение такой задачи не является тривиальным и возможно только при комплексном подходе к совершенствованию методов, средств, алгоритмов и организационно-технических форм диагностирования.

Состояние электроэнергетического оборудования не всегда позволяет в полной мере реализовать существующие для него четко сформулированные положения (правила, инструкции), исполнение которых является обязательным. Чтобы обеспечить соответствие процесса технической эксплуатации какой-либо электроустановки ее техническому состоянию, необходимы систематические проверки – диагностирование, результатом которого является заключение о техническом состоянии объекта с указанием, при необходимости, места, вида и причины дефекта (неисправности).

В этом случае диагностирование должно быть согласовано с задачей и объемом системы технического обслуживания и ремонта определенной электроустановки или объекта. Эксплуатация электроустановок с учетом отмеченных требований позволит поддерживать надежность объектов на уровне установленных показателей при существенном снижении затрат.

Кроме того, для перехода с обслуживания и ремонта по регламенту на ремонт и обслуживание по техническому состоянию необходима тщательная диагностика электрооборудования, причем, чтобы подготовиться к ремонту, желательно обнаружить все дефекты, влияющие на ресурс, задолго до отказа.

В общем случае при диагностировании решаются задачи точного определения состояния, в котором находится объект диагностирования, или установления множества состояний, в одном из которых он находится. Это определяется задачей, поставленной при исследовании объекта диагностирования.

Техническое диагностирование должно проводиться в процессе эксплуатации и ремонта в целях поддержания установленного уровня надежности, обеспечения требований безопасности и эффективности использования оборудования и должно быть направлено на решение следующих пяти взаимосвязанных задач:

- Первая задача диагностирования – обнаружение в объекте любой неисправности, переводящей его из множества исправных состояний в множество неисправных состояний. Неисправности устройств возникают при их изготовлении на заводах, а также включении устройств после долгого хранения

или ремонта. При введении в эксплуатацию устройств проверяют все элементы, узлы, цепи, источники питания и изоляцию. Как правило, это очень трудоемкий процесс, для упрощения которого необходимо применять методы технического диагностирования.

- Вторая задача диагностирования – проверка работоспособности, т. е. обнаружение тех неисправностей, которые переводят ОД из множества работоспособных систем в множество отказавших систем. Во время проверки работоспособности допускается оставлять необнаруженными неисправности, не препятствующие применению системы по назначению. Например, при резервировании система может быть работоспособной, несмотря на наличие неисправностей в резервных элементах. Поэтому данная задача является менее детальной, чем проверка исправности, и может быть решена более простыми методами. Проверка работоспособности осуществляется при включении объекта в работу или при профилактических осмотрах, а также тогда, когда имеется ограничение на время, отведенное для проверки устройств.

- Третья задача диагностирования – проверка правильности функционирования. Эта задача решается во время работы ОД. При этом достаточно следить за тем, чтобы в объекте не появились неисправности, нарушающие его нормальную работу в настоящий момент времени, и исключить недопустимое для нормальной работы влияние неисправностей. Проверка правильности функционирования позволяет делать вывод о правильной работе ОД только в данном режиме и в данный момент времени. Указанная задача имеет важное значение для систем автоматизации, выполняющих ответственные функции управления технологическими процессами. В этих системах необходимо следить за тем, чтобыискажение алгоритма функционирования не приводило к опасным последствиям в поведении объекта управления.

- Четвертая задача диагностирования – поиск неисправностей (дефектов), которая решает проблему точного указания в объекте неисправного элемента (или множества элементов, среди которых находится неисправный). Поиск дефектов может осуществляться в неисправных, неработоспособных и в неправильно функционирующих устройствах во время их наладки при производстве и во время ремонта при эксплуатации и хранении. Результатом процесса поиска неисправностей является разбиение множества состояний (если исследуется неисправный объект) или множества состояний С (если исследуется неработоспособный объект) на классы неразличимых между собой (или эквивалентных) состояний, а также соответствующих им неисправностей. Эквивалентными неисправностями называются такие, которые нельзя отличить

друг от друга при принятом для исследования устройства способе диагностирования. При этом решается вопрос, в каком из классов эквивалентных состояний находится ОД. Число классов определяет ту степень детализации, которая достигается при поиске неисправностей. Ее называют глубиной диагноза (поиска).

Например, в любой блочной системе дефекты всех элементов, входящих в один блок, образуют обычно один класс эквивалентных неисправностей. Поиск неисправностей в этом случае ведется до неисправного блока, замена которого на исправный обеспечивает восстановление работоспособности системы.

- Пятая задача диагностирования – прогнозирование состояния ОД, для решения которой изучается характер изменения диагностических параметров, и на основе сформировавшихся тенденций предсказываются значения параметров в будущий момент времени.

Эффективность диагностирования ОД достигается в том случае, когда задачи диагностирования учитываются на всех этапах жизни технического объекта (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Диагностирование на всех этапах жизни технического объекта

Дефекты в оборудовании могут возникать в разные моменты его жизненного цикла: при изготовлении, монтаже, настройке, эксплуатации, испытаниях, ремонте — и иметь различные последствия.

Несмотря на то, что виды дефектов электротехнического оборудования отличаются большим разнообразием, можно выделить четыре основные категории или степени развития дефекта:

1. Нормальное состояние оборудования (дефекты отсутствуют);
2. Дефект в начальной стадии развития (наличие такого дефекта не оказывает явного влияния на работу оборудования);
3. Сильно развитый дефект (наличие такого дефекта ограничивает возможность эксплуатации оборудования или сокращает его жизненный срок);
4. Дефект в аварийной стадии развития (наличие такого дефекта делает эксплуатацию оборудования невозможной или недопустимой).

Как следствие выявления таких дефектов, в зависимости от степени их развития, принимаются следующие возможные решения (мероприятия) по их устранению:

1. Заменить оборудование, его часть или элемент;
2. Выполнить ремонт оборудования или его элемента (после этого провести дополнительное обследование для оценки качества выполненного ремонта);
3. Оставить в эксплуатации, но уменьшить время между периодическими обследованиями (учащенный контроль);
4. Провести другие дополнительные испытания.

При выявлении дефектов и принятии решений по дальнейшей эксплуатации электротехнического оборудования особое внимание уделяют вопросам достоверности и точности полученной информации о состоянии этого оборудования.

Перечисленные выше задачи достаточно обширны и требуют конкретизации в зависимости от вида оборудования и его места в электроснабжении региона. Решение о применении вида диагностирования в части его полноты основывается на технико-экономическом обосновании. Такое решение является чисто потребительским. С одной стороны, ставится задача объективного определения состояния оборудования, используя комплекс диагностических параметров и их функциональные связи. С другой стороны, выявляется потребность в ограничении материальных ресурсов, то есть экономика может существенно сужать задачи диагностирования, чем может не обеспечиваться объективное определение состояния оборудования.

Таким образом, техническая диагностика заключается в организации оптимальных процедур проверки технического состояния сложных объектов, постановки возникающих при этом проблем и задач, а также в разработке методов и средств технической реализации указанных процедур.

При изготовлении объекта целесообразно одновременно производить и средства диагностики (СД). При этом главной задачей является обеспечение всех требований, предъявляемых к ОД и СД. При сборке и наладке ОД может возникнуть проблема поиска дефектов. На заключительной стадии диагностирования осуществляется выходной контроль и проводится проверка исправности объекта.

В процессе эксплуатации диагностирование ведется непрерывно или периодически с целью контроля правильности функционирования или работоспособности объекта. В случае необходимости осуществляются прогнозирование возникновения или поиск возникшего дефекта для выполнения профилактических или восстановительных работ. Диагностирование на этом этапе жизни ОД позволяет обоснованно принимать решения об использовании объекта в требуемый момент времени.

Объект диагноза ОД представляют в виде устройства (рис. 1.5), имеющего входы и доступные для наблюдения выходы.

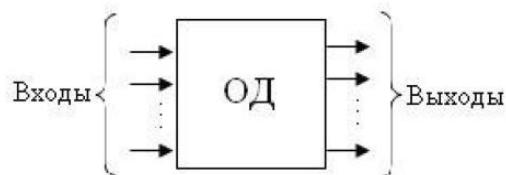


Рис. 1.5. Объект диагноза ОД

Процесс диагностирования представляет собой последовательность операций, каждая из которых предусматривает подачу на входы объекта некоторого воздействия и определение на выходах реакции на это воздействие. Такую элементарную операцию называют проверкой д. В качестве выходов наблюдения могут служить основные или рабочие выходы системы, а также дополнительные (контрольные) выходы.

Традиционно используются плановая и внеплановая технические диагностики:

- Плановая техническая диагностика проводится в соответствии с действующими нормами и правилами. При плановых проверках контролируются параметры, характеризующие техническое состояние агрегата и позволяющие

определить остаточный ресурс узлов и деталей, ограничивающих возможность дальнейшей эксплуатации оборудования, когда оно отработало нормативный срок службы.

- Внеплановая техническая диагностика оборудования проводится в случае обнаружения нарушений его технического состояния.

1.4. Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования

В общем случае под техническим диагностированием понимают область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объекта, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объектах.

В общем случае алгоритм технического диагностирования можно представить в виде соответствующей функциональной схемы (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Структурная блок-схема алгоритма
технического диагностирования

Известно, что в основу различных методов и средств технического диагностирования, с помощью которых анализируют и оценивают сложное техническое состояние объекта, положено измерение физических параметров, которые по своей сути являются диагностическими параметрами.

Измеряемые диагностические параметры выбирают из множества принципиально возможных параметров некоторого ограниченного количества для

исследования информативности признаков, сформированных на этих параметрах. На основании информативности признаков определяют окончательный состав измеряемых физических параметров, которые используются в дальнейшем для диагноза неисправных состояний.

В зависимости от воздействия на объект контроля и влияния на его дальнейшие эксплуатационные характеристики различают два вида контроля – разрушающий и неразрушающий (рис. 1.7) [13, 14].

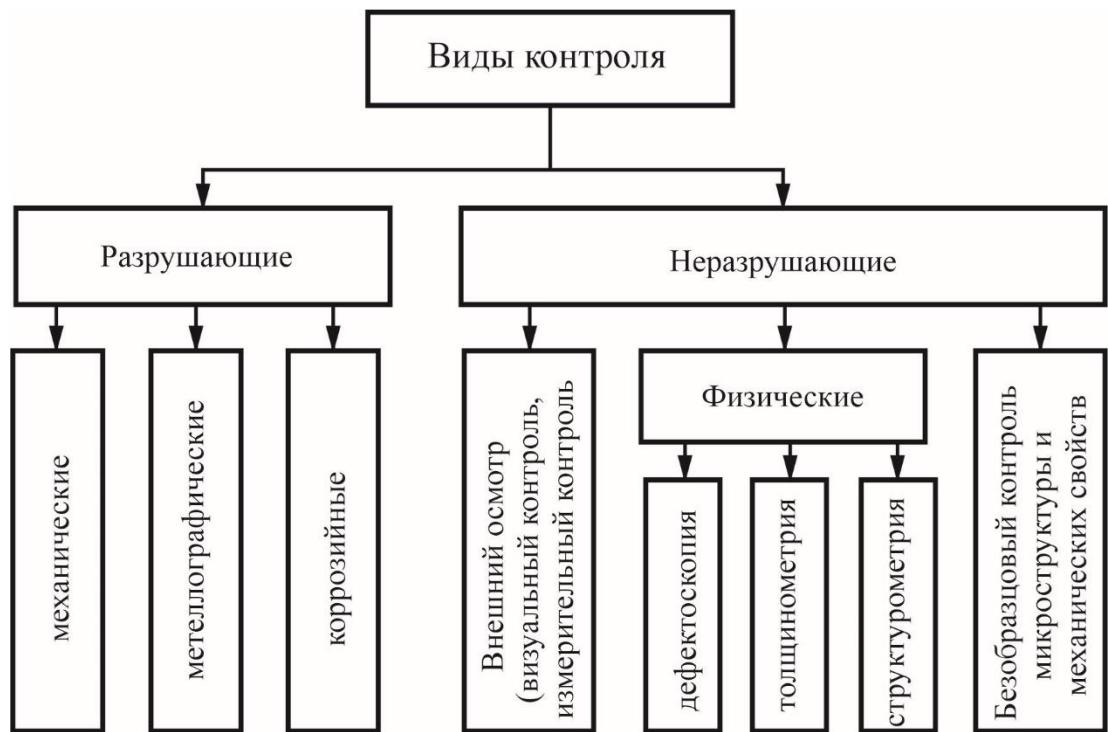


Рис. 1.7. Виды контроля в зависимости от воздействия на объект контроля и влияния на его дальнейшие эксплуатационные характеристики

Разрушающий контроль, проводится на образцах-свидетелях, моделях или натурных образцах изделий, позволяет количественно определять характеристики качества, например, прочность изделий, их долговечность, коррозионную стойкость и др. РК осуществляется посредством прямой связи с контролируемым объектом и поэтому обладает более высокой достоверностью результатов контроля по сравнению с неразрушающими методами.

Разрушающий контроль используется для выборочной проверки отдельных образцов, и по результатам делается заключение о пригодности всего объекта контроля, из которого изъята выборка. РК приводит к разрушению или

повреждению объекта и не дает полной уверенности в удовлетворительном качестве всей детали, подлежащей контролю.

Неразрушающий контроль (НК) не связан с разрушением или повреждением объекта контроля, и поэтому он может быть сплошным. Неразрушающий контроль дефектов, структуры и твердости металла проводится непосредственно на деталях и конструкциях с помощью переносных или портативных приборов. Для контроля структуры металла используют переносные микроскопы или пластические реплики, а для выявления дефектов применяют различные физические методы, основанные на взаимодействии различных физических полей, излучений и веществ с ОК. Физические методы контроля также могут использоваться при контроле геометрических размеров (толщинометрия); контроле структуры, химического состава и механических свойств (структуроскопия).

Методы неразрушающего безобразцового контроля механических свойств по характеристикам твердости основаны на взаимосвязи диаграмм вдавливания инденторов и диаграмм растяжения образцов и позволяют количественно оценить отдельные показатели прочности и пластичности металла без вырезки образцов на готовых изделиях.

В основе НК лежат физические процессы взаимодействия различных полей, излучений или веществ с объектами контроля. Для НК применяются практически все известные виды излучения, в том числе электромагнитное в широком спектре частот (начиная с нулевой для измерения удельного сопротивления и высокой частоты для измерения ВЧ-сопротивления до оптических частот и рентгеновского излучения), ультразвук, пучки нейtronов и тепловое излучение.

Виды НК выделяются с точки зрения физических явлений, на которых они основаны. Под видом НК понимают условную группировку методов НК, объединенную общностью физических принципов, на которых они основаны. Всего существует девять видов НК: 1) магнитный, 2) электрический, 3) вихревотоковый, 4) радиоволновой, 5) тепловой, 6) оптический, 7) радиационный, 8) акустический, 9) проникающими веществами.

При классификации по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом, но не с проникающими веществами.

Каждый из видов НК подразделяют на методы по следующим трем признакам:

1. Характер взаимодействия поля или вещества с объектом. Взаимодействие должно быть таким, чтобы контролируемый признак объекта вызывал определенные изменения поля или состояния вещества.

В некоторых случаях используемое для контроля физическое поле возникает под действием других физических эффектов, связанных с контролируемым признаком. Например, электродвижущая сила, возникающая при нагреве разнородных материалов, позволяет контролировать химический состав материалов (термоэлектрический эффект).

2. Первичный информативный параметр – конкретный параметр поля или вещества (амплитуда поля, время его распространения, количество вещества и т. д.), изменение которого используют для характеристики контролируемого объекта.

3. Способ получения первичной информации – конкретный тип датчика или вещества, которые используют для измерения и фиксации выбранного информационного параметра.

Любой метод НК не обеспечивает полной достоверности оценки состояния объекта. Результаты измерений включают в себя ошибки, поэтому всегда существует вероятность получения ложного результата контроля: 1- исправный объект будет признан негодным (ложный дефект или ошибка первого рода); 2 - неисправный объект будет признан годным (обнаруженный дефект или ошибка второго рода).

Ошибки при НК приводят к различным последствиям: если ошибки первого рода (ложный дефект) только увеличивают объем восстановительных работ, то ошибки второго рода (необнаруженный дефект) влекут за собой аварийное повреждение оборудования.

Стоит заметить, что при любом виде НК можно выделить ряд факторов, влияющих на результаты измерений или анализ полученных данных.

Условно можно разделить эти факторы на три основные группы:

- 1 - окружающая среда;
- 2 - человеческий фактор;
- 3 - технический аспект.

К группе «окружающая среда» можно отнести такие факторы, как метеоусловия (температура воздуха, влажность, облачность, сила ветра и т. д.), время суток.

Под «человеческим фактором» понимают квалификацию персонала, профессиональное знание оборудования и грамотное проведение непосредственно самого тепловизионного контроля.

«Технический аспект» подразумевает под собой информационную базу о диагностируемом оборудовании (материал, паспортные данные, год выпуска, состояние поверхности и т. д.).

В реальности факторов, влияющих на результат методов НК и анализа данных методов НК, гораздо больше, чем перечислено выше.

Именно по причине возможности допущения ошибок по каждому виду НК существует своя нормативная документация, регламентирующая назначение методов НК, процедуру проведения НК, средства НК, анализ результатов НК, возможные виды дефектов при НК, рекомендации по их устраниению и т. д.

Следует отметить ряд конкретных ограничений, присущих НК (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Ограничения НК

Конструкция изделия может быть такой, что многие его участки трудно обследовать, поскольку к ним ограничен. Кроме того, сами материалы, из которых изготовлено изделие, могут затруднять контроль, например, из-за существенной анизотропии и (или) неоднородности самой среды. Дополнительные ограничения налагаются условиями, в которых проводится контроль на промышленном предприятии или в ремонтных мастерских.

Конкретные ограничения зависят от этапа жизненного цикла изделия, на котором осуществляется контроль. Относительная ценность таких показателей, как производительность контроля, степень автоматизации, универсальность аппаратуры и возможность проверки изделий сложной формы, оказывается разной на разных этапах жизненного цикла изделия, начиная от контроля первичных металлов и кончая контролем изделия в процессе эксплуатации.

Все эти факторы, сочетаясь друг с другом, создают трудности для контроля, которые оказываются значительно более серьезными, чем можно было бы предположить заранее

На роль и успешность неразрушающего контроля сильное влияние оказывают еще три фактора:

Во-первых, какой оператор работает с аппаратурой. Существует ряд причин, которые делают эту работу утомительной и увеличивают вероятность ошибок, к тому же такую работу зачастую выполняют малоквалифицированные лица, что способствует возникновению ошибок. В результате появляются ошибки, которых вполне можно было бы избежать при работе на современной аппаратуре. Последние исследования показали, что надежность обнаружения дефектов специалистами по эксплуатации гораздо ниже, чем можно ожидать исходя из возможностей контроля. Основной вклад здесь, как считают, вносит человеческий фактор. Важным средством решения этой проблемы является усовершенствование аппаратуры, с которой работает оператор, или переход на полную автоматизацию.

Во-вторых, в практике неразрушающего контроля важную роль играют нормы и стандарты. В частности, это относится к тем областям, где требуется крайне строгое соблюдение мер безопасности, например, в атомной энергетике. Поскольку нормы зачастую имеют статус закона, разработчики новой техники должны ориентироваться на существующие нормы или предусмотреть предложения по изменению норм. Все это часто требует многих лет работы, что может существенно замедлить внедрение новых методов.

В-третьих, особенно трудными в НК являются вопросы внедрения новой техники, что связано с междисциплинарным характером технической базы НК. Как и в других областях техники, здесь необходимо добиваться вертикальной интеграции - начиная с фундаментальных исследований и кончая практическими приложениями. Кроме того, на каждом из этих уровней нужно обеспечить горизонтальную интеграцию нескольких научных дисциплин.

В качестве примера рассмотрим некоторые из методов НК, нашедшие широкое применение в электроэнергетике [13 - 16].

Физико-химические методы. Энергетическое воздействие на изоляцию электрических устройств приводит к появлению в ней изменений на молекулярном уровне. Это происходит вне зависимости от типа изоляции и завершается химическими реакциями с образованием новых химических соединений,

причем под действием электромагнитного поля, температуры, вибрации одновременно идут процессы разложения и синтеза. Анализируя количество и состав появляющихся новых химических соединений можно делать выводы о состоянии всех элементов изоляции. Наиболее просто это сделать с жидкой углеводородной изоляцией, какой являются минеральные масла, так как все или почти все образовавшиеся новые химические соединения остаются в замкнутом объеме.

Преимуществом физико-химических методов диагностического контроля является их высокая точность и независимость от электрических, магнитных и электромагнитных полей и от других энергетических воздействий, так как все исследования проводятся в физико-химических лабораториях. Недостатками этих методов является относительная дороговизна, и запаздывание от текущего времени, то есть неоперативный контроль.

Метод хроматографического контроля маслонаполненного оборудования. Этот метод основан на хроматографическом анализе различных газов, выделяющихся из масла и изоляции при дефектах внутри маслонаполненного электрооборудования. Алгоритмы определения дефектов на ранней стадии их возникновения, основанные на анализе состава и концентрации газов, являются распространенными, хорошо проработанными для диагностики маслонаполненного электрооборудования.

Оценка состояния маслонаполненного оборудования осуществляется на базе контроля: 1 – предельных концентраций газов; 2 – скорости нарастания концентраций газов; 3 – отношений концентраций газов.

Метод контроля диэлектрических характеристик изоляции. Метод основан на измерении диэлектрических характеристик, к которым относятся токи утечки, величины емкости, тангенс угла диэлектрических потерь ($\tg\delta$) и др. Абсолютные значения $\tg\delta$, измеренные при напряжениях, близких к рабочему, а также его приращения при изменении испытательного напряжения, частоты и температуры, характеризуют качество и степень старения изоляции.

Для измерения $\tg\delta$ и емкости изоляции используются мосты переменного тока (мосты Шеринга). Метод используется для контроля высоковольтных измерительных трансформаторов и конденсаторов связи.

Метод инфракрасной термографии. Потери электрической энергии на нагрев элементов и узлов электрооборудования в процессе эксплуатации зависят от их технического состояния. Измеряя инфракрасное излучение, обусловленное нагревом, можно делать выводы о техническом состоянии электрообо-

рудования. Невидимое инфракрасное излучение с помощью тепловизоров преобразуется в видимый человеком сигнал. Данный метод дистанционный, чувствительный, позволяющий регистрировать изменения температуры в доли градуса. Поэтому его показания сильно подвержены влияющим факторам, например, отражающей способности объекта измерения, температуре и состоянию окружающей среды, так как запыленность и влажность поглощают инфракрасное излучение, и др.

Оценка технического состояния элементов и узлов электрооборудования под нагрузкой производится либо сопоставлением температуры однотипных элементов и узлов (их излучение должно быть примерно одинаковым), либо по превышению допустимой температуры для данного элемента или узла. В последнем случае тепловизоры должны иметь встроенное оборудование для коррекции влияния температуры и параметров окружающей среды на результат измерения.

Метод вибродиагностики. Для контроля технического состояния механических узлов электрооборудования используют связь параметров объекта (его массы и жесткости конструкции) со спектром частот собственной и вынужденной вибрации [17]. Всякое изменение параметров объекта в процессе эксплуатации, в частности жесткости конструкции вследствие ее усталости и старения, вызывает изменение спектра. Чувствительность метода увеличивается с ростом информативных частот. Оценка состояния по смещению низкочастотных составляющих спектра менее эффективна.

Методы контроля частичных разрядов в изоляции. Процессы возникновения и развития дефектов изоляции, независимо от ее материала, сопровождаются появлением электрических или частичных разрядов, которые, в свою очередь, порождают электромагнитные (в радио и оптическом диапазонах) и звуковые волны. Интенсивность проявления разрядов зависит от температуры и влажности атмосферного воздуха и связана с наличием атмосферных осадков. Такая зависимость получаемой диагностической информации от атмосферных условий требует совмещать процедуру диагностирования интенсивности разрядов в подвесной изоляции ЛЭП с необходимостью обязательного контроля температуры и влажности окружающей среды.

Метод ультразвукового зондирования. Скорость распространения ультразвука в облучаемом объекте зависит от состояния объекта (наличия дефектов, трещин, коррозии). Это свойство используется для диагностики состояния бетона, древесины и металла, которые широко применяются в энергетике, например, в качестве материала опор.

Для контроля широко применяются все виды и диапазоны излучения. Метод акустической эмиссии работает в звуковом диапазоне. Известен метод контроля оптического излучения ПР с помощью электронно-оптического дефектоскопа. Он основан на регистрации пространственно-временного распределения яркости свечения и определении по ее характеру дефектных изоляторов. Для этих же целей с разной эффективностью применяют радиотехнический и ультразвуковой методы, а также метод контроля ультрафиолетового излучения с помощью специального электронно-оптического дефектоскопа.

Следует отметить, что на сегодняшний день кроме систем анализа данных технической диагностики широкое применение нашли и системы мониторинга электроэнергетического оборудования. При этом важно понимать, чем одни отличаются от других и в чем заключаются явные преимущества и недостатки подобных систем.

В данном случае под технической диагностикой понимаются периодические испытания оборудования на предмет дефектов и неисправностей в его работе. В настоящее время методы диагностирования (методы НК) нашли широкое применение для оценки состояния оборудования на подстанциях. Методы диагностики часто связаны с выводом оборудования из работы или его демонтажом и транспортировкой в специализированные лаборатории соответствующих предприятий.

В свою очередь мониторинг подразумевает под собой постоянный контроль за состоянием оборудования в режиме реального времени, при этом оборудование остаётся в работе. Безусловно, система мониторинга по сравнению с системой анализа данных технической диагностики обладает рядом технических преимуществ: 1 - высокая достоверность выходных данных, полученных в ходе мониторинга; 2 - контроль фактического состояния оборудования (онлайн-контроль), то есть высокая степень контроля по факту нахождения оборудования в работе; 3 - возможность хранения в памяти выходных данных (параметров и характеристик оборудования), то есть возможность выявления зависимостей и взаимосвязей между событиями; 4 - возможность диагностирования оборудования без его отключения.

Например, для оценки технического состояния высоковольтного электрооборудования все шире применяются системы мониторинга, реализующие метод бесконтактного мониторинга, которые основываются на закономерностях изменения внешних магнитных полей, сопровождающих процесс его токопотребления.

В этом случае датчики магнитного поля при этом размещаются непосредственно на электропитающих проводах (шинах) без ориентации их осей чувствительности в пространстве. При использовании метода бесконтактного мониторинга в элементах и устройствах не происходит каких-либо изменений, влияющих на параметры и характеристики электрооборудования, не требуется проведение специальных монтажных работ, затрагивающих структуру изменяющих его конфигурацию. Метод бесконтактного мониторинга позволяет по косвенным признакам обнаружить скрытые дефекты, выявить особенности, влекущие за собой потенциальную неисправность аппарата. Основой метода является получение информации о режимах работы и техническом состоянии электрооборудования на основании анализа характера изменения формы тока, потребляемого приемниками электрической энергии, которую называют кинетикой токопотребления или кинетикой тока.

Регистрация осуществляется датчиками внешнего магнитного поля, которое определяется токами в токоподводящих проводах и отражает кинетику токопотребления. При этом важным обстоятельством является тот факт, что датчики магнитного поля, подключаемые к токоподводам по схеме трансформатора тока, могут быть установлены как непосредственно у диагностируемого аппарата, так и в любом другом, удобном для размещения месте. Получаемая диагностическая информация запоминается в оперативной памяти диагностической аппаратуры, включающей программируемый контроллер или управляющую ЭВМ, в форме матрицы технического состояния. Полученную матрицу сравнивают с предварительно сформированным в модулях памяти набором эталонных матриц технических состояний конкретного электротехнического устройства. По завершению процесса сравнения проводится идентификация технического состояния устройства, результаты которой оператор наблюдает на табло вывода диагностической информации. На основании полученных данных мониторинга оператор формирует стратегию диспетчерского управления техническим состоянием электрооборудования.

Обобщая, можно констатировать, что для своевременного обнаружения неисправностей, предупреждения аварийных ситуаций на ранних этапах, регистрации и измерения диагностических параметров, включая аварийные и предаварийные режимы работы электроэнергетического оборудования в процессе его эксплуатации, наиболее эффективны автоматизированные системы диагностики и мониторинга электроэнергетического оборудования, ориентированные на решение следующих основных задач: 1 – мониторинг коммутационного оборудования; 2 – мониторинг трансформаторов с контролем газо-

и влагосодержания масла, системы охлаждения, температуры масла и обмоток, устройства регулирования напряжения под нагрузкой; 3 – контроль состояния линий электропередач (механической и токовой нагрузки, а также провеса проводов), определение и локализация повреждений в них.

Схема принятия решения о виде технического воздействия на оборудование показана на рис. 1.9.

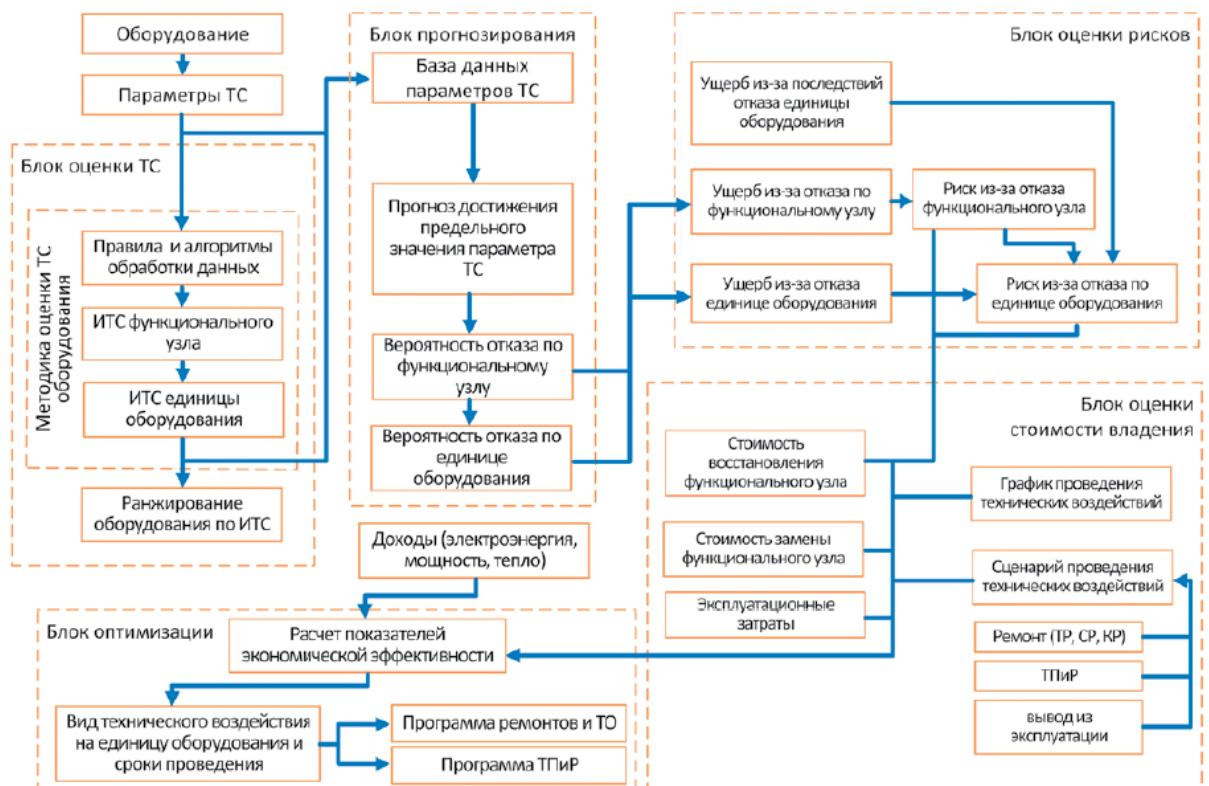


Рис. 1.9. Схема принятия решения о виде технического воздействия на оборудование.

Важно отметить, что техническое состояние любого объекта можно установить при разовом и многократном диагностировании. При разовом диагностировании высоковольтного оборудования, состоящего из множества элементов, вероятность объективной оценки технического состояния мала. Следовательно, только случайно можно обнаружить стохастические дефекты при одноразовом диагностировании. Вероятность надежной и объективной оценки технического состояния повышается по мере увеличения числа актов контроля. Это обстоятельство является основанием для введения многократного диагностирования с определенной периодичностью, т.е. мониторинга диагностических параметров.

В зависимости от сложности и изученности оборудования результаты диагностики в виде заключений и рекомендаций могут быть получены либо в автоматическом режиме, либо после соответствующей экспертной оценки данных, полученных в результате диагностики оборудования. Техническое обслуживание и ремонт в этом случае сводятся к устранению повреждений и дефектов, указанных в заключении по данным технического диагностирования или к нахождению места отказа. О проведенных работах делаются соответствующие записи в документации, которая ведется на предприятии. Кроме того, результаты диагностики могут заноситься в соответствующие базы данных и передаваться другим субъектам системы диагностики.

Наличие комплексной информации по контролируемому оборудованию, как на уровне объекта, так и на уровне сетевой компании, позволяет более эффективно планировать инвестиции, оперативно выявлять оборудование, требующее организации работ по техническому обслуживанию и ремонту, определять очередность технического перевооружения объектов, имеющих выработавшее свой нормативный ресурс оборудование (рис. 1.9).

1.5. Принципы построения сенсорных компонентов систем контроля и диагностики

При выборе и обосновании того или иного метода технической диагностики немаловажным фактором является анализ эксплуатационных свойств электрооборудования, представлявшие собой те его особенности или признаки качества, которые характеризуют, в какой мере оно соответствует требованиям эксплуатации. Чем больше приспособлено электрооборудование к эффективному использованию и техническому обслуживанию (ремонту), тем выше его эксплуатационные свойства. Их закладывают при разработке и изготовлении электрооборудования, а реализуют — в процессе его эксплуатации.

Эксплуатационные свойства можно разделяют на общие, присущие всем видам электрооборудования, и специальные, имеющие значение для конкретных групп электрооборудования. К общим свойствам относят надежность и технико-экономические свойства, а к специальным — технологические, энергетические, эргономические и др. На рис. 1.10 показана классификация эксплуатационных свойств электроэнергетического оборудования.

Следует отметить, что современная диагностика состояния оборудования, как правило, основывается на мониторинге данных о параметрах работы

оборудования, аварийных случаях, аномалиях в отношении заданных диапазонов управления оборудованием. Предиктивная диагностика позволяет распознавать внезапные всплески параметров работы оборудования и их необычное сочетание, что в свою очередь дает возможность эффективно запланировать профилактическое обслуживание.

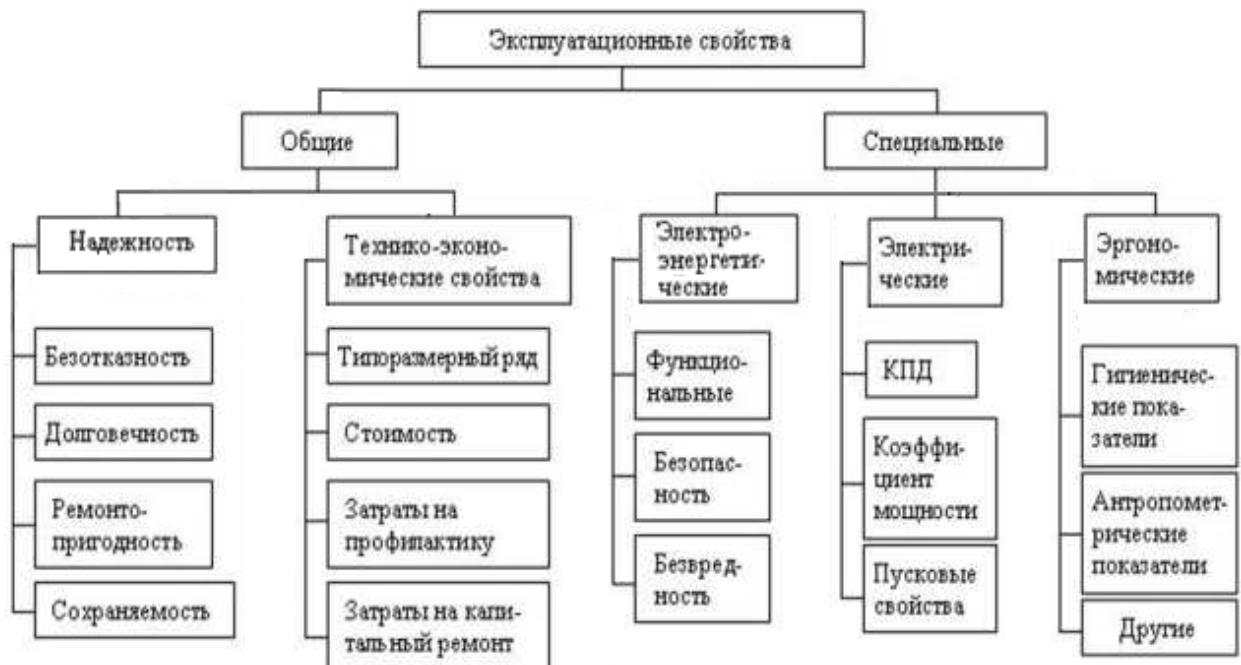


Рис. 1.10. Классификация эксплуатационных свойств электрооборудования

Такие действия требуют точных и непрерывных потоков входных данных из самых разнообразных датчиков. Поэтому в настоящее время вопросы диагностики электрооборудования могут эффективно решить интеллектуальные системы [18, 19]. При разработке данных систем следует руководствоваться следующими принципами:

- принцип предоставления требуемого количества и качества информации для наблюдаемости состояния оборудования;
- принцип достаточности числа датчиков;
- принцип информационной полноты вторичных признаков состояния оборудования;
- принцип инвариантности (селекции первоочередных диагностических признаков отказа оборудования);
- принцип самодиагностики измерительных и управляющих каналов;

- принцип структурной гибкости и программируемости;
- принцип коррекции недельных измерительных систем;
- принцип дружественности интерфейса;
- принцип многоуровневости.

С учетом вышесказанного следует особое внимание уделить новым методам и алгоритмам, основанным на анализе больших массивов данных и выработке решений, то есть созданных на базе искусственных нейронных сетей. В основе построения этих сетей используются аналитические модели отдельных агрегатов, отдельных узлов и отдельного оборудования. Согласно аналитической модели, связь между выходными параметрами оборудования, находящегося в исправном состоянии, его структурными параметрами и внешними воздействиями описывается выражением векторной функции, которая представляет собой систему соответствующих передаточных функций

Задачу по использованию «совершенной» нейронной сети для диагностики оборудования в динамической модели можно решить путем автоматического выбора значимых параметров из всего множества входных и выходных параметров. Тем самым оптимизируется число задействованных нейронов в сети и сокращается время на переобучение искусственного интеллекта.

Для создания такой системы диагностики сложного технического объекта в рабочей зоне на нем размещаются датчики. Далее производятся измерения и преобразования в сигналы. Сигналы определяют рабочие и структурные параметры работы объекта. По этим сигналам в форме векторов входов и выходов формируются сигналы для первоначального обучения нейронной сети. Обученная нейронная сеть подключается к входам и выходам модуля, содержащего динамическую модель. В процессе работы динамическая модель улучшается при поступлении новых сигналов от датчиков и при дополнительном обучении нейронной сети. В процессе дополнительного обучения путем сравнения выбирают избыточные нейроны, которые не могут повлиять на результат диагностики, и деактивируют их. При последующем дополнительном обучении нейронной сети или при отказе нейронов избыточные нейроны активируют.

Критерием выбора избыточных нейронов является значение суммарной вероятности ошибок первого и второго рода, то есть значение суммы масштабирующих коэффициентов для входных и выходных сигналов нейрона обученной нейронной сети.

Схема диагностики сложного технического объекта на основе самообучающейся нейронной сети показана на рис. 1.11, где 1 – датчики; 2 – вычислительная система; 3 – устройство отображения сигналов диагностики; 4 – модуль интеллектуального анализа; 5 – модуль интеллектуального анализа; 6 – обученная нейронная сеть – активные нейроны; 7 – дополнительное обучение нейронной сети; 8 – избыточные нейроны; 9 – модуль дополнительного обучения нейронной сети и выбора активных и избыточных нейронов.

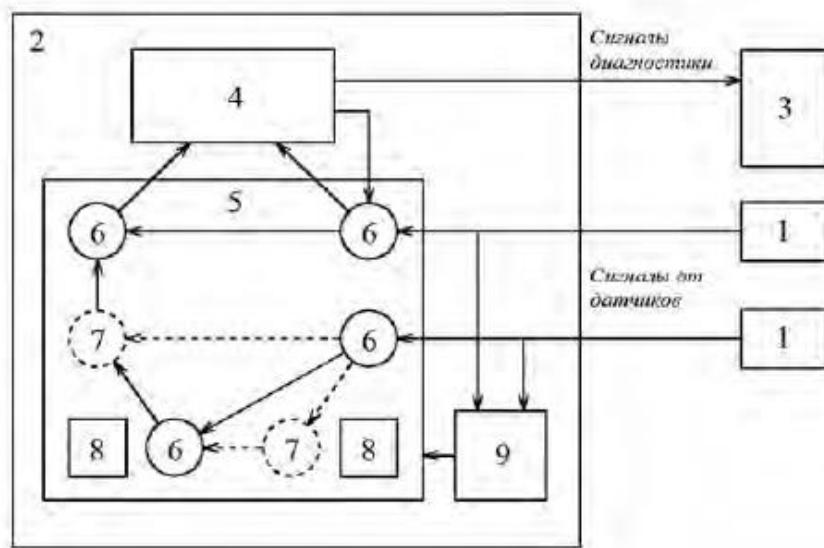


Рис. 1.11. Схема диагностики сложного технического объекта на основе самообучающейся нейронной сети

Недостатком такой системы может стать непредвиденный сбой нейронной сети и потеря избыточных нейронов без восстановления.

Следует отметить, что на практике искусственный интеллект используется только для диагностики сложного дорогостоящего оборудования, так как использовать нейронные сети для простых механизмов экономически нецелесообразно. Кроме этого, рассмотренные методы диагностики сводятся к определению функциональности оборудования на определенном этапе времени, без прогнозирования. Поэтому при диагностике оборудования с использованием искусственных нейронных сетей необходимо дополнительно ставить задачи по осуществлению мониторинга следующих показателей: 1 - оценка функции надежности оборудования во времени; 2 - оценка функции риска отказа оборудования.

1.6. Выводы

1. Рассмотрены вопросы диагностики и неразрушающего контроля технических объектов. Проанализированы задачи диагностирования, рассмотрены системы тестового и функционального диагностирования, описана классификация средств контроля и диагностирования по различным признакам.

2. Рассмотрены особенности неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования, описана структура системы технической диагностики. Показано, что для перехода с обслуживания и ремонта по регламенту на ремонт и обслуживание по техническому состоянию необходима тщательная диагностика электрооборудования. Рассмотрены основные этапы и задачи такой диагностики.

3. Выполнен анализ известных методов для неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования, а также принципов построения технических средств для их реализации.

4. Рассмотрены принципы построения сенсорных компонентов систем контроля и диагностики и принципы построения интеллектуальных систем диагностирования сложных технических объектов на основе самообучающейся нейронной сети.

ГЛАВА 2.

СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Постановка задачи исследования

Тепловой контроль технического состояния электрооборудования является важным аспектом обеспечения электробезопасности и пожаробезопасности электроэнергетической сети. Этот метод позволяет выявить потенциальные проблемы в функционировании электрооборудования, которые могут привести к опасным последствиям, таким как электрические искры, короткое замыкание, перегрев и возгорание [20, 21, 22].

Основная задача теплового контроля – обнаружение возможных дефектов или неисправностей оборудования по изменениям температуры. Используя тепловой контроль, можно выявить перегревающиеся узлы или элементы, обрывы или повреждения проводов, неисправности в соединениях, потерю изоляции, токовые перегрузки и т.д. Это позволяет оперативно принять меры по устранению проблем, предотвратив возникновение аварийных ситуаций и минимизировав риск возгорания.

Тепловой контроль проводится как на новом электрооборудовании при приемке, так и на уже эксплуатируемом оборудовании в рамках планового технического обслуживания. Регулярные измерения позволяют отслеживать изменения температуры и заранее определить участки, требующие внимания и ремонта. Это позволяет предотвратить возможные аварийные ситуации и значительно продлить срок службы оборудования.

Основными преимуществами теплового контроля является его неинвазивность – измерения проводятся без проникновения внутрь оборудования, а также возможность проведения измерений в режиме реального времени без необходимости отключения или остановки работы оборудования. Кроме того, данный метод является точным и надежным, что позволяет предотвратить возможные аварии и снизить риск пожара.

При эксплуатации электрооборудования необходимо иметь информацию о том, соответствует ли состояние их приводного электродвигателя режиму работы, который требуется по условиям эксплуатации. При этом очевидно, что эксплуатация АД, не обеспечивающего требуемое техническое состояние, приводит не только к выходу из строя самого АД, но и к нарушению технологического процесса, обеспечиваемого данным электрооборудованием.

Чрезмерный нагрев обмоток электрооборудования сокращает срок их службы. Степень нагрева зависит от нагрузки электрооборудования и от условий и режима его работы.

Под нагрузкой понимают токовую нагрузку, которая при работе, например, в двигательном режиме зависит от величины момента сопротивления на валу, а в генераторном режиме – от совокупности электроприборов, которые подключаются к обмотке статора генератора для потребления электроэнергии. Поскольку проконтролировать указанные параметры в процессе работы электрооборудования затруднительно, для контроля нагрузки измеряют ток статора и сравнивают его с допустимым значением.

Нагрев служит одним из основных показателей, характеризующих надежность и срок службы машины. Повышение температуры приводит к интенсивному старению изоляции обмоток, что в конечном счете приводит к появлению тяжёлых аварийных режимов [23].

Ключевая цель теплового контроля — обнаружение возможных дефектов или неисправностей оборудования по изменениям температуры. Например, выявление перегревающихся узлов или элементов, обрывов или повреждений проводов, неисправностей в соединениях, потери изоляции.

Цели контроля:

- Предотвращение аварийных ситуаций за счёт оперативного устранения проблем.
- Минимизация риска возгорания благодаря своевременному выявлению утечек тока.
- Продление срока службы оборудования за счёт регулярных измерений, которые позволяют отслеживать изменения температуры и заранее определять участки, требующие ремонта.

Задачи теплового контроля обмоток электрооборудования включают:

- Оценку теплового состояния в процессе работы, чтобы выявить отклонения от допустимых значений и принять меры.
- Оперативную диагностику без вывода оборудования из эксплуатации.
- Защиту оборудования от перегрева. Повышение температуры обмоток может привести к старению изоляции, снижению электрической и механической прочности, а также к аварийным режимам.

Как было показано выше, в состав ЭЭС входят различные электрические машины, к которым относятся:

- синхронный генератор, являющийся основой любой электростанции;

- повышающие и понижающие трансформаторы, входящие в состав различных распределительных устройств;
- приемники электроэнергии в виде различных устройств, содержащих электропривод.

Силовые трансформаторы обычно стоят дороже других элементов линий электропередачи из-за сложности конструкции и требований к материалам, поэтому контроль их технического состояния имеет большое экономическое значение.

Следует отметить, что подавляющее большинство современного производственного оборудования имеет электропривод, построенный на базе асинхронных двигателей (АД) [24, 25]. Широкое применение АД обусловлено, в первую очередь, простотой их конструкции, что обеспечивает им целый ряд преимуществ по сравнению с машинами других типов: низкая стоимость, простота обслуживания, высокая надежность, длительный срок службы при достаточно хороших технических характеристиках как в режиме пуска, так и в заданных эксплуатационных режимах работы. Следовательно, АД в значительной степени определяют надежность и работоспособность работы электрооборудования в целом. Соответственно, разработка и применение новых эффективных систем диагностики и защиты АД является важной и актуальной проблемой.

Несмотря на высокую надежность АД, ежегодно от их общего количества, находящегося в эксплуатации, выходят из строя до 20...25 % [26]. Поэтому для предотвращения аварий требуется использование контроля технического состояния АД в процессе их эксплуатации. Очевидно, что при контроле АД для предотвращения их отказов необходимо проверить большое количество различных параметров, определяющих механическое, электромагнитное, тепловое и аэродинамическое состояние АД. Проверку проводят по методикам испытаний, регламентируемым в различных нормативных документах. При этом статистика отказов АД показывает, что 35–45% их отказов обусловлены пробоем изоляции статорной обмотки [27]. В связи с этим остро стоит вопрос повышения точности и достоверности термического контроля и тепловой защиты АД.

Таким образом, в состав ЭЭС входят, в основном, электрические машины переменного тока. Однако анализ технической документации показал, что вопрос теплового контроля обмоток таких электрических машин в полном объеме не решен и требуются научно-технические исследования по улучшению систем такого контроля.

2.2. Нагрев обмоток электрических машин

2.2.1. Причины нагрева и перегрева обмоток электрических машин

Нагрев обмоток электрических машин (ЭМ) происходит в следствие выделяющихся потерь, которые возникают при работе и рассеиваются затем в виде тепла. Эти потери, по своей физической сущности, делятся в общем случае на:

- электрические потери, обусловленные протеканием по обмоткам тока (пропорциональны квадрату тока);
- магнитные потери, обусловленные перемагничиванием материала сердечника в переменном магнитном поле (пропорциональны квадрату магнитной индукции);
- механические потери, обусловленные трением (в подшипниках, вращающихся частей о воздух и т.п.).

Следует подчеркнуть, что во вращающихся ЭМ возникают все перечисленные потери, а в статических ЭМ, например, в трансформаторах, механические потери отсутствуют.

Причины возникновения указанных потерь, с физической точки зрения, следующие:

1) Электрические потери:

- Перекос фаз и отклонение значения питающего напряжения. Асинхронные двигатели чувствительны к уровню питающего напряжения. Отклонение в 5% заметно увеличивает нагрев, при отклонении 10% эксплуатация двигателя ставится под вопрос.
- Пропадание фазы. Это крайний случай перекоса фаз, который возникает вследствие обрыва в питающей линии, пусковом устройстве либо внутри двигателя. Последствия — значительное понижение механического момента на валу вплоть до полной остановки двигателя.
- Нарушение схемы включения. Это относится, прежде всего, к схеме «Звезда» – «Треугольник». Причиной проблемы может быть неисправность схемы запуска либо ошибка электротехнического персонала.
- Замыкание в обмотке двигателя. Может быть межвитковым или между фазами. Определяется путем измерения тока по фазам во включенном состоянии либо с помощью омметра, когда двигатель выключен. При небольшом количестве замкнутых витков замыкание определить сложно.

Причинами недопустимого общего повышения температуры обмоток статора и ротора могут быть также:

- а) большая нагрузка электродвигателя;
- б) несоответствие действительного режима работы номинальному.

При увеличении нагрузки будет увеличиваться ток в обмотке статора. Одновременно возрастает ток и в обмотке ротора. Это вызывает значительное увеличение температуры обмоток, так как нагревание обмотки пропорционально квадрату тока.

2) Потери в стали: делятся на потери на гистерезис и потери на вихревые токи (токи Фуко).

- Гистерезис обусловлен циклическим перемагничиванием магнитного материала. Когда переменный ток проходит через обмотку, магнитное поле в сердечнике изменяется по направлению и величине. Это приводит к перемагничиванию материала: домены (небольшие области с односторонней намагниченностью) перестраиваются в соответствии с внешним полем. При этом часть энергии тратится на преодоление внутренних сил трения между доменами и дефектами кристаллической структуры материала, эта энергия превращается в тепло и теряется.

- Вихревые токи возникают в проводящем материале сердечника под действием переменного магнитного поля. Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, изменение магнитного потока вызывает появление электрических токов, которые текут в замкнутых контурах внутри сердечника. Эти токи создают собственное магнитное поле, противодействующее основному, и выделяют тепло из-за сопротивления материала.

Для уменьшения потерь в стали для изготовления магнитопроводов используют материалы с узкой петлей гистерезиса, например специальные электротехнические стали, причем сердечники изготавливают из тонких изолированных листов стали (шихтованные сердечники).

3) Механические потери:

- Увеличение механической нагрузки на валу сверх номинального значения.
- Заклинивание механизмов, попадание в них инородных предметов
- Износ подшипника. Рано или поздно это приведет к его заклиниванию или разрушению. Важно диагностировать данную неисправность на ранней стадии, поскольку разрушение подшипников может привести к повреждению ротора, обмоток и корпуса двигателя.

- Механическое повреждение электродвигателя, например, нарушение соосности подшипников, которое вызовет их перегрев и трение ротора об статор.
- Недостаточное охлаждение корпуса. Как правило, охлаждение производится при помощи крыльчатки обдува, расположенной в задней части двигателя. Если крыльчатка сломана или зацепилась за решетку и проворачивается на валу, двигатель будет перегреваться. Другая причина уменьшения обдува – пониженные обороты двигателя при его питании через преобразователь частоты. В таком случае нужно применять независимый принудительный обдув.
- Загрязнение двигателя. Повышенная влажность, пыль, грязь и прочие внешние факторы подобного рода, возникающие при неправильном хранении и эксплуатации электродвигателя, способны механически повредить двигатель изнутри. Коррозия от влаги (ржавчина) или пыль (грязь) попросту сужают зазор между ротором и статором, забивают подшипники. Все это тормозит ротор, вызывая перегрузку в обмотках, что, опять же, приводит к перегреву двигателя.

2.2.2. Влияние нагрева на работоспособность электрических машин

При электромеханическом преобразовании энергии часть потребляемой энергии всегда преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой электрической машиной энергией и отдаваемой называют потерями. Именно потери и приводят к нагреву электродвигателя.

Наиболее чувствительной к нагреванию частью электродвигателя является электрическая изоляция обмоток, которая в значительной мере определяет надежность работы и срок службы электродвигателя. Продолжительный перегрев обмоток может вызвать разрушение изоляции обмоток по следующим причинам:

- пересыхание изоляционных материалов;
- разрушение лака на обмоточных проводах;
- межвитковые и межобмоточные короткие замыкания.

Повышенная температура ускоряет химические реакции, разрушающие полимерную структуру изоляции. Материалы становятся хрупкими, теряют эластичность и диэлектрическую прочность. По мере старения в изоляции об-

разуются микротрешины и расслоения, которые становятся путями для проникновения влаги и загрязнений. Это ещё больше снижает диэлектрическую прочность. В конечном итоге перегрев приводит к **термическому пробою изоляции**, когда она теряет свои диэлектрические свойства и происходит короткое замыкание. Это может вызвать серьёзные повреждения оборудования и даже пожар. Кроме того, высокая температура увеличивает электрическое сопротивление проводников, что приводит к дополнительным потерям энергии и ещё большему нагреву. В экстремальных случаях обмотки могут деформироваться и даже расплавиться. Именно поэтому необходим достоверный контроль температуры во время работы оборудования с помощью датчиков или автоматизированных систем.

По влиянию длительных превышений тока, перегрузки подразделяются на небольшие и большие. Последствия первых проявляются постепенно, но по мере увеличения температуры процесс разрушения изоляции намного ускоряется. При перегреве на 10 градусов срок службы изоляции обмоток сокращается вдвое, но последствия можно обнаружить только после нескольких месяцев эксплуатации. Перегрузки второго типа разрушают изоляцию очень быстро.

При этом очевидно, что температура нагрева обмоток электрооборудования зависит от теплотехнических характеристик используемых в нем материалов и параметров окружающей среды. Поэтому на процесс нагрева влияют такие физические параметры, как теплоемкость и теплоотдача.

В зависимости от теплового состояния электродвигателя и окружающего воздуха степень их влияния может быть различной. Если разность температур двигателя и окружающей среды невелика, а выделяемая энергия значительна, то ее основная часть поглощается обмоткой, сталью статора и ротора, корпусом двигателя и другими его частями. Происходит интенсивный рост температуры изоляции. По мере нагрева все больше проявляется влияние теплоотдачи. Процесс устанавливается после достижения равновесия между выделяемым теплом и теплом, отдаваемым в окружающую среду.

2.3. Аналитический обзор систем теплового контроля обмоток электрооборудования переменного тока

Очевидно, что выход из строя практически любой электрической машины, входящей в состав ЭЭС, приводит к сбоям работы или ЭЭС в целом, или конкретного электропривода. Следовательно, все электрические машины

должны быть снабжены устройствами тепловой защиты, способной эффективно и достоверно отслеживать текущую температуру их обмоток и обеспечивать возможность интегрироваться в систему автоматического управления электроприводом. При этом очевидно, что эффективную систему тепловой защиты электрооборудования невозможно построить без наличия достоверной системы контроля температуры его обмоток.

Существуют различные способы теплового контроля обмоток [22, 23, 28]. Общая классификация основных способов теплового контроля обмоток электрооборудования, составленная на базе анализа известных в настоящее время систем контроля нагрева обмоток, приведена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Общая классификация основных способов теплового контроля обмоток

По принципу функционирования способы теплового контроля обмоток можно разбить на две большие группы:

1. Способы непосредственного измерения температуры обмоток $t_{обм}$;
2. Способы косвенного контроля, при которых контролируется не непосредственно температура обмотки, а параметр другой физической сущности,

функционально связанный с нагревом обмотки и величина которого позволяет оценить величину $t_{обм}$.

В свою очередь, способы косвенного контроля можно разделить на два класса:

- 1) контроль параметров, величина которых *влияет* на величину нагрева обмотки и вызывает изменение $t_{обм}$;
- 2) контроль параметров, численные значения которых *зависят* от величины $t_{обм}$, т.е. изменяется под действием изменения $t_{обм}$.

2.3.1. Способы непосредственного контроля температуры

К первой группе относятся большое количество различных системы контроля, выполняющих непосредственное измерение температуры обмоток. Однако не все из них пригодны для применения в системах тепловой защиты. Например, системы контроля температуры с использованием термометров расширения (ртутных, спиртовых или толуоловых), которые прикладывают к доступным местам обмотки статора, например, к поверхности лобовой части обмотки, использовать в системах тепловой защиты нельзя.

Для контроля температуры электрооборудования используют также термоиндикаторы, которые при достижении определенной температуры изменяют свой цвет [29, 30, 31]. Такой контроль реализуется или в виде добавок в лакокрасочные покрытия, или в виде стикеров, которые наклеиваются на элементы электрооборудования, подлежащие контролю теплового состояния. При этом результаты измерений можно оценить только визуально (в виде зрительного образа), поэтому термоиндикаторы также нельзя использовать в системах автоматизированного контроля.

Для контроля температуры электрооборудования применяют системы с использованием термодатчиков, встроенных в машину.

Указанные термодатчики позволяют осуществить контроль температуры непосредственно в месте установки. Например, серийно выпускаются электрические двигатели со встроенными термочувствительными элементами на основе термосопротивлений, а также термисторного и биметаллического типов. Например, в выпускаемых в настоящее время тяговых асинхронных двигателях для контроля теплового состояния машины в пакет статора встраиваются датчики температуры в виде терморезисторов типа РТ-100 (рис. 2.2).

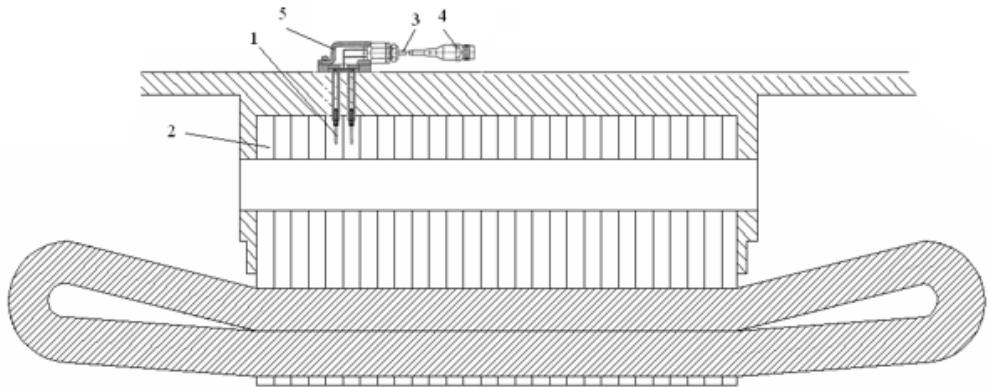


Рис. 2.2. Установка термодатчиков:

- 1 – капсула с терморезисторами; 2 – сердечник статора; 3 – кабель;
4 – штепсельный разъем; 5 – уплотнительная крышка

Термодатчики могут размещаться и в лобовых частях обмотки статора по одному в каждой фазе со стороны, противоположной вентилятору [32]. В этом случае используются полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом, которые соединяются последовательно и включаются в цепь исполнительного элемента, например, реле, реагирующего на сигнал датчиков.

Однако способ теплового контроля с использованием термодатчиков обладает целым рядом недостатков:

- Невозможность использования для общепромышленных машин, уже находящихся в эксплуатации, т.к. установку термодатчиков необходимо осуществлять на этапе изготовления машины;
- Осуществляется контроль только локальной температуры в месте установки термодатчика, причем это место не всегда является наиболее нагреваемым. Например, разница между температурами лобовых частей обмоток машины со сторон подачи и выхода охлаждающего воздуха из электродвигателя может достигать 15-35 % [33, 34]. Это позволяет сделать вывод о том, что информация о температуре сердечника статора в одной точке не может быть использована для корректной оценки теплового состояния всей машины в период эксплуатации;
- Наличие между обмоткой и датчиком изоляции, которая обладает определенной тепловой инерционностью, не обеспечивает оперативный контроль при резком повышении нагрева обмотки.

Таким образом, системы контроля температуры обмоток $t_{обм}$, основанные на способах непосредственного измерения температуры, не обеспечивают

требуемого уровня точности и достоверности контроля текущего нагрева обмоток.

2.3.2. Способы косвенного контроля температуры

Способы теплового контроля второй группы осуществляют косвенный контроль температуры $t_{обм}$.

К **первому классу** таких способов можно отнести регистрирующие системы, производящие оценку теплового состояния обмотки, основанную на контроле тока АД [35]. Устройства, реализующие этот способ, имеют достаточно простую конструкцию. Однако они не могут учесть изменение внешних климатических условий, а также изменения условий охлаждения АД в процессе его эксплуатации, влияющих на фактический нагрев обмотки. Поэтому увеличение тока выше допустимого значения не обязательно приводит к перегреву обмотки, которая, к тому же, имеет тепловую инерционность. Соответственно, точность контроля температуры обмотки при использовании этого метода не высокая.

Косвенный контроль ожидаемого теплового состояния электрооборудования нередко выполняют путем постоянного контроля режимов и условий работы АД (параметров питающей сети, параметров нагрузки и условий работы в пусковых и рабочих режимах, условий охлаждения и т.п.) [36]. При нахождении этих показатели в штатных диапазонах, принимают, что величина $t_{обм}$ не превысит допустимого значения. Но высокой объективной точности данный косвенный контроль не имеет.

Таким образом, системы тепловой защиты с использованием способов, относящихся к первому классу систем косвенного контроля температуры, не обеспечивают надежную защиту АД от перегрева.

Ко **второму классу** таких способов можно отнести следующие способы:

- способы контроля инфракрасного излучения, испускаемого нагретыми поверхностями;
- способы оптоэлектронного измерения температуры на основе оптоволоконных датчиков температуры;
- способы, основанные на тепловой модели;
- способы, основанные на контроле активного сопротивления обмотки.

1) Для теплового контроля АД первым из указанных способов используют тепловизоры (позволяющие получить картину теплового поля) и инфракрасные термометры (пиromетры, которые определяют только температуру зоны контроля) [37, 38]. Очевидно, что для автоматизированных систем теплового контроля такие способы мало приемлемы, поскольку позволяют оценивать нагрев только визуально.

2) Второй способ использует эффект изменения характеристик пропускания света оптоволокном при воздействии на него температуры [39]. Однако системы теплового контроля с волоконно-оптическими датчиками имеют сложную конструкцию и относительно большие габариты, поэтому большого распространения не получили.

3) Применение в системе теплового контроля АД его математической тепловой модели позволяет выполнять алгоритмический расчет температуры обмотки на базе контроля текущего значения тока, получаемого в режиме реального времени при эксплуатации АД [40, 41, 42]. При составлении таких схем учитывают, что имеет место полная аналогия математического описания тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений. Существенным недостатком данного подхода является необходимость знания всех собственных тепловых параметров тепловой модели данного АД, численные значения которых определить экспериментальным или расчетным путем весьма сложно, а для АД, уже находящихся в эксплуатации, эта выполнить практически невозможно. Кроме того, применение систем теплового контроля на базе тепловой модели не учитывает фактические условия работы и охлаждения АД.

4) Как показал анализ современного состояния систем теплового контроля АД, одними из наиболее перспективных являются способы контроля, основанные на контроле температуры обмотки статора путем измерения ее активного сопротивления $R_{обм}$. Практическая осуществимость такого способа объясняется тем, что изменение величины R_C позволяет вычислить среднюю температуру обмотки T_P в рабочем состоянии по формуле

$$T = [(R_{обм.P} - R_{обм.H}) / R_{обм.H}] (K + T_H) + T_H, \quad (2.1)$$

где $R_{обм.H}$ – начальное сопротивление обмотки при температуре T_H ; $R_{обм.P}$ – сопротивление в рабочем состоянии; K – температурный коэффициент сопротивления.

Таким образом, в качестве термодатчика в данном случае можно использовать непосредственно саму обмотку АД.

Величину $R_{обм}$ можно определить методом «вольтметра-амперметра», подавая на обмотку постоянное напряжение:

$$R_{обм} = U_C / I_C, \quad (2.2)$$

где U_C и I_C – падение напряжения на обмотке и ее ток.

Проведенный анализ опыта использования различных систем тепловой защиты АД показал, этот именно этот способ следует признать одними из наиболее перспективных [43, 44].

Для реализации этого способа в цепь рабочего переменного тока надо ввести соответствующий постоянный ток, необходимый для расчета $R_{обм}$. Такой ввод можно сделать двумя методами: 1) от дополнительного источника постоянного тока [45, 46]; 2) формированием постоянного измерительного тока из переменного рабочего тока.

Один из возможных вариантов аппаратной реализации первого способа ввода постоянного тока показан на рис. 2.3.

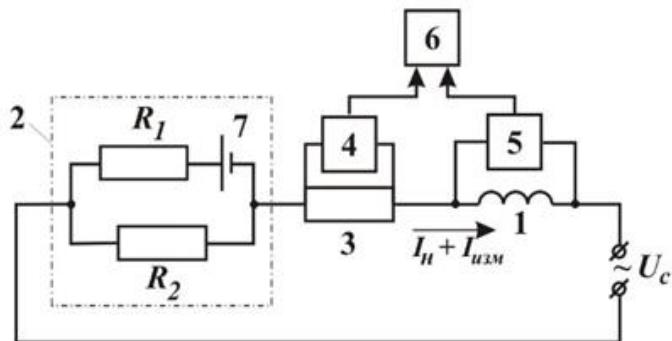


Рис. 2.3. Принципиальная блок-схема устройств ввода постоянного измерительного тока с использованием дополнительного источника питания

Здесь обозначено: 1 – термодатчик в виде обмотки АД; 2 – блок ввода измерительного постоянного тока; 3 – измерительный шунт; 4 и 5 – блоки измерения величины измерительного постоянного тока $I_{изм}$ и величины падения напряжения на термодатчике 2 от тока $I_{изм}$; 6 – вычислительный блок; 7 – источник постоянного напряжения.

Для защиты источника 7 от действия рабочего переменного тока I_h необходимо параметры резисторов R_1 и R_2 , входящих в блок 2 по рисунку 2.1, *a*, рассчитать с учетом сопротивления контролируемой обмотки 1 [45]. В блоке 6 осуществляется процедура деления выходного сигнала блока 5 на выходной

сигнал блока 4. При этом блок 6 может быть выполнен в виде логометрического преобразователя, выходной сигнал которого, с учетом заранее известной величины сопротивления обмотки $R_{\text{C.H.}}$, пропорционален ее текущей температуре.

В [44, 46] источник постоянного напряжения предлагается вводить в нейтральную точку двигателя путем подключения между нейтралью обмоток двигателя и нейтралью питающей сети. Схема измерительной системы показана на рис. 2.4.

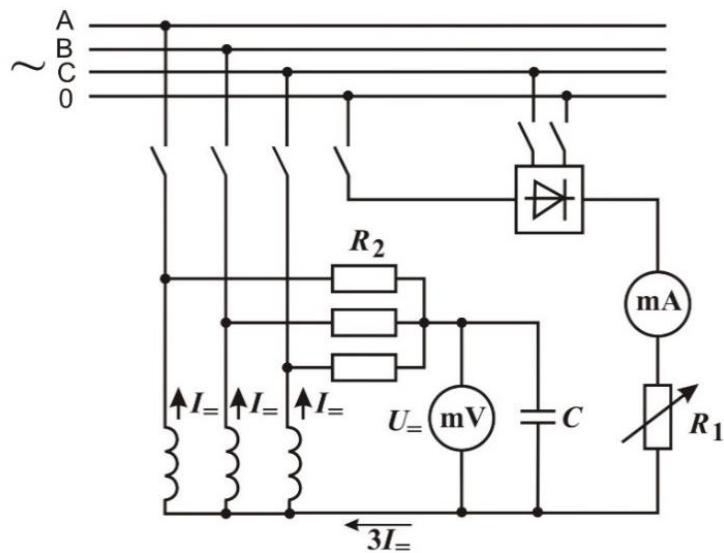


Рис. 2.4. Схема ввода и контроля измерительного постоянного тока с использованием нейтральной точки двигателя

Для того, чтобы ограничить нежелательный переменный ток тройной гармоники и нулевой последовательности, в цепь постоянного тока подключается добавочное большое сопротивление R_1 . Величина постоянного напряжения U_- на обмотках измеряется между нейтральной точкой машины и искусственной нейтральной точкой, созданной путем подключения трех одинаковых резисторов R_2 . Конденсатор C включен для того, чтобы отфильтровать составляющие переменного тока тройной гармоники и нулевой последовательности. Этот тип подключение фильтра RC облегчает фильтрацию в отличие от подключения RC-фильтра по одной фазе. Значение сопротивление обмотки вычисляется по закону Ома с использованием измеренных значения тока I_- и напряжения U_- .

Рассмотренные системы ввода постоянного измерительного тока требуют использования дополнительного постороннего источника постоянного

тока, что значительно усложняет систему контроля. Поэтому их можно использовать при измерении температуры обмотки без отключения АД от сети питания, например, при испытаниях в лабораторных условиях, а на производстве их применение малоперспективно.

Для исключения указанного недостатка была разработана оригинальная конструкция устройства измерения температуры обмоток под нагрузкой без отключения от сети с использованием формирования постоянного измерительного тока из рабочего переменного тока, описанная в [47] (рис. 2.5).

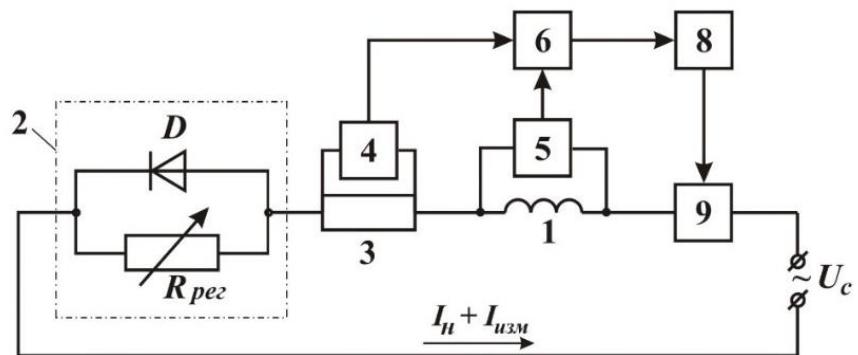


Рис. 2.5. Принципиальная блок-схема устройства тепловой защиты с формированием постоянного измерительного тока из рабочего переменного тока

Нумерация элементов на рис. 2.5 соответствует нумерации рис. 2.3. Наличие в этом случае постоянного тока $I_{изм}$ в цепи обмотки 1 объясняется следующим. Одна из полуволн номинального переменного тока I_h проходит по цепи диода D , а вторая – по резистору $R_{рег}$. За счет этого резистора обеспечивается неравенство площадей полуволн тока. Таким образом, изменения величину сопротивления резистора $R_{рег}$ можно регулировать величину постоянного тока $I_{изм}$, которое для снижения нежелательных воздействий на двигатель обычно не должно превышать 0,5% от величины тока I_h . Блок 4 получает из измеренного полного падения напряжения на шунте 3 величину постоянного тока $I_{изм}$ в цепи обмотки 1, а блок 5 получает из измеренного полного падения напряжения на обмотке 1 величину падения напряжения на этой обмотке от тока $I_{изм}$. Блок 6 выполнен в виде делителя указанных сигналов.

Сигнал с вычислительного блока 6, пропорциональный температуре обмотки 1, подается на пороговое устройство 8, которое настроено так, чтобы оно срабатывало при сигнале с блока 6, превышающим предельно допустимый

нагрев обмотки. При срабатывании порогового устройства 8 подается сигнал на исполнительное устройство 9, которое отключает питание АД. При этом все расчетно-измерительные процедуры в устройстве осуществляются в аналоговой форме, что не позволяет получить высокую точность контроля температуры. Кроме того, для их реализации требуется достаточно сложная аппаратная схема реализации.

Вопросам формирования постоянного измерительного тока из рабочего переменного тока в настоящее время посвящено большое количество работ. Так, в [48, 49] представлен обзор соответствующих современных методов тепловой защиты для двигателей переменного тока с линейным запуском, с плавным пуском и инверторным питанием. Эти активные методы тепловой защиты контролируют среднюю температуру статора посредством оценки сопротивления статора, используя только измерения напряжения и тока статора двигателя, и используют различные способы формирования измерительного постоянного напряжения. Рассмотрим основные из них.

В [50, 51, 52] показано, что ввод сигналов постоянного тока можно обеспечить путем использования полевого МОП-транзистора с изолированным затвором MOSFET и сопротивления R (см. рис. 2.6). Эквивалентное сопротивление цепи ввода постоянного тока изменяют путем управления переключением MOSFET, когда ток течет в разных направлениях. Фактически подаваемое напряжение постоянного тока можно контролировать, регулируя сопротивление R в цепи ввода сигнала.

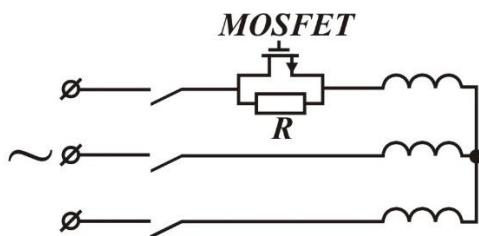


Рис. 2.6. Схема ввода измерительного постоянного тока
путем использования полевого МОП-транзистора

Контроль величины сопротивления обмотки статора АД, которые подключены к сети посредством устройства плавного пуска (Soft-Starter), описан в [53, 54, 55, 56]. Постоянный измерительный ток вводится путем изменения угла задержки тиристоров Soft-Starter (рис. 2.7).

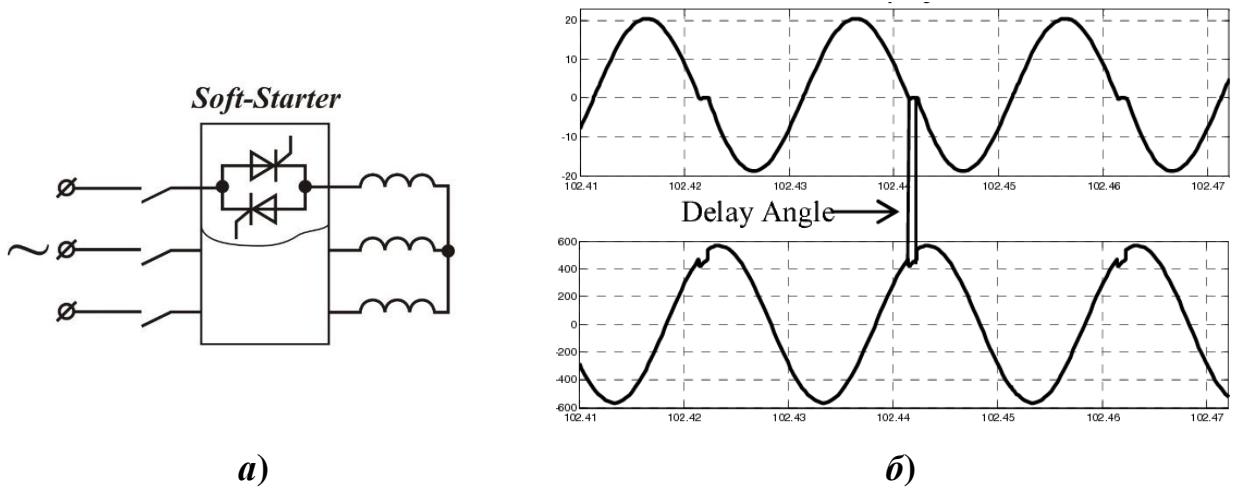


Рис. 2.7. Схема ввода измерительного постоянного тока при использовании в схеме управления АД устройства плавного пуска

Уровень вводимого сигнала постоянного тока регулируется величиной угла задержки. Сигнал управления затвором устройства плавного пуска вызывает короткую задержку в полупериодическом цикле для одной фазы машины. Затем компоненты постоянного тока получают из анализа Фурье по току и напряжению. Используя величину сигналов постоянного тока, рассчитывают сопротивление и температуру обмотки статора. Для получения точной температуры обмотки статора полученные значения предлагаются обрабатывать по специальной программе совместно с другими параметрами.

Тепловая защита двигателей с питанием от инвертора описана в [57, 58, 59]. При разомкнутом контуре напряжение постоянного измерительного тока периодически вводится в двигатель путем изменения пространственной векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для ввода измерительного сигнала предлагается модифицированная схема ШИМ пространственного вектора, которая позволяет автоматически вводить компоненты постоянного тока в дополнение к исходным силовым сигналам напряжения, изменяя переключение переключателей силовой электроники.

Однако необходимо отметить, что ввод любым способом дополнительного измерительного постоянного тока в обмотку статора приводит к определенному изменению показателей двигателя. В частности, возникают пульсации крутящего момента и отрицательный крутящий момент, вызванный составляющей постоянного тока [60]. Поэтому требуется выполнить отделение компонентов постоянного тока от фазных токов и напряжений. Соответствующие методики представлены в [61, 62]. Кроме того, наличие постоянного тока изменяет условия нагрева машины.

Таким образом, видно, что задача теплового контроля обмоток АД в полном объеме не решена и требуется разработка новых подходов к построению систем контроля без нарушения нормального режима работы.

Для повышения эффективности работы как самого электродвигателя, так и системы контроля, необходимо разработать метод, для реализации которого не нужно будет наличие дополнительного постоянного измерительного тока.

2.4. Выводы

1. Показана необходимость теплового контроля электрооборудования, сформулированы его цели и задачи.

2. Рассмотрены причины нагрева обмоток электрических машин, а также влияние нагрева на работоспособность электрических машин.

3. Проведен аналитический обзор систем теплового контроля обмоток электрооборудования переменного тока. По принципу работы способы теплового контроля обмоток разбиты на две большие – группы:

- способы непосредственного измерения температуры обмоток $t_{обм}$;
- способы косвенного контроля, при которых контролируется не непосредственно $t_{обм}$, а параметр другой физической сущности, функционально связанный с нагревом обмотки и величина которого позволяет оценить величину $t_{обм}$.

В свою очередь, способы косвенного контроля предложено разделить на два класса:

- контроль параметров, величина которых влияет на величину нагрева обмотки и вызывает изменение $t_{обм}$;
- контроль параметров, численные значения которых изменяются под действием изменения $t_{обм}$.

Рассмотрены известные системы контроля, реализующие указанные способы, проанализированы их достоинства и основные недостатки.

Наличие перечисленных выше преимуществ предлагаемого варианта $\Phi\Delta$ по сравнению с существующими прототипами говорит о реальных перспективах его самого широкого промышленного применения для решения различных задач контроля и диагностики.

4. Сформулирована задача и направление дальнейших исследований по созданию перспективных систем теплового контроля обмоток электрооборудования переменного тока.

ГЛАВА 3.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ НАГРЕВА ОБМОТОК И ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Разработка нового способа контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока в рабочем режиме без отключения их от питания

Проведенный анализ способов термоконтроля обмоток электрооборудования переменного тока, в частности электрических машин (ЭМ), показал, что каждый из них имеет определенные недостатки, обусловленные особенностями реализованных в них физических явлений и подходов к процессу контроля температуры, которые в конечном счете и определяют возможности каждого способа.

Обобщая, можно констатировать, что наиболее целесообразным методом контроля температуры обмотки ЭМ является метод сопротивления, основанный на принципе зависимости активного сопротивления $R_{обм}$ от температуры, в котором в качестве термодатчика используется непосредственно сама обмотка ЭМ.

Известно, что при реализации процессов измерений и обработке их результатов широко используются различные подходы, основанные на определенных видах априорной информации:

1 – информация о диапазоне изменения измеряемой величины, необходимая для выбора соответствующего средства измерений;

2 – информация о скорости изменения измеряемой величины, ее спектре и корреляционной функции, используемая для выбора интервала дискретизации и средств измерений с подходящими динамическими характеристиками, а также для коррекции погрешности измерений;

3 – информация о флуктуациях измеряемой величины, необходимая для синтеза оптимальных фильтров, расчета погрешности результатов измерений и оценки погрешности интерполяции по дискретным отсчетам;

4 – информация об исследуемой зависимости между измеряемыми величинами, необходимая для планирования оптимальных экспериментов по определению этой зависимости;

5 – информация о влияющих величинах, необходимая для оценки погрешности измерений;

6 – информация о плотности распределения измеряемой величины, используемая при составлении алгоритмов статистического оценивания измеряемой величины и проверке статистических гипотез.

При этом следует отметить, что информация о функциональной связи между измеряемыми величинами, обусловленная свойствами самого объекта измерений, применяется относительно редко, хотя использование информации о функциональных связях между измеряемыми величинами позволяет достичь повышения точности измерений без привлечения особых дополнительных ресурсов. В случае применения данного подхода его эффективность будет зависеть, в первую очередь, от способа задания и достоверности априорных сведений об известных функциональных связях.

Исходя из приведенных выше соображений, предлагается новый подход к построению систем оперативного контроля температуры, который базируется на использовании метода измерения сопротивления обмоток переменного тока без отключения от сети (в рабочем режиме ЭМ) и дополнительной априорной информации о функциональной связи между измеряемыми величинами в виде соответствующих фазовых соотношений между ними

Предлагаемый подход исключает описанные выше недостатки известных способов контроля температуры. Согласно ему, расчет $R_{обм}$ выполняется путем выделения соответствующих компонентов из фазных напряжений и токов.

Обобщённая блок-схема данного способа на примере контроля температуры обмоток асинхронного двигателя (АД) представлена на рис. 3.1.

На рис. 3.1 обозначено:

- 1 – измерительный шунт с активным сопротивлением R_{ui} ;
- 2 – фазная обмотка АД с активным и реактивным сопротивлениями $R_{обм}$ и $X_{обм}$.

Основные измерительно-расчетные процедуры, реализуемые в данном способе обозначены следующим образом:

- I – процедура регистрации напряжения U_1 на измерительном шунте;
- II – процедура регистрации напряжения $U_{обм}$ на фазной обмотке АД;
- III – процедура измерения действующего значения напряжения U_1 ;
- IV – процедура измерения активной составляющей U_{Re} напряжения $U_{обм}$;
- V – процедура определения $R_{обм}$ и $t_{обм}$; K_1 и K_2 – размерные коэффициенты.

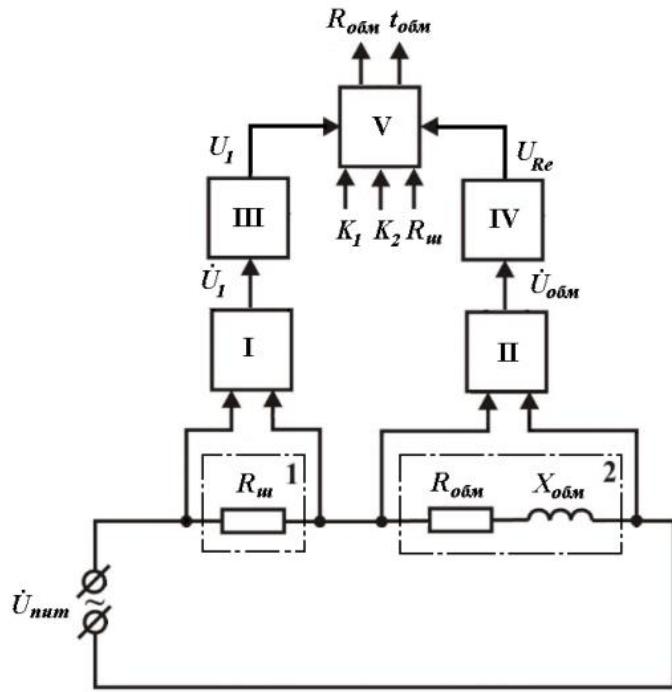


Рис. 3.1. Обобщённая блок-схема способа контроля температуры фазной обмотки

Таким образом видно, что реализация рассматриваемого способа оперативного контроля температуры фазной обмотки АД осуществляется посредством двух независимых измерительных каналов, один из которых выполняет измерение электрического напряжения на измерительном шунте, а другой – измерение активной составляющей электрического напряжения на фазной обмотке АД. Исходя из этих полученных данных, производятся соответствующие вычисления значений в реальном масштабе времени, как активного сопротивления обмотки, так и ее температуры.

На рис. 3.2 приведена принципиальная блок-схема предлагаемого варианта устройства для контроля температуры обмотки электродвигателя, где обозначено:

- 1 – измерительный шунт;
- 2 – обмотка статора, используемая в качестве термодатчика;
- 3 – первый регистрирующий блок (амплитудный детектор);
- 4 – второй регистрирующий блок (амплитудный детектор);
- 5 – третий регистрирующий блок (фазовый детектор);
- 6 – первый вычислительный блок (аналоговый перемножитель сигналов);
- 7 – второй вычислительный блок (аналоговый делитель двух сигналов);

8 – блок регистрации температуры обмотки 2 ЭД.

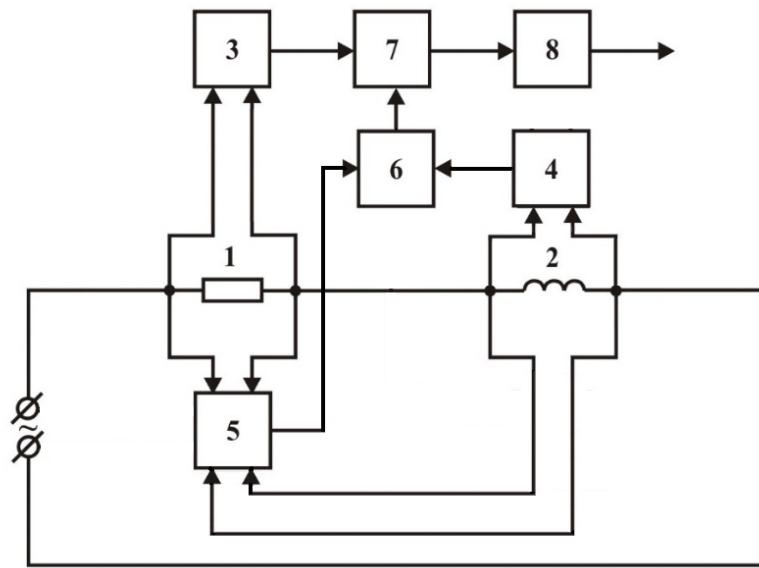


Рис. 3.2. Блок-схема устройства для контроля температуры обмотки и тепловой защиты ЭД:

Если векторы напряжений на измерительном шунте и обмотке статора ЭД совместить соответствующим образом с осями координат на комплексной плоскости $\dot{I}_{\text{ш}}$ (рис. 3.3), то можем записать

$$\dot{U}_{\text{OC}} = \dot{U}_R + \dot{U}_X = \dot{I}_{\text{ш}} \cdot R + j \cdot \dot{I}_{\text{ш}} \cdot X \quad (3.1)$$

Из (3) имеем

$$U_R = |\dot{U}_{\text{OC}}| \cdot \cos(\arg \dot{U}_{\text{OC}}), \quad (3.2)$$

где \dot{U}_{OC} – вектор напряжения на обмотке статора ЭД; \dot{U}_R и \dot{U}_X – комплексы действующих значений напряжений соответственно на активном R и реактивном X сопротивлениях обмотки статора ЭД; $\dot{I}_{\text{ш}}$ – комплекс действующего значения тока через шунт.

Известно, что преобразование переменного напряжения в постоянное в определенном диапазоне значений и диапазоне частот осуществляется посредством детектора, который для рассматриваемого случая должен функционировать в режиме амплитудной демодуляции. Иными словами, на выходе такого детектора действующих значений присутствует АМ-колебание

$$u_{ex}(t) = U_{mex}(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (3.3)$$

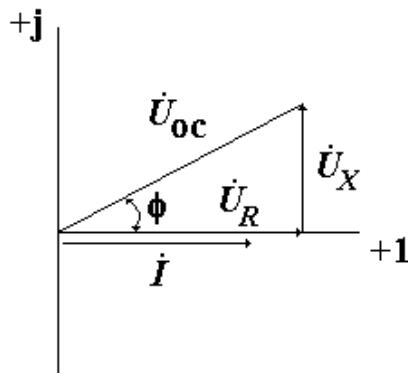


Рис.3.3. Векторная диаграмма

Это АМ-колебание преобразуется в выходной низкочастотный (или постоянный при $\Omega=0$) сигнал, пропорциональный информативному параметру.

$$u_{вых}(t) = U_{m_{вых}} \cdot \cos \Omega t, \quad (3.4)$$

В этом случае эффективность работы детектора оценивается коэффициентом детектирования, равным отношению амплитуды низкочастотного сигнала (или постоянного) на выходе к размаху изменения амплитуды высокочастотного сигнала на входе

$$k = \frac{U_{m_{вых}}}{M \cdot U_{\max}}. \quad (3.5)$$

Для реализации дополнительной априорной информации о функциональной связи между измеряемыми величинами \dot{U}_{oc} и $\dot{i}_ш$ предполагается использование линейного фазового детектора (частный случай синхронного детектора), представляющего собой устройство для демодуляции колебаний полной фазой $\Psi(t) = \phi_0 t + \phi(t)$, промодулированных по фазовому углу.

Работа таких детекторов основана на нелинейном взаимодействии модулированного сигнала с немодулированным опорным колебанием, которое должно создаваться вспомогательным внешним источником. Сравнение фаз при этом можно осуществлять несколькими способами:

- 1 – использование перемножителей колебаний входного сигнала $U_{вх}(t)$ и опорного колебания $U_O(t)$, т.е. $U_{вх}(t) \cdot U_O(t)$;
- 2 – путем нелинейного преобразования суммы сигналов $[U_{вх}(t) + U_O(t)]^2$;
- 3 – на основе балансных фазовых устройств, в которых изменение фазы преобразовываются в изменение амплитуды вспомогательного сигнала и затем его последовательного амплитудного детектирования;
- 4 – использование ключевых сигналов (фазочувствительные выпрямители).

Наиболее предпочтительным для рассматриваемого случая является вариант фазового детектора на основе перемножителя, обобщенная блок-схема которого представлена на рис. 3.4.

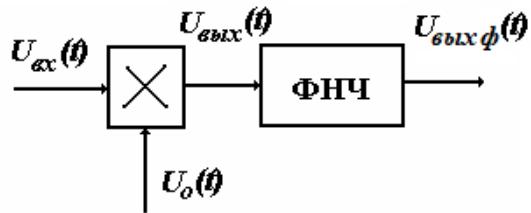


Рис.3.4. Обобщенная блок-схема фазового детектора на основе перемножителя

В результате перемножения выходной сигнал будет равен:

$$\begin{aligned} U_{вых}(t) &= M \cdot U_O(t) \cdot \cos \omega t \cdot U_{ex}(t) \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \\ &= M \cdot U_O(t) \cdot U_{ex}(t) \cdot [M_1 \cdot \cos(2\omega t + \varphi) + M_2 \cdot \cos \varphi], \end{aligned} \quad (3.6)$$

где M, M_1 и M_2 – масштабные коэффициенты.

На выходе фильтра низких частот (ФНЧ), который не пропускает высокочастотную составляющую, имеющую частоту 2ω , выходное напряжение фильтра будет равно:

$$U_{вых\phi}(t) = M_3 \cdot U_O(t) \cdot U_{ex}(t) \cdot \cos \varphi, \quad (3.7)$$

где M_3 - масштабный коэффициент.

С учетом вышесказанного, рассмотрим особенности функционирования устройства, представленного на рис. 3.2.

Гармонический сигнал в виде падения напряжения с измерительного шунта 1, пропорциональный его активному сопротивлению, преобразуется амплитудным детектором 3 в электрический сигнал, соответствующий амплитудному значению тока в рассматриваемой электрической цепи

$$U_{1\text{ ад}} = K_{1\text{ ад}} \cdot I_{m\text{ш}}. \quad (3.8)$$

Этот же гармонический сигнал поступает на первый вход фазового детектора 5, на второй вход которого подается напряжение с обмотки ЭД. При этом на выходе блока 5 формируется электрический сигнал, величина которого пропорциональна косинусу разности фаз φ между напряжением с обмотки ЭД и напряжением с измерительного шунта

$$U_{\phi\text{д}} = K_{\phi\text{д}} \cdot \cos \varphi. \quad (3.9)$$

Данный электрический сигнал подается на первый вход аналогового перемножителя сигналов 6. Кроме того, напряжение с обмотки ЭД подается на амплитудный детектор 4, которым преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный амплитуде этого напряжения

$$U_{2 \text{ ад}} = K_{2 \text{ ад}} \cdot U_{moc}. \quad (3.10)$$

Этот сигнал в дальнейшем поступает на второй вход аналогового перемножителя сигналов 6.

На выходе блока 6, в результате перемножения электрических сигналов с блоков 5 и 4, формируется электрический сигнал, величина которого пропорциональна амплитудному значению напряжения на активном сопротивлении обмотки ЭД:

$$U_{I \text{ дс}} = K_{I \text{ дс}} \cdot U_{mR} \quad (3.11)$$

Блоком 7 реализуется процедура аналогового вычисления отношения сигнала с блока 6 к сигналу с блока 3. В результате этого получается сигнал, соответствующий текущей величине активного сопротивления обмотки 2

$$U_{2 \text{ дс}} = K_{2 \text{ дс}} \cdot U_{mR} / I_{m\text{Ш}} = K_{12 \text{ дс}} \cdot R. \quad (3.12)$$

На выходе блока 7 формируется диагностический сигнал, соответствующий величине температуры обмотки 2. Величина текущего нагрева обмотки 2 выводится в качестве диагностической контрольной информации на блок 8 регистрации температуры обмотки 2. Когда этот сигнал достигает или превышает предписанный верхний предел значения температуры, допустимый по условиям нагрева, на выходе элемента 8 появляется соответствующий сигнал.

Очевидно, что предложенный способ контроля нагрева обмотки и вариант его аппаратной реализации могут быть использованы в качестве основы для системы тепловой защиты, которая может осуществляться как в режиме отключения ЭД, так и в режиме контрольной сигнализации. В первом случае при недопустимом отклонении режимных параметров выходной сигнал элемента 8 необходимо подать на соответствующий исполнительный элемент, который отключит электродвигатель от питающей сети. Во втором случае подается звуковой или световой сигнал обслуживающему персоналу о недопустимом отклонении параметров, и он уже принимает решение о необходимости отключения ЭД.

3.2. Разработка модернизированного способа контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока

Следует отметить, что постоянное присутствие в действующей силовой цепи обмотки статора АД измерительного шунта, используемого в качестве датчика тока, вызывает потери электрической мощности в шунте, его нагрев и

снижение общего КПД системы, поскольку по нему протекает полный рабочий ток машины. Кроме того, нагрев шунта приводит к снижению точности контроля величины тока, что обуславливает снижение точности контроля температуры обмотки. Это фактически является основным негативным ограничивающим фактором при практическом применении данного способа.

Учитывая, что температурные процессы отличаются относительно большой инерционностью, предлагается реализовать процесс измерения информационных сигналов с определенной периодичностью, что существенно снизит уровень вышеуказанного негативного ограничивающего фактора. Для этого был разработан усовершенствованный метод теплового контроля одной из фазных обмоток АД, блок-схема устройства реализации которого показана на рис. 3.5.

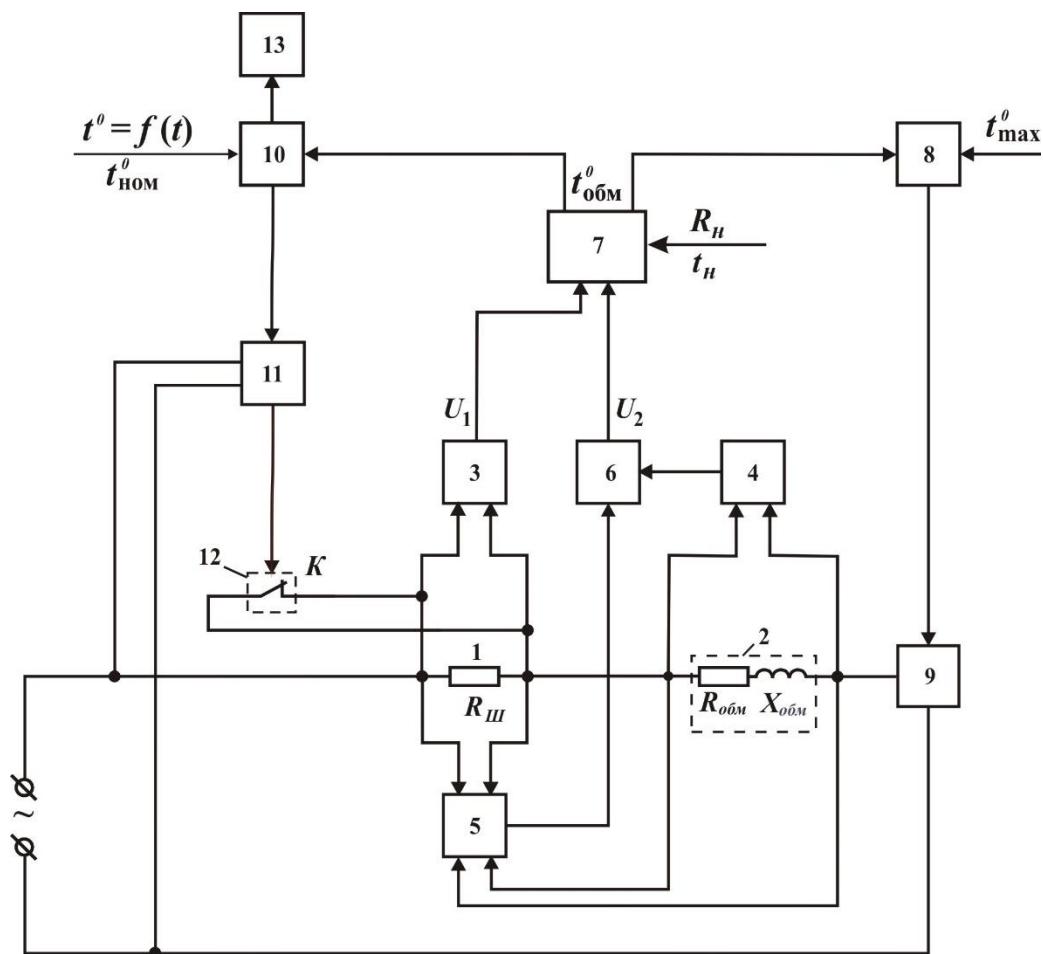


Рис. 3.5. Устройство для контроля температуры обмоток и тепловой защиты электрической машины переменного тока

Устройство для контроля температуры обмоток электрической машины содержит: 1 – измерительный шунт; 2 – обмоткой статора, используемая в качестве термодатчика; 3 – первый регистрирующий блок; 4 – второй регистрирующий блок; 5 – третий регистрирующий блок; 6 – первый вычислительный блок; 7 – второй вычислительный блок; 8 – пороговый элемент; 9 – исполнительный элемент; 10 – блок управления режимом работы; 11 – блок контроля перехода сетевого напряжения через ноль; 12 – управляемый ключ; 13 – индикаторное устройство; $R_{ш}$ – активное сопротивление шунта; $R_{обм}$ и $X_{обм}$ – активное и индуктивное сопротивления обмотки электрической машины.

Устройство работает следующим образом.

При подключении электрической машины к цепи питания переменного тока посредством исполнительного элемента 9 по ее статорной обмотке 2 и по измерительному шунту 1 будет протекать переменный ток \dot{I} . Гармонический сигнал в виде падения напряжения с измерительного шунта 1, пропорциональный его активному сопротивлению $R_{ш}$, преобразуется первым регистрирующим блоком 3, выполненным в виде амплитудного детектора, в электрический сигнал U_1 , пропорциональный величине тока в рассматриваемой электрической цепи

$$U_1 = k_1 R_{ш} I, \quad (3.13)$$

где k_1 – коэффициент преобразования блока 3; I – модуль векторной величины тока \dot{I} .

Этот же гармонический сигнал в виде падения напряжения с измерительного шунта 1 поступает на первый вход третьего регистрирующего блока 5, на второй вход которого подается падение напряжения на обмотке 2. За счет этого на выходе блока 5 формируется электрический сигнал, который подается на первый вход первого вычислительного блока 6, выполненного в виде аналогового перемножителя сигналов.

Рабочий переменный ток создает на обмотке 2 падение напряжение $\dot{U}_{обм}$, параметры которого несут информацию о величине полного сопротивления этой обмотки падения напряжения

$$\dot{U}_{обм} = \dot{U}_R + \dot{U}_X = \dot{I} \cdot R_{обм} + j \cdot \dot{I} \cdot X_{обм}, \quad (3.14)$$

где \dot{U}_R и \dot{U}_X – падения напряжения на активном $R_{обм}$ и индуктивном $X_{обм}$ сопротивлениях обмотки электрической машины.

Это падение напряжение \dot{U}_{oobm} подается на второй регистрирующий блок 4, выполненный в виде амплитудного детектора, которым преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный амплитуде этого напряжения, и который поступает на второй вход первого вычислительного блока 6. На выходе блока 6, в результате перемножения электрических сигналов с блоков 5 и 4, формируется электрический сигнал U_2 , величина которого пропорциональна амплитуде активной составляющей падения напряжения \dot{U}_R

$$U_2 = k_2 \cdot R_{\text{oobm}} \cdot I, \quad (3.15)$$

где k_2 – коэффициент преобразования блока 4.

Таким образом, формирование U_2 выполняется при помощи первого вычислительного блока 6, для которого третий регистрирующий блок 5, работающий под управлением гармонического сигнала в виде падения напряжения на шунте 1, формирует опорное напряжение в виде синфазного гармонического сигнала. За счет этого первый вычислительный блок 6 формирует выходной сигнал U_2 , синфазный напряжению блока 5.

Вторым вычислительным блоком 7, выполненным в виде делителя двух сигналов, реализуется процедура вычисления отношения сигнала с блока 6 к сигналу с блока 3. В результате этого на выходе блока 7 формируется диагностический сигнал, соответствующий текущей величине активного сопротивления обмотки R_{oobm} и средней температуре обмотки t_{oobm} в рабочем состоянии:

$$R_{\text{oobm}} = R_{\text{ш}} \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{U_2}{U_1}; \quad (3.16)$$

$$t_{\text{oobm}}^0 = [(R_{\text{oobm}} - R_{\text{H}}) / R_{\text{H}}] (K + t_{\text{H}}) + t_{\text{H}}, \quad (3.17)$$

где R_{H} – начальное сопротивление обмотки при температуре t_{H} ; K – температурный коэффициент сопротивления материала обмотки.

Значения R_{H} и t_{H} выбираются для данной конкретной электрической машины из справочной литературы и вводятся в блок 7 на этапе подготовки системы тепловой защиты к работе, причем для повышения точности тепловой защиты, величины R_{H} и t_{H} можно определять экспериментально для конкретной машины, для которой выполняется защита.

Полученное значение температуры t_{oobm}^0 вводится в пороговый элемент 8, в который при настройке устройства заранее вводится значение предельно допустимой температуры t_{max}^0 .

Процедура контроля температуры осуществляется следующим образом.

Период пуска. На весь период пуска электрической машины управляемый ключ 12 разомкнут. При подключении электрической машины рассматриваемое устройство в соответствие с описанным принципом его работы осуществляет периодическое измерение текущего значения температуры обмотки $t_{обм}^0$ и сравнивает ее с заданной номинальной величиной температуры обмотки $t_{ном}^0$. При этом, для контроля процесса нагрева электрической машины в период ее пуска, блок управления режимом работы 10 одновременно оценивает интенсивность увеличения температуры обмотки. Такой контроль позволяет осуществить косвенный мониторинг условий и качества пуска электрической машины. Оценка интенсивности нагрева обмотки осуществляется блоком 10 путем сравнения скорости роста $t_{обм}^0$ с нормируемой скоростью роста, задаваемой в виде кривой нагрева электрической машины $t^0 = f(t)$, которая заранее вводится в блок 11 на этапе настройки устройства. Если возникает нештатная ситуация, например, происходит заклинивание приводного механизма, и интенсивность увеличения температура электрической машины превышает заданный предел, то блок управления режимом работы 10 сформирует на индикаторном устройстве 13 информацию о нарушении режима работы. Если причина излишней интенсивности нагрева исчезнет (например, тяговое усилие со стороны электрической машины преодолеет силу заклинивания или просто осуществляется затяжной пуск с большой инерционной нагрузкой) и этот процесс перейдет в нормальной режим, то на индикаторном устройстве 13 произойдет сброс вышеуказанной информации.

Если в процессе пуска нагрев обмотки электрической машины увеличится до значения $t_{обм}^0 \geq t_{max}^0$, то блок 8 отключит электрическую машину путем подачи сигнала на исполнительный элемент 9.

Период рабочего цикла. В период рабочего цикла для уменьшения влияния наличия измерительного шунта 1 в силовой цепи питания на работу электрической машины данный измерительный шунт 1 периодически подключают в цепь питания обмотки 2 на относительно небольшой промежуток времени с определенными перерывами, которые задаются с учетом типа электрической машины и условий ее эксплуатации и могут составлять как минимум 3...5 минут. Из-за инерционности тепловых процессов, протекающих в электрической машине, кратковременные отключения системы тепловой защиты на качество этой защиты не скажется. Поэтому в установившемся режиме работы электрической машины, в случае, если текущее значение температуры $t_{обм}^0 \leq t_{ном}^0$, за счет отсутствия сигнала с блока 10 управляемый ключ 12 находится в нор-

мально замкнутом состоянии. Отметим, что для повышения надежности работы, замыкание и размыкание ключа 12 осуществляется в момент равенства мгновенного значения тока через шунт 1 нулю, что определяется блоком контроля 11 перехода сетевого напряжения через ноль. Продолжительность нахождения управляемого ключа 12 в разомкнутом или замкнутом состоянии задается в настройках блока 10 и учитывает скорость изменения $t^0_{обм}$. При этом, если значение $t^0_{обм}$ приближается к t^0_{max} , то блок 10 это фиксируется и удерживает управляемый ключ 12 в постоянно открытом состоянии. Если будет зафиксировано, что $t_{обм} > t_{max}$, то блок 8 сформирует выходной сигнал и посредством исполнительного элемента 9 электрическая машина будет отключена от питания.

При отключении двигателя блок 11 посредством исполнительного элемента 12 размыкает цепь питания АД, подготавливая его тем самым к повторному запуску.

Отметим, что оценить интенсивность нагрева можно не только с использованием кривой нагрева, но и с учетом тепловой постоянной времени нагрева защищаемой электрической машины $T_{нагр}$, численное значение которой необходимо заранее ввести в блок 10. Если такая информация в документации отсутствует, то ее определяют экспериментальным путем. Среднее значение постоянной времени нагрева можно вычислить по паспортным данным электрической машины.

$$T_{нагр} = 6 \frac{M \cdot t_{cp} \cdot \eta_h}{P_h (1 - \eta_h)}, \quad (3.18)$$

где M – масса электрической машины; t_{cp} – среднее установившееся превышение температуры электрической машины при номинальной нагрузке; P_h и η_h – номинальные мощность и КПД электрической машины.

В качестве управляемого ключа 12 могут быть использованы как полупроводниковые, так и механические ключи. При этом следует отметить, что управляемый ключ 12 фактически формирует измерительный контур устройства, а измерительный шунт 1 в силовой цепи питания электрической машины имеет относительно малое сопротивление. Поэтому в качестве управляемого ключа 12 лучше использовать не полупроводниковый ключ, а механический контакт реле или магнитного пускателя, переходное сопротивление которого в силовой цепи питания электрической машины обладает большей стабильностью, чем динамическое сопротивление полупроводникового ключа.

Отметим также, что обработку информационных сигналов можно осуществлять как в аналоговом виде, так и в цифровом. Для перехода к цифровым

сигналам к выходам первого регистрирующего блока и первого вычислительного блока необходимо подключить соответствующие аналого-цифровые преобразователи, работающие под управлением второго вычислительного блока.

3.3. Экспериментальная проверка разработанного устройства

Схемотехническая реализация предлагаемого устройства была физически смоделирована на базе системы сбора данных E502 производства «ЛКард», которая представляет собой универсальный 16-ти битный модуль ввода/вывода до 32-х аналоговых и 17-ти цифровых сигналов в персональный компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени. Пределы преобразования входных величин ЦАП и АЦП задавались программно, а процесс обработки экспериментальных данных и контроля температуры осуществлялся по соответствующим алгоритмам.

Эксперимент проводился с применением двух одинаковых асинхронных ЭД, которые находились в одной и той же внешней среде с изменяющейся по определенной программе температурой. Температура перегрева одного из электродвигателей, являвшегося «рабочим», измерялась посредством предлагаемого способа термоконтроля, а температура перегрева другого электродвигателя (контрольного) фиксировалась методом заложенных термопреобразователей.

Система сбора данных E502 в течение всего эксперимента использовалась в терmostатированном варианте. По сравнительной оценке результатов измерений температур перегрева каждого из двигателей определялась эффективность нового способа термоконтроля.

В сущности, работа предлагаемого устройства основана на том, что любая обмотка может рассматриваться как интегрирующий термометр сопротивления, поскольку удельное сопротивление материала провода обмотки имеет соответствующую функциональную зависимость от температуры. Именно это свойство, выраженное в явной зависимости активного сопротивления обмотки от ее средней температуры, и реализует устройство, контролируя нагрев обмотки по текущему значению этого сопротивления.

В частности, для медного обмоточного провода сопротивление увеличивается с ростом температуры по линейной зависимости. В качестве примера

на рис. 3.6 представлена зависимость сопротивления меди, являющейся материалом обмоточного провода, от температуры.

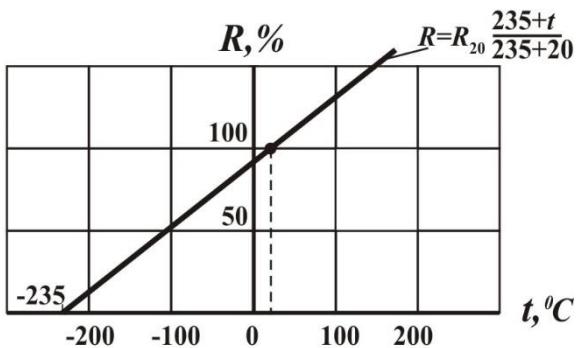


Рис. 3.6. Изменение сопротивления меди в зависимости от температуры

Для определения превышения температуры обмотки $\gamma_{\Gamma/X}$ над температурой холодной обмотки Θ_X , связанного с применением метода сопротивления, использовалось следующее выражение:

$$\gamma_{\Gamma/X} = (R_\Gamma/R_X - 1)(235 + \Theta_X), \quad (3.19)$$

где R_Γ – сопротивление нагретой обмотки; R_X – сопротивление обмотки в холодном состоянии.

Проведенные на базе системы сбора данных Е502 стендовые испытания функционирования структурной блок-схемы устройства оперативного контроля температуры обмотки и тепловой защиты ЭД подтвердили корректность и эффективность предложенного схемотехнического решения и высокую точность измерения температуры, которая в диапазоне от 25^0C до 150^0C составляла $\pm 0,2^0\text{C}$.

Следует отметить, что для аналогового варианта все функциональные узлы структурной блок-схемы легко реализуются посредством специализированных интегральных перемножителей, например, таких как К525ПС2А.

Таким образом, предложенное устройство обеспечивает высокую точность контроля нагрева обмотки электрической машины при упрощении самой процедуры его расчета. Тем самым повышается точность и надежность тепловой защиты, а также срок службы оборудования в целом.

Предложенное устройство с успехом может быть использовано не только для контроля нагрева обмоток и тепловой защиты ЭМ, но и для других электротехнических устройств, обмотки которых питается от сети переменного напряжения, например, силовых трансформаторов.

3.4. Разработка автоматизированной системы управления электродвигателя с тепловой защитой

На основе рассмотренной ранее структурной блок-схемы устройства реализации метода тепловой защиты АД предлагается вариант автоматизированной системы контроля температуры обмотки статора АД, обобщенная структурная блок-схема которой показана на рис. 3.7.

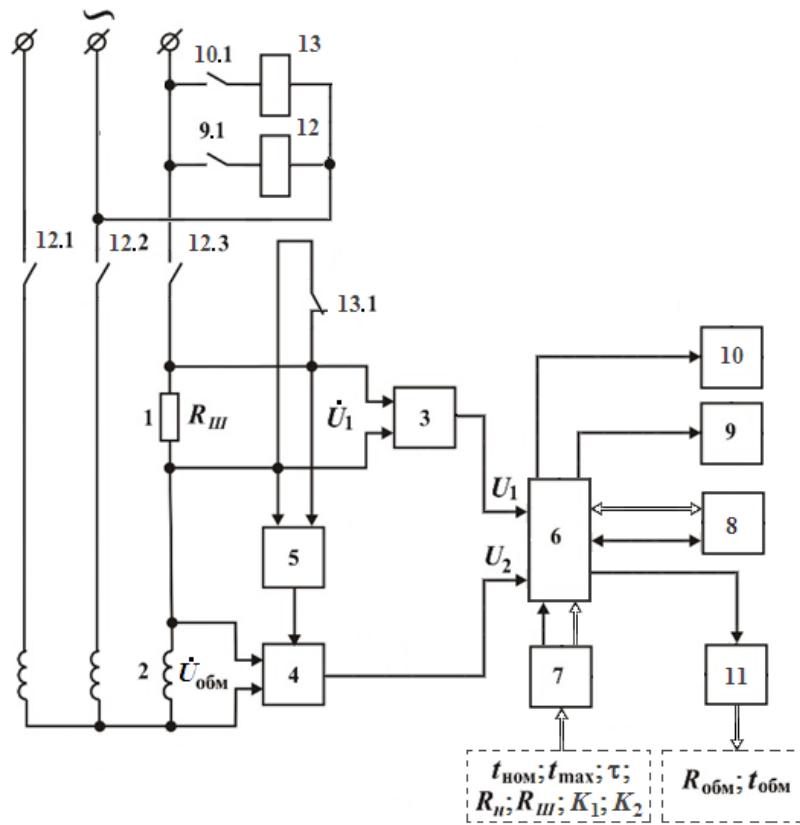


Рис. 3.7. Автоматизированная система контроля температурного режима асинхронного электродвигателя:

На рис. 3.7 обозначено: 1 – измерительный шунт; 2 – обмотка АД; 3 и 4 – первый и второй измерительные блоки; 5 – формирователь опорных напряжений; 6 – аппаратно-программный интерфейс; 7 – пульт управления оператора; 8 – микроконтроллер; 9 – промежуточное реле с нормально открытым контактом 9.1 для управления режимом включения питания для АД; 10 – промежуточное реле с нормально открытым контактом 10.1 для управления режимом измерения; 11 – цифровой дисплей; 12 – магнитный пускатель с нормально открытыми контактами 12.1, 12.2 и 12.3 для силовой цепи питания АД; 13 – магнитный пускатель с нормально замкнутым контактом 13.1 для режима измерения.

Вместо промежуточных реле 9 и 10 в качестве драйверов для управления магнитными пускателями 12 и 13 можно использовать электронные ключи в виде оптопар с симисторным выходом (например, МОС3063), обеспечивающие оптическую развязку управляющей цепи от силовой [63]. При этом, следует отметить, что МОС3063 относится к серии оптосимисторов со встроенной «Zero crossing circuit», т.е. схемой, разрешающей открытие симистора только в момент прохождения напряжением нулевого значения, что существенно снижает помехи, возникающие при включении мощных нагрузок (в данном случае АД).

Данная система контроля состоит из двух измерительных модулей 3 и 4, которые регистрируют соответственно входные измерительные сигналы \dot{U}_1 и \dot{U}_{obm} , а также реализуют их первичную и вторичную обработку. С выходов измерительных модулей 3 и 4 аналоговые сигналы U_1 и U_2 поступают на соответствующие аналоговые входы аппаратно-программного интерфейса 6, посредством которого через пульт управления оператора 7 в микроконтроллер 8 вводится вся необходимая исходная информация о технических параметрах системы и ее режиме работы в целом.

Следует отметить, что рассматриваемая система контроля ориентирована на реализацию двух режимов работы:

1 – эксплуатационный, который не предполагает осуществление процесса контроля параметров фазной обмотки АД;

2 – совмещённый режим, при котором в процессе эксплуатации АД измеряются и контролируются параметры его фазной обмотки.

В соответствии с введенной информацией, микроконтроллер 8 организует один из указанных режимов работы АД посредством выработки управляющих сигналов, подаваемых через аппаратно-программный интерфейс 6 на исполнительные элементы в виде промежуточных реле 9 и 10, которые, в свою очередь, управляют магнитными пускателями 12 и 13, осуществляющими соответственно эксплуатационный и совмещенный режимы работы АД. При срабатывании магнитного пускателя 13 его нормально закрытый контакт 13.1 открывается, подключая тем самым напряжение U_1 к измерительному модулю 3 и формирователю опорного напряжения 5. При этом периодическое включение и выключение магнитного пускателя 13 обеспечивает кратковременное включение измерительного шунта в силовую цепь питания АД, что в свою очередь позволяет осуществлять периодический процесс измерения и контроля параметров фазной обмотки АД.

Аналоговые информационные сигнала U_1 и U_2 , получаемые микроконтроллером 8 с аналогового выхода аппаратно-программного интерфейса 6, посредством двух АЦП микроконтроллера 8 оцифровываются соответствующим образом и в дальнейшем используются для реализации процедур сравнения и вычисления контролируемых параметров фазной обмотки, результаты которых визуализируются на цифровом дисплее 11.

Аппаратно-программный интерфейс 6 осуществляет синхронизацию работы всех основных функциональных модулей системы контроля, а также согласование между их входными и выходными параметрами.

Микроконтроллер 8 во время всего цикла работы АД, включая пусковой режим, постоянно сравнивает текущую температуру $t_{обм}$ с заданной величиной $t_{ном}$. Если возникает нештатная ситуация, например, происходит заклинивание приводного механизма, и интенсивность увеличения температура АД превышает заданный предел, то микроконтроллер 8 сформирует на цифровом дисплее 11 информацию о нарушении режима работы. При этом сигнал на отключение АД сразу формироваться не будет, поскольку проблема может и исчезнуть (например, тяговое усилие со стороны АД преодолеет силу заклинивания или просто происходит затянутый пуск с большой инерционной нагрузкой). Если причина излишней интенсивности нагрева исчезнет и этот процесс перейдет в нормальной режим, то на дисплее 11 произойдет сброс вышеуказанной информации.

Оценить интенсивность нагрева можно с использованием кривой нагрева или с учетом тепловой постоянной времени нагрева защищаемого электродвигателя $T_{нагр}$, численные значения которых необходимо ввести в блок 11. Если такая информация в документации отсутствует, то их определяют экспериментальным путем. Среднее значение постоянной времени нагрева можно вычислить по паспортным данным электродвигателя

$$T_{нагр} = 6 \frac{M \cdot t_{cp} \cdot \eta_n}{P_n (1 - \eta_n)}, \quad (3.20)$$

где M – масса электродвигателя; t_{cp} – среднее установившееся превышение температуры двигателя при номинальной нагрузке; P_n и η_n – номинальные мощность и КПД двигателя.

Численное значение t_{cp} зависит от класса нагревостойкости изоляции обмотки статора и может быть принята равной: 75^0 – для класса изоляции Е, 80^0 – для класса В, 100^0 – для класса F и 125^0 – для класса Н (класс изоляции указывают на шильдике электродвигателя). При этом очевидно, что высокой точности при расчете величины $T_{нагр}$ при настройке блока 7 не требуется.

В случае нагрева обмотки АД до значения $t_{обм} \geq T_{max}$ микроконтроллер 8 отключит питание АД и заблокирует его повторное включение. После устранения причин перегрева осуществляется ручной сброс блокировки для последующего запуска АД.

При подаче необходимого напряжения питания на функциональные блоки системы (на рис. 3.7 не показано) микроконтроллер 8 инициализируется, тестирует систему и формирует на цифровом дисплее 11 информацию о состоянии блока тепловой защиты и причинах предыдущего отключения АД (штатное или аварийное отключение). В это время промежуточные реле 9 и 10 выключены и пуск АД невозможен. После выполнения вышеуказанных действий микроконтроллер разрешает запуск АД.

Обобщенный алгоритм работы системы представлена на рис. 3.8.

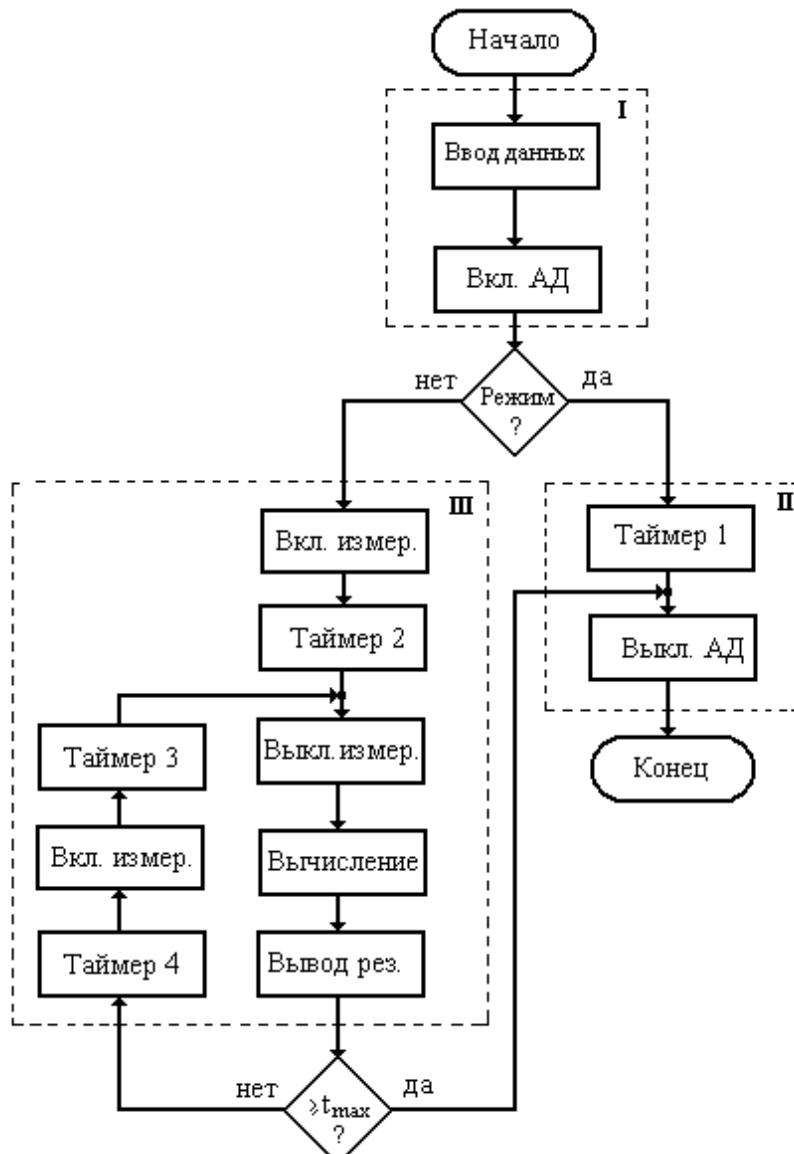


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритма работы автоматизированной системы контроля температурного режима АД

Условно этот алгоритм можно разделить на три функциональных блока:

- I – блок ввода исходных данных, выбора режима работы АД с последующим его подключением к силовым цепям питания;
- II – блок управления эксплуатационным режимом работы АД;
- III – блок управления процессами измерения и контроля теплового режима АД.

Все указанные функциональные блоки алгоритма соответствующим образом взаимосвязаны через два логических условных перехода, один из которых организует эксплуатационный или совмещенный режим работы АД, а другой реализует режим периодического измерения (контроля) или аварийного отключения АД.

Необходимая синхронизация основных функциональных процедур осуществляется посредством четырех таймеров микроконтроллера 8, каждый из которых задает определенную временную задержку:

- Таймер 1 – задает длительность работы АД;
- Таймер 2 – задает время измерительного процесса при пусковом режиме АД;
- Таймер 3 – задает время измерительного процесса при установившемся режиме АД;
- Таймер 4 – формирует цикличность процесса измерения параметров фазовой обмотки АД.

Временные диаграммы работы таймеров в зависимости от режимов работы АД представлены на рис. 3.9.

На рис. 3.9 обозначено:

τ_d – фактическая длительность (время) работы АД;

τ_p – заданное Таймером 1 длительность работы АД; τ_{π} – фактическая длительность пускового режима АД;

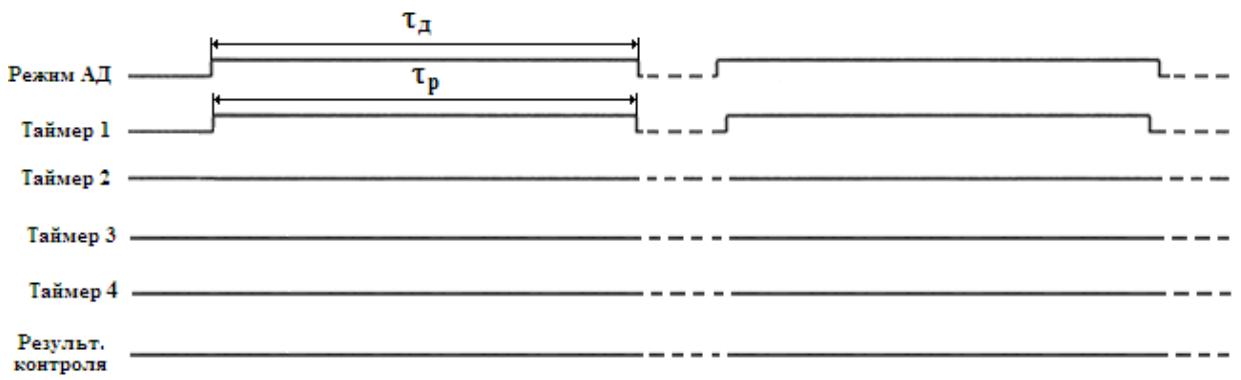
$\tau_{\text{ци}}$ – время цикличности процесса измерения;

τ_i – длительность процесса измерения и контроля во время работы АД;

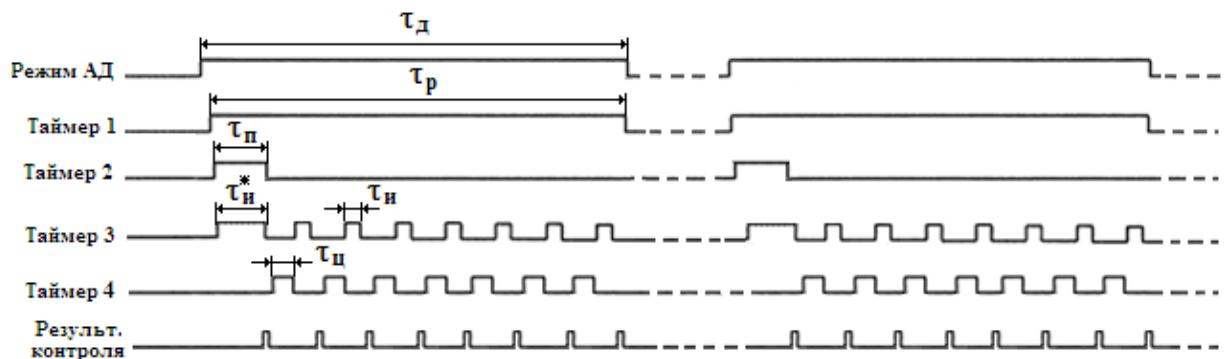
τ^*_i – длительность процесса измерения и контроля во время пускового режима АД.

Длительность временного интервала между τ_i выбирается конкретно для используемого типа АД в зависимости от его технических характеристик и условий эксплуатации.

При отсутствии перегрева фазной обмотки АД результат контроля фиксируется в виде положительного прямоугольного импульса конечной длительности, формируемого после реализации процесса измерения.



a)



б)

Рис. 3.9. Временные диаграммы работы таймеров:
а – эксплуатационный режим работы АД;
б – безаварийный совмещенный режим работы АД

На рис. 3.10 представлены варианты аварийных ситуаций при реализации совмещенного режима работы АД.

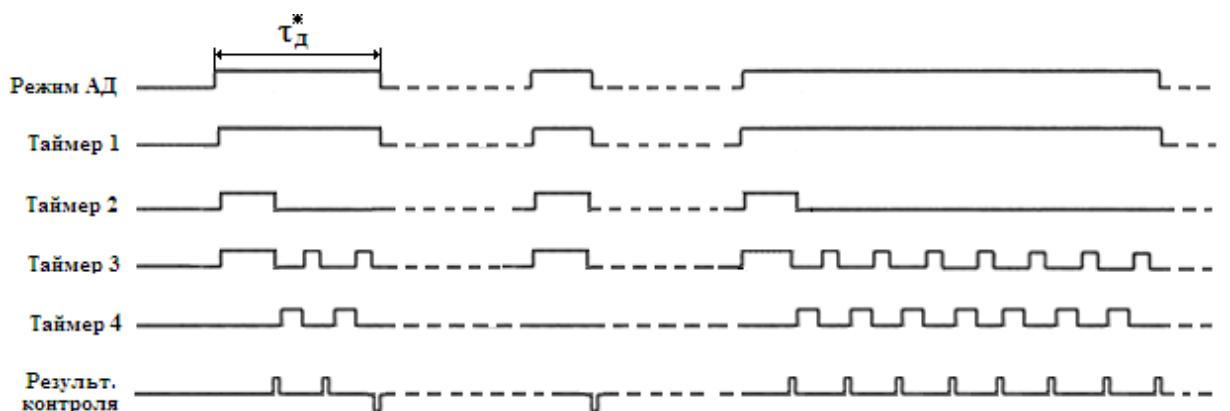


Рис. 3.9. Временные диаграммы работы таймеров при аварийном совмещенном режиме работы АД

При перегреве фазной обмотки АД во время его работы после реализации соответствующего процесса измерения результат контроля фиксируется в виде формируемого отрицательного прямоугольного импульса конечной длительности. Первые временные последовательности диаграммы (рис. 7) соответствуют аварийной ситуации при установившейся работе АД, а вторые временные последовательности временной диаграммы соответствуют аварийной ситуации при пусковом режиме работы АД.

3.5. Выводы

Предложенный способ контроля температуры обмоток электрических машин переменного тока и устройства для его реализации снижают погрешности измерения температуры обмоток за счет информационной избыточности и алгоритмизации обработки измерительной информации. Это позволяет организовать соответствующий оперативный автоматический мониторинг за техническим состоянием электрооборудования и, тем самым, улучшить один из главных критериев их качества – эксплуатационную надежность. При этом оперативная техническая диагностика производится на работающем оборудовании, без отключения питания и/или снятия нагрузки, что имеет принципиальное значение для обеспечения надежности функционирования электрооборудования.

Тепловая защита является одним из важнейших аспектов любой системы управления двигателем. Разработанная автоматизированная система управления обеспечивает надежную тепловую защиту АД с учетом особенностей его нагрева на всех этапах работы. При этом с учетом того, что тепловые процессы имеют достаточно большую инерционность, процесс непосредственного измерения информационных сигналов предложено осуществлять с определенной периодичностью, что значительно снижает негативное влияние наличия системы тепловой защиты на эксплуатационные показатели АД в целом. Показан алгоритм выбора периодичности подключения в зависимости от интенсивности и величины нагрева АД в процессе эксплуатации.

Разработанная система защиты от перегревов может быть использована не только для защиты АД, но и для тепловой защиты других электротехнических устройств переменного тока, например, синхронных машин, силовых и измерительных трансформаторов, токоограничивающих реакторов и т.п.

ГЛАВА 4

АНАЛИЗ СИСТЕМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Причины и цель диагностического обследования основных элементов ЛЭП

Электроэнергетическая система (ЭЭС), как известно, представляет собой совокупность объектов электрогенерирующих и энергопринимающих установок, связанных общим режимом работы в едином технологическом процессе производства, передачи и потребления электрической энергии. Одним из основных элементов ЭЭС являются линии электропередач (ЛЭП), которые предназначены для транспортировки электроэнергии от электростанций к преобразовательным и распределительным узлам и, в конечном счете, к потребителям.

Анализ работы ЭЭС Кыргызской Республики показывает, что возникающие проблемы с передачей электроэнергии в последнее время вызваны, в значительной степени, старением основных фондов. Основная масса ЛЭП была построена в 60–70 годах прошлого столетия, причем при их проектировании исходили из срока службы 30 лет. Именно на этот срок были рассчитаны технические возможности основных элементов ЛЭП, обеспечиваемые используемыми конструктивными решениями, долговечностью материалов с учетом их старения, способами защиты от коррозии и износа от знакопеременных нагрузок и т.д.

Основными элементами, входящими в состав ЛЭП, являются:

- *проводы*, по которым непосредственно передается электроэнергия;
- *опоры*, основными элементами которых являются фундамент, стойки, подкосы и растяжки. На опорах крепят провода и размещают системы защиты от молний и реакторы;
- *изоляторы*, предназначенные для крепления и изоляции проводов на опорах воздушной линии. Их назначение — предотвращение утечки тока на опору и обеспечение безопасного расстояния между проводом и заземлёнными частями конструкции.
- *арматура*, которая состоит из крепёжных деталей, служащих для соединения проводов и прикрепления их к опорам;

- *заземление, разрядники и грозозащитные тросы*, которые обеспечивают безопасность и предотвращают поломку устройства во время неблагоприятных погодных условий.

Одну из ключевых функций в составе ЛЭП выполняют опоры, которые поддерживают провода на необходимой высоте, обеспечивая тем самым безопасную передачу электрической энергии. Очевидно, что их техническое состояние однозначно определяет безопасность и надежность работы всей ЛЭП в целом.

Анализ причин технологических нарушений в работе энергосистем, который позволил классифицировать отказы ЛЭП, и в частности аварии, вызванные нарушением работоспособности их отдельных элементов, показывает, что значительное число отказов ЛЭП является следствием повреждения проводов, изоляторов, а также отключений из-за грозовых перенапряжений [64]. Например, в документе о результатах работы ОАО «Национальная электрическая сеть Кыргызстана» за 2020 год указано, что наиболее повреждаемыми элементами ЛЭП 110–500 кВ являются изоляторы (17,3%), провода и грозозащитные троса (11,1%), выключатели (16,7%) и разъединители (12,5%).

Опоры являются достаточно надежным элементом линий электропередачи, однако разрушения опор имеют наиболее тяжелые последствия и приводят к большим затратам, связанным с восстановлением ВЛ и недоотпуском электроэнергии, а также к рискам угрозы жизни и здоровью персонала и населения. Например, в октябре 2021 года из-за обильного снегопада, сильного ветра и большого налипания мокрого снега на провода на горном перевале Сары-Кыр верхняя часть железной опоры загнулась, и все три отходящие фазные провода ЛЭП 110 кВ «Урумбаш — Жетиген» были оборваны. В целом на аварийно-восстановительные работы ушло 13 дней. По статистическим данным среди всех повреждений воздушных ЛЭП 6-10 кВ примерно 30% аварийных отключений по длительности обусловлены именно разрушением опор [65, 66].

Следовательно, контроль состояния опор линий электропередач является весьма актуальной задачей, имеющей значительную практическую ценность.

На конструктивные элементы опоры ЛЭП в процессе их эксплуатации действуют различные внешние и внутренние факторы, основными из которых являются:

- климатические воздействия (ветер, снег, гололед, перепады температуры, землетрясения, оползни и т.п.);

- механическое воздействие в виде статических и динамических нагрузок, например, от падения деревьев или других объектов на провода, от электродинамической нагрузки электрической сети и пр.;
- коррозия и старение материалов;
- нарушения при строительстве и эксплуатации: несоблюдение технологии монтажа, некачественная сварка, отсутствие регулярного технического обслуживания;

Все указанные факторы приводят к износу опор, что может привести к возникновению различных аварийных ситуаций:

- к потере прочности и деформации опоры;
- к трещинам, разрушение и наклону опор;
- к нарушению целостности креплений и т.п.

Наличие большого разброса прочности в таких материалах опор ЛЭП, как бетон, древесина и сталь, а также значительная изменчивость эксплуатационных нагрузок в виде собственного веса, крановой нагрузки, ветра и снега, действующих на элементы конструкции ЛЭП, часто приводит к технологическим разрушениям. Так, например, при воздействии указанных факторов наиболее часто встречающимся дефектом является возникновение трещин, которые могут не влиять непосредственно на состояние опор ЛЭП в целом, но при этом свидетельствуют о серьезных конструкционных повреждениях, существенно снижающих долговечность и эксплуатационную безопасность опор ЛЭП. Причиной возникновения трещин служит обычно неправильное распределение нагрузки на несущие элементы конструкции опор ЛЭП, либо усадка фундамента, что в итоге и предопределяет необходимость диагностики эксплуатационного состояния оборудования ЛЭП.

Главной и конечной целью диагностического обследования опор можно считать оценку их технического ресурса и выявление их предаварийного состояния. Это позволяет избежать надвигающихся аварийных ситуаций, научно обосновать и минимизировать выбор необходимого и достаточного объема ремонтных мероприятий. При проведении подобных обследований объектами внимания становятся такие основные элементы ЛЭП, как провода и грозозащитные тросы, линейная арматура и изоляция, стойки опор, фундаменты и заземляющие устройства. Главными задачами при этом являются обнаружение элементов, снижающих надежность ЛЭП, установление причин возникновения дефектов, прогнозирование снижения ресурсов этих элементов ЛЭП [67].

4.2. Современное состояние вопроса контроля и диагностики опор ЛЭП

В последние годы широкое распространение получили различные методы диагностики электрической части воздушных ЛЭП – проводов, контактных соединений и изоляции [68 - 70]. Но для диагностики механической части ЛЭП – опор, стоек под оборудование и фундаментов, единственным широко распространенным способом остаются внешние осмотры, регламентируемые правилами эксплуатации электроустановок [71]. В большинстве случаев результаты подобных осмотров не могут считаться исчерпывающей диагностической информацией, так как наряду с видимыми дефектами конструкции зачастую имеют скрытые дефекты. Учитывая массовость этих элементов в составе любой электрической сети, можно констатировать, что вероятность возникновения аварий из-за повреждения механической части отдельных конструкций достаточна высока. Более того, следует подчеркнуть, что величина и распределение напряжений в опорах ЛЭП показывает не только механическую нагрузку непосредственно на опоры ЛЭП, но и косвенно характеризует нагрузку на провода [72]. Поэтому проблеме диагностики механической части ВЛ и ПС, находящихся в длительной эксплуатации, начали уделять более пристальное внимание [73]. Однако эти вопросы остаются актуальными как с точки зрения теории, так и практической реализации, и исследования, направленные на разработку новых систем контроля текущего состояния опор ЛЭП в настоящее время очень востребованы.

Рассмотрим ЛЭП в качестве технической системы (ТС), являющейся в свою очередь элементом геотехнической системы (ГТС). В общем случае структуру ГТС и взаимодействие ТС (инженерного сооружения в виде ЛЭП) с геологической средой и другими окружающими средами более детально можно представить в виде схемы, показанной на рис. 4.1.

Как видно из рис. 4.1, ГТС охватывает некоторое пространство, включающее собственно техническую систему (ТС) в виде ЛЭП, а также некоторые части окружающей и геологической сред в пределах, так называемой, зоны влияния (ЗВ) или зоны взаимодействия ТС и геологической среды. В результате действия различных экстремальных нагрузок на ТС со стороны геологической и окружающей сред, накопления повреждений, изменения с течением времени геометрии и тому подобных причин уменьшается способность данной механической системы сопротивляться внешним воздействиям. Следует отметить, что причинами отказов основных элементов ЛЭП в подавляющем

числе случаев (в среднем до 70%) являются климатические и посторонние воздействия.

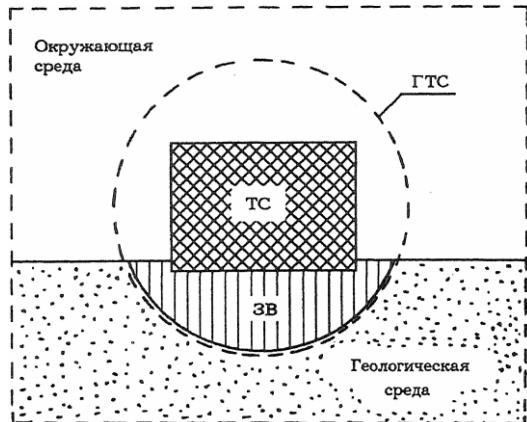


Рис. 4.1. Схема взаимодействия
технической системы с внешними средами

При возникновении нештатных ситуаций на первый план выходит проблема живучести такой ТС, т.е. ее способность оказывать сопротивление внешним воздействиям при повреждении или разрушении отдельных элементов системы или при накоплении необратимых деформаций, приводящих к изменению ее геометрии. При этом системы, обладающие большой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом ограниченную работоспособность, а системы с малой живучестью разрушаются катастрофически, что зачастую сопровождается большим материальным ущербом и гибелю людей.

Для предотвращения в подобных случаях катастрофических явлений необходимо принимать во внимание следующие основные факторы:

1 – любая деформация зарождается и развивается до критического состояния за определенное время;

2 – использование на различных инженерных сооружениях соответствующих систем мониторинга для контроля их основных параметров, а также поведения силовых (несущих) элементов под нагрузкой обеспечит необходимый уровень эксплуатационной надежности и безопасности.

В настоящее время существует множество методов и технологий неразрушающего контроля (НК), которые можно использовать для контроля состояния различных конструктивных элементов ЛЭП [74-76]. При этом следует констатировать, что на практике единственным широко распространенным способом диагностики опор остаются внешние осмотры. Такие осмотры регламентируются правилами эксплуатации электроустановок, но, к сожалению,

не могут обеспечить достоверный серьезный способ диагностики, поскольку наряду с видимыми дефектами опоры могут иметь и скрытые изъяны.

Для контроля бетонных опор более приемлемыми являются следующие методы НК [77]:

1. **Метод пластической деформации**, основанный на измерении размеров отпечатка, который остается на поверхности бетонной опоры после соударения с ней стального шарика (молоток Кашкарова).

2. **Метод упругого отскока**, заключающийся в измерении величины обратного отскока ударника от поверхности бетонной опоры (склерометр Шмидта).

3. **Метод ударного импульса**, регистрирующий энергию удара, возникающую в момент соударения бойка с поверхностью бетонной опоры.

4. **Метод отрыва со скальванием ребра конструкции**, заключающийся в регистрации усилия, необходимого для скальвания участка бетона на ребре опоры, либо местного разрушения бетона при вырывании из него анкерного устройства.

5. **Метод отрыва стальных дисков.**

6. **Ультразвуковой метод**, измеряющий скорость прохождения ультразвуковых волн.

Первые пять методов позволяют определить прочностные характеристики лишь поверхностного слоя бетона железобетонной конструкции, при этом в одной точке, и это является их существенным недостатком.

Для металлических опор применяют следующие методы НК контроля [78, 79]:

1. Ультразвуковая дефектоскопия, которая основана на использовании ультразвуковых волн, которые проникают в металл и отражаются от дефектов. Анализируя отражённые сигналы, можно определить наличие, размер и расположение дефектов.

2. Магнитопорошковый контроль, который позволяет выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты в ферромагнитных материалах.

3. Метод акустической эмиссии, основанный на регистрации упругих волн, возникающих при образовании и развитии дефектов. Он позволяет обнаруживать активные трещины и другие дефекты в реальном времени.

4. Электромагнитный контроль, при котором для выявления дефектов используют электромагнитные поля. Метод эффективен для обнаружения коррозионных повреждений и трещин.

Одной из наиболее достоверных и информативных оценок является количественная оценка надежности элементов ЛЭП, полученная с помощью **вибродиагностики**, основанной на приеме и анализе вибрационных сигналов, которые представляют собой собирательное понятие, включающее информацию о колебательных процессах, например, вибрационных, и акустическом шуме контролируемого объекта в окружающей среде.

Подобная вибродиагностическая система контроля технического состояния элементов ЛЭП относится к классу систем функционального диагностирования, не требующих подачи на объект каких-либо целенаправленных сторонних воздействий. Иными словами, вибродиагностическая система контроля технического состояния элементов ЛЭП работает в процессе применения объекта по назначению, при котором на объект поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его эксплуатационными режимами функционирования в окружающей и геологической средах.

Для рассматриваемого случая рабочими воздействиями являются динамические механические нагрузки на элементы ЛЭП (металлические опоры ЛЭП и высоковольтные провода), возникающие при воздействии естественных возмущающих факторов в виде фоновых колебаний почвы под основанием опор ЛЭП и ветровых потоков. В результате такого воздействия во внутренних структурах указанных элементов ЛЭП возникают соответствующие случайные микровибрации, как результат возбуждение всех форм собственных колебаний ТС в целом.

Следует отметить, что вибрационное состояние ЛЭП определяется совокупностью его вибрационных характеристик и является следствием структурного и функционального состояний и динамических свойств его основных конструктивных элементов.

В качестве диагностических признаков могут быть использованы различные характеристики колебательных процессов: частота и амплитуда спектрального компонента, компонент кепстра, модуляционные характеристики, характеристики временных реализаций вибраций и ряд других.

4.3. Разработка датчика виброперемещения

Известно, что любая система НК предполагает наличие первичных измерительных преобразователей неэлектрической величины в электрический сигнал в виде соответствующих датчиков. На основе проведенного анализа научно-практической и патентной документации по известным техническим системам, применимым к диагностике опор ЛЭП, был сделан вывод о том, что

наиболее приемлемыми являются системы НК, построенные на базе датчика виброперемещения (ДВ) из класса электромагнитных преобразователей, использующих инерцию твердотельных элементов и предназначенных для измерения низкочастотных динамических процессов [80-82]. К преимуществам подобных электродинамических вибродатчиков следует отнести широкий амплитудный диапазон, низкое выходное сопротивление и возможность передачи сигналов по длинной линии связи. Наряду с этим, известные ДВ имеют ряд недостатков, основными из которых являются невысокая чувствительность, а также недостаточная помехозащищенность.

Вариант блок-схемы измерительной цепи электродинамического осевого вибродатчика представлена на рис. 4.2.

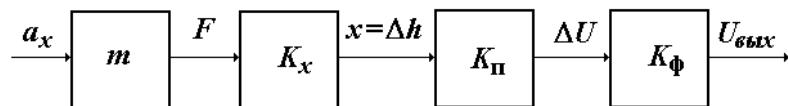


Рис. 4.2. Блок-схема измерительной цепи электродинамического вибродатчика.

Здесь обозначено: a_x – измеряемое ускорение; m – величина инерционной массы чувствительного элемента, являющейся коэффициентом передачи первого звена; F – сила инерции; K_x – коэффициент передачи второго звена; x – перемещение инерционной массы; K_{Π} – коэффициент передачи преобразователя перемещений; ΔU – выходное напряжение преобразователя перемещения; K_{Φ} – коэффициент передачи активного фильтра; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение ДВ.

Для рассматриваемого варианта вибродиагностики предлагается использовать дифференциальный параметрический индуктивный преобразователь значений вибрации в электрический сигнал, т.е. ДВ соленоидного типа, в основе работы которого заложен новый принцип действия [83, 84]. На рис. 4.3 показана конструкция этого датчика, которая в целом соответствует соленоидным плунжерным системам, ориентированным на измерения параметров вибрации в частотном диапазоне 1 Гц÷2 кГц. ДВ имеет цилиндрический корпус 1, закрытый с обеих сторон фланцами 2 и 3. Эти элементы изготовлены из металлического немагнитного материала и обеспечивают герметичность внутренней полости датчика. Фасонная втулка 4, выполненная из диэлектриче-

ского материала, на внешней поверхности имеет пазы для размещения цилиндрических измерительных катушек 5 и 6, а на ее внутренней поверхности установлен медный тонкостенный цилиндр 7. Инерционная масса датчика образована цилиндрической ферритовой втулкой 8, расположенной на немагнитном штоке 9 коаксиально цилиндуру 7, который установлен на упругих плоских подвесах 12 и 13. Ферритовая втулка 8 в совокупности с немагнитным штоком 9 образуют якорь-плунжер ДВ.

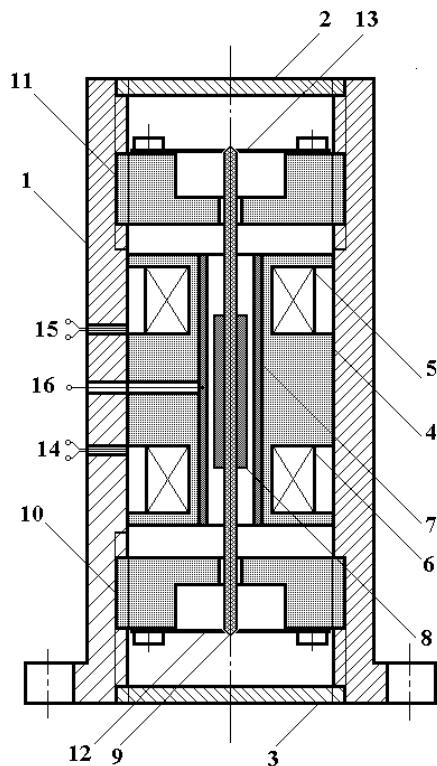


Рис. 4.3. Конструкция датчика виброперемещения

Указанные упругие подвесы жестко закреплены на диэлектрических фасонные шайбы 10 и 11, которые установлены с возможностью осевых перемещений относительно корпуса 1. На стадии подготовки датчика к работе путем смещения шайб 10 и 11 устанавливают нейтральное пространственное положение ферритовой втулки 8 относительно измерительных катушек 5 и 6.

4.4. Теоретическое обоснование работоспособности предложенного датчика виброперемещения

Рассмотрим основные особенности функционирования предложенного ДВ. В связи с тем, что рассматриваемый ДВ относится к классу параметриче-

ских преобразователей, одним из основных вопросов, требующего более внимательной проработки, является выбор и обоснование способа включения ДВ в измерительную схему. Конструктивные особенности рассматриваемого варианта ДВ предполагают включения ДВ в измерительную мостовую схему.

Известно, что в зависимости от характера решаемых измерительных задач различают три способа включения измерительных преобразователей в мостовую схему: 1 – мост с преобразователем, включенным в одно плечо моста; 2 – мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в противоположные плечи; 3 – мост с двумя рабочими преобразователями, включенными в два соседних плеча моста.

В связи с тем, что рассматриваемый ДВ фактически представляет собой преобразователь дифференциального типа, то наиболее предпочтительным для него является третий способ включения, который позволит достичь наибольшей чувствительности мостовой схемы в сочетании с температурной компенсацией и с наименьшей нелинейностью функции преобразования, не превышающей 0,5%.

Исходя из вышеизложенного, предлагается вариант электрической схемы включения ДВ (рис. 4.4).

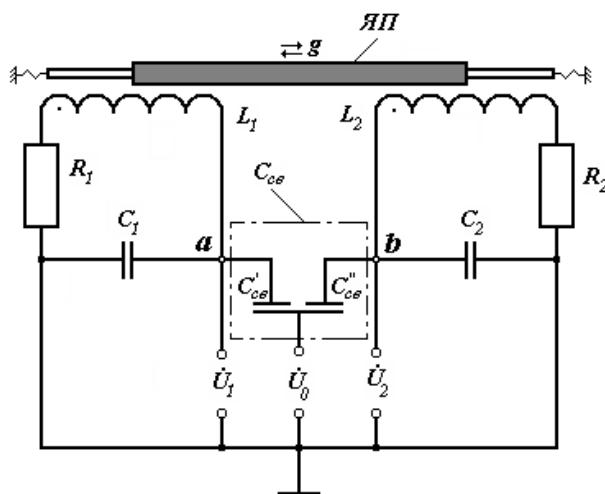


Рис.4.4. Электрическая схема включения ДВ

На рис. 4.4 обозначено: L_1 и L_2 – индуктивности обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек ($ИК_1$ и $ИК_2$); R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; $ЯП$ – якорь-плунжер, являющийся инерционным элементом датчика и на который воздействует виброускорение g ; \dot{U}_0 – комплексная величина гармонического напряжения питания, которое подводится к среднему электроду

трехэлектродного конденсатора связи C_{ce} , образованного медным цилиндрическим электродом с коаксиально внутри расположенным ЯП и первыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек; C'_{ce} и C''_{ce} – конденсаторы связи измерительных катушек, образованные частью среднего электрода трехэлектродного конденсатора связи C_{ce} и самыми нижними рядами проволочных обмоток соответственно ИК₁ и ИК₂; C_1 и C_2 – межвитковые емкости обмоток соответственно первой и второй измерительных катушек.

Из рис. 4.4 следует, что ДВ фактически является одинарным индуктивно-емкостным мостом, представляющим собой четырехплечевую схему, у которой в плечах установлены емкостные (C'_{ce} и C''_{ce}) и индуктивные элементы L_1 и L_2 .

С учетом вышесказанного, для одинарных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов C'_{ce} и C''_{ce} с заполненным диэлектриком межэлектродным пространством, электроды которых представлены в виде соответствующих двух коаксиальных цилиндров с осевой длиной l_C (м), условными радиусами r (м) и r^* (м) соответственно для внутреннего и внешнего электродов справедлива запись следующего вида:

$$C'_{ce} = C''_{ce} = C^* = \varepsilon_0 \times \varepsilon_1 \times \frac{2\pi \times l_C}{\ln\left(\frac{r^*}{r}\right)}. \quad (4.1)$$

Следует отметить, что обмотки ИК₁ и ИК₂ с индуктивностями соответственно L_1 и L_2 фактически включены в измерительную мостовую схему, где через ее соответствующую диагональ подается напряжение питания $u_0 = U_{0\max} \cdot \sin \omega t$ (комплексное значение \dot{U}_0 и циклическая частота возбуждения ω), а выходные сигналы регистрируются через электрические узлы «*a*» и «*b*» измерительной диагонали относительно корпуса в виде соответствующих напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 . В этом случае измеряемую величину можно определять по значению напряжения $\Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$ в измерительной диагонали моста, который по своей сути является неравновесным измерительным мостом.

Кроме того, все конструктивные параметры обмотки ИК₁ идентичны всем конструктивным параметрам обмотки ИК₂ (рис. 5), т.е. $w_1=w_2=w$, $l_{1k}=l_{2k}=l_k$ и $R_1=R_2=R^*$ – соответственно число витков, длина и активные сопротивления обмоток ИК₁ и ИК₂; $X_{C'_{ce}} = X_{C''_{ce}} = X_{C^*} = (\omega \times C^*)^{-1}$ – значение реактивных сопро-

тивлений одинарных двухэлектродных цилиндрических конденсаторов соответственно C_{c6}' и C_{c6}'' .

В связи с тем, что при линейном осевом перемещении ЯП внутри ИК₁ и ИК₂ индуктивности последних L_1 и L_2 изменяются приблизительно пропорционально частям массы ЯП, находящихся внутри соответствующих измерительных катушек (рис.4.5), то для текущих значений этих индуктивностей можем записать:

$$L_1 = \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times \frac{(l_0 + \delta)}{l_k} = L_0 + \Delta L;$$

$$L_2 = \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times \frac{(l_0 - \delta)}{l_k} = L_0 - \Delta L, \quad (4.2)$$

где w и l_k – соответственно число витков и длина измерительных катушек, D_2 и D_1 – наружный и внутренний диаметры поперечного сечения измерительных катушек в сантиметрах; l_0 – величина вхождения ЯП в сантиметрах; δ – линейное осевое смещение ЯП под воздействием внешних возмущений; μ – магнитная проницаемость материала ферритовой втулкой ЯП; L_0 – индуктивности измерительных катушек при нейтральном положении ЯП; ΔL – изменение индуктивности под воздействием внешних возмущений.

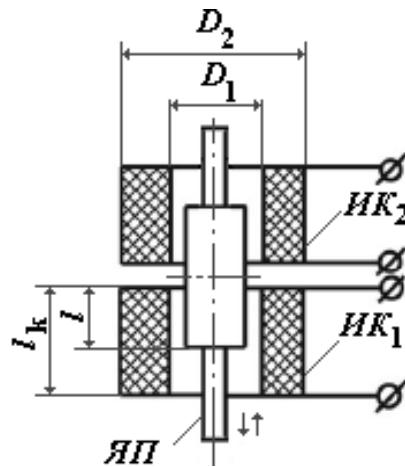


Рис. 4.5. Дифференциальный индуктивный датчик соленоидного типа.

Основное уравнение динамики ДВ с поступательным перемещением чувствительного элемента можно представить в следующем виде:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} + 2 \times \omega_0 \times \beta \times \frac{d\delta}{dt} + \omega_0^2 \times \delta = -a, \quad (4.3)$$

где a – ускорение перемещения корпуса ДВ в абсолютной системе координат; $\omega_0 = \sqrt{W/M}$ – собственная циклическая частота ДВ; β – степень затухания; W – жесткость упругих элементов, M – масса инерционного элемента.

При нейтральном положении ЯП для реактивных сопротивлений ИК₁ и ИК₂ можем констатировать, что

$$L_1 = L_2 = L_0; X_{L_1} = X_{L_2} = X_{L0}, \quad (4.4)$$

где $X_{L_1} = \omega \times L_1$ и $X_{L_2} = \omega \times L_2$ – текущие значения реактивных сопротивлений соответственно ИК₁ и ИК₂; X_{L0} – значение реактивных сопротивлений ИК₁ и ИК₂ при нейтральном положении ЯП, т.е. при сбалансированном состоянии мостовой схемы.

Таким образом, в режиме сбалансированного состояния, при котором $X_{L_1} = X_{L_2} = X_{L0}$, для индуктивно-емкостного моста на его измерительной диагонали будем иметь:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = 0, \quad (4.5)$$

где $\dot{U}_1 = \dot{U}_0 \times \frac{R_1 + j \times X_{L_1}}{R_1 + j \times (X_{L_1} - X_{C_{ee}})} + \dot{U}_{CP}$; $\dot{U}_2 = \dot{U}_0 \times \frac{R_2 + j \times X_{L_2}}{R_2 + j \times (X_{L_2} - X_{C_{ee}'})} + \dot{U}_{CP}$;

\dot{U}_{CP} – комплексное значение аддитивных синфазных помех.

При внешнем воздействии на ЯП, вызывающем его линейное осевое смещение δ , возникают и соответствующие изменения реактивных сопротивлений в виде $\pm \Delta X_L$.

Тогда, с учетом сделанных замечаний, для реактивных сопротивлений ИК₁ и ИК₂ можем записать:

$$\begin{aligned} X_{L_1} &= \omega \times L_1 = \omega \times L_0 + \omega \times \Delta L = X_{L0} + \Delta X_L; \\ X_{L_2} &= \omega \times L_2 = \omega \times L_0 + \omega \times \Delta L = X_{L0} - \Delta X_L. \end{aligned} \quad (4.6)$$

В соответствии с выражениями (4.5) и (4.6) для регистрируемых напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 будем иметь:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times (X_{L0} + \Delta X_L - X_{C^*})} + \dot{U}_{CP}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L0} - \Delta X_L)}{R^* + j \times (X_{L0} - \Delta X_L - X_{C^*})} + \dot{U}_{CP}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

С учетом того, что питание индуктивно-емкостного моста осуществляется электрическим напряжением на циклической частоте последовательного

резонанса $\omega = \omega_p = 1/\sqrt{L_0 \times C^*}$ двух симметричных пар его плечевых элементов $L_1; C'_{ce}$ и $L_2; C''_{ce}$, можем считать:

$$X_{L_0} = X_{C^*}$$

Тогда выражения (7) легко трансформируются к следующему виду:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{CP}; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* - j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{CP}.\end{aligned}\quad (4.8)$$

Для регистрируемого напряжения на измерительной диагонали индуктивно-емкостного моста после несложных математических преобразований получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U} &= \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} + \Delta X_L)}{R^* + j \times \Delta X_L} + \dot{U}_{CP} - \dot{U}_0 \times \frac{R^* + j \times (X_{L_0} - \Delta X_L)}{R^* - j \times \Delta X_L} - \dot{U}_{CP} = \\ &= \dot{U}_0 \times \frac{2 \times (X_{L_0} + R^*) \times \Delta X_L}{(R^*)^2 + (\Delta X_L)^2} - \dot{U}_0 \times j \times \frac{2 \times R^* \times \Delta X_L}{(R^*)^2 + (\Delta X_L)^2}.\end{aligned}\quad (4.9)$$

В связи с тем, что $(R^*)^2 \gg (\Delta X_L)^2$ выражение (9) можно привести к виду:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_0 \times \frac{2 \times (X_{L_0} + R^*)}{(R^*)^2} \times \Delta X_L - \dot{U}_0 \times j \times \frac{2}{R^*} \times \Delta X_L = \operatorname{Re}(\Delta \dot{U}) - j \cdot \operatorname{Im}(\Delta \dot{U})\quad (4.10)$$

Для одновременной регистрации вещественной и мнимой составляющих выходного напряжения измерительного моста требуется два квадратурных детектора (КД) с опорными напряжениями, сдвинутыми по фазе на $\pi/2$. Если векторы опорных напряжений совместить с осями координат на плоскости $\Delta \dot{U}$, то можно записать:

$$\Delta U_{Re} = |\Delta \dot{U}| \times \cos(\arg \Delta \dot{U}); \quad \Delta U_{Im} = |\Delta \dot{U}| \times \sin(\arg \Delta \dot{U}),\quad (4.11)$$

Из анализа полученного выражения (11) следует, что более определенную информацию, связанную с реакцией ЯП на внешнее возмущение, несет мнимая составляющая ΔU_{Im} .

Для повышения точности измерения вещественной и мнимой составляющих выходного напряжения измерительного моста предлагается использовать синхронное детектирование, при котором синхронный детектор (СД) является линейным шестиполюсником. При этом проводимость такого линейного шестиполюсника при помощи опорного напряжения переменного тока периодически изменяется синхронно с частотой этого опорного напряжения.

Функциональное уравнение для СД в общем случае можно представить в следующем виде:

$$u_{\text{ВыХ}}(t) = S \times u_{\text{BX}}(t) \times u_{\text{ОП}}(t)$$

где $u_{\text{ВыХ}}(t)$ – выходная величина СД; $u_{\text{BX}}(t)$ – измеряемая величина; $u_{\text{ОП}}(t)$ – вектор коммутации (периодическая величина); S – постоянная, определяемая параметрами СД.

Следует отметить, что опорный сигнал, создающий вектор коммутации, поступает от того же источника, что и измеряемый сигнал.

Воспользуемся гармоническим типом СД, у которого вектор коммутации определяется выражением вида:

$$u_{\text{ОП}}(t) = U_{\text{ОП}_{\max}} \times \cos \omega_p t$$

Тогда, при подаче на измерительный вход такого гармонического СД с вектором коммутации $u_{\text{ОП}}(t) = U_{\text{ОП}_{\max}} \times \cos \omega_p t$ измеряемого синусоидального напряжения (с частотой, равной частоте вектора коммутации ω_p) $u_{\text{BX}}(t) = U_{\text{BX}_{\max}} \times \sin(\omega_p t + \varphi)$ на выходе СД получим соответствующий выходной сигнал:

$$u_{\text{ВыХ}}(t) = S \times U_{\text{BX}_{\max}} \times \sin(\omega_p t + \varphi) \times U_{\text{ОП}_{\max}} \times \cos \omega_p t$$

или

$$u_{\text{ВыХ}}(t) = \frac{S \times U_{\text{BX}_{\max}} \times U_{\text{ОП}_{\max}}}{2} \times [\sin \varphi + \sin(2 \times \omega_p t + \varphi)] = u_{\text{const}} + u_{\text{var}} \quad (4.12)$$

Из выражения (4.12) видно, что при равенстве частот входного измеряемого сигнала и вектора коммутации выходной сигнал СД содержит постоянную слагаемую, пропорциональную реактивной компоненте вектора измеряемого сигнала:

$$u_{\text{const}} = \frac{S \times U_{\text{BX}_{\max}} \times U_{\text{ОП}_{\max}}}{2} \times \sin \varphi \quad (4.13)$$

При этом, переменная слагаемая u_{var} выходного сигнала СД подавляется соответствующим сглаживающим инерционным фильтром.

Из выражения (4.13) следует, что применение гармонического СД позволит не только определить соответствующую компоненту вектора измеряемого сигнала, но и полностью исключить влияние высших гармоник и помех, наложенных на измеряемое напряжение.

В случае моногармонической вибрации для линейного осевого смещение ЯП под воздействием внешних возмущений можем условно записать:

$$\delta = \delta_{\max} \times \sin(\Omega t + \varphi_{\delta}); \quad (4.14)$$

где δ_{\max} – величина максимального перемещения ЯП относительно его нейтрального расположения; Ω – угловая частота перемещения сердечника; ϕ_δ – начальная фаза перемещения ЯП (для рассматриваемого случая считаем, что $\phi_{\delta=0}$).

Тогда, в соответствии с (4.2) и (4.14) будем иметь:

$$\Delta L = \mu \times w^2 \times \mu \times (D_2 - D_1) \times (l_k)^{-1} \times \delta = Q \times \delta_{\max} \times \sin \Omega t \quad (4.15)$$

Для перевода двух КД в режим синхронного детектирования совместим векторы опорных напряжений КД на комплексной плоскости с соответствующими составляющими вектора питающего напряжения мостовой цепи \dot{U}_0 . В этом случае, с учетом выражения (4.11) и (4.15), а также ранее сделанных замечаний, для мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста можем записать:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{Im}}(t) &= S_{\text{Im}} \times U_{0_{\max}} \times U_{O\Pi_{\max}} \times \frac{1}{R^*} \times \Delta X_L = \\ &= \omega_p \times Q \times S_{\text{Im}} \times U_{0_{\max}} \times U_{O\Pi_{\max}} \times \delta_{\max} \times \sin \Omega t \end{aligned} \quad (4.16)$$

где $Q = \mu \times w^2 \times (D_2 - D_1) \times (R^* \times l_k)^{-1}$ – конструктивный коэффициент ДВ; S_{Im} – коэффициент преобразования СД для мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста.

Для общего случая величина осевого смещение ЯП под воздействием внешних возмущений может быть с достаточной точностью представлена следующим математическим рядом:

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^n \delta_i \times \sin(\Omega_i t + \phi_i). \quad (4.17)$$

Тогда, с учетом (4.17) из выражения (4.16) можно получить:

$$\delta(t) = \frac{\Delta U_{\text{Im}}(t)}{\omega_p \times Q \times S_{\text{Im}} \times U_{0_{\max}} \times U_{O\Pi_{\max}}}. \quad (4.18)$$

Выражение (4.18) определяет закон изменения $\delta(t)$, в соответствии с которым, используя решение дифференциального уравнения (4.3), находится в итоге и величина ускорения перемещения корпуса вибродатчика в абсолютной системе координат.

Полученное выражение (4.18) отражает четко выраженную функциональную зависимость приращения мнимой составляющей выходного напряжения измерительного моста от величины перемещения ЯП, вызываемой внешними вибрациями, характеристики временных реализаций которых косвенно отражают происходящие в конструктивных элементах ЛЭП критические деградационные процессы.

4.5. Выводы

Опоры воздушных ЛЭП в значительной степени определяют надежность и долговечность ЛЭП в целом. Диагностика их состояния позволяет избежать возникновение аварийных ситуаций из-за их разрушений, приводящих к большим затратам, связанным с восстановлением ЛЭП и перерыву в электроснабжении.

Одним из наиболее достоверных и информативных способов диагностики является количественная оценка состояния опор ЛЭП, полученная с помощью вибродиагностики, где рабочими воздействиями являются динамические механические нагрузки на элементы ЛЭП при их эксплуатации, возникающие под воздействием естественных возмущающих факторов в виде ветровых потоков и колебаний почвы под основанием опор ЛЭП.

Для решения этой задачи разработан ДВ соленоидного типа с новым принципом действия, предназначенный для измерения низкочастотных динамических процессов. В работе рассмотрены основные физические процессы, которые определяют новизну рассматриваемого технического решения, а также приведено теоретическое обоснование работоспособности предложенного варианта ДВ. Конструктивной особенностью предложенного ДВ является отсутствие катушки возбуждения, причем его функциональные элементы образуют полноценный измерительный мост, в плечи которого входят межвитковые емкости обмоток первой и второй измерительных катушек, а также емкости, образованные металлическим цилиндрическим электродом с расположенным коаксиально внутри него ферромагнитным стержнем и первыми нижними рядами проволочных обмоток измерительных катушек. Мостовая схема функционирует в резонансном режиме, что гарантирует даже при минимальных значениях рабочих токов максимальное значение напряжений на измерительных катушках. Это обеспечивает высокую чувствительность предлагаемого датчика в целом, а квадратурное преобразование информационного сигнала обеспечивает необходимый уровень помехозащищенности.

С использованием разработанного датчика можно проводить мониторинга целостности опор ЛЭП путем контроля микровибрации их конструктивных элементов, вызванные рабочими воздействиями и преобразования их в информационный электрический сигнал, который составляет основу мониторинговой информации о текущем состоянии элементов конструкции опор ЛЭП.

ГЛАВА 5

КОМПЛЕКСНЫЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРИФЕРИЙНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

5.1. Интеграция акустических и диэлектрических подходов в мониторинге высоковольтных систем

Надёжность распределительного высоковольтного оборудования напрямую определяет устойчивость и непрерывность электроснабжения потребителей. По отраслевым оценкам, до 40% внеплановых отключений в распределительных сетях связаны с отказами оборудования подстанций, и во многих случаях причиной являются частичные разряды (ЧР) в изоляции [88]. Так, например, газоизолированные распределительные устройства (ГИРУ) на напряжение 6–36 кВ используют элегаз (SF_6) в качестве изоляционной среды. Газ SF_6 (шестифтористая сера) обладает крайне высоким потенциалом глобального потепления: по данным IPCC AR6 (2021) его показатель потенциала глобального потепления (GWP_{100}) составляет 25 200 (для сравнения: $CO_2 = 1$), а средний срок жизни в атмосфере достигает ≈ 3200 лет. Это делает SF_6 одним из наиболее устойчивых и климатически опасных фторсодержащих газов, применяемых в электроэнергетике [89]. Поэтому предотвращение утечек SF_6 и отказов ГИРУ имеет не только экономическое, но и экологическое значение. Кроме того, композитные и железобетонные опоры линий электропередачи (ЛЭП) также требуют внимания: со временем в них накапливаются трещины, увлажнение, коррозия арматуры, что снижает механическую прочность конструкции.

Традиционные методы контроля – плановые осмотры, тепловизионный контроль, измерение тангенса δ (для изоляции), простукивание опор – обладают ограниченной чувствительностью и субъективностью.

Для раннего выявления дефектов изоляции (например, ЧР, внутренние повреждения) и деградации материалов необходимы инновационные методы неразрушающего контроля. Перспективным подходом является одновременное использование ультразвуковой акустической диагностики и диэлектрических измерений, объединенных в одном приборе с поддержкой алгоритмов искусственного интеллекта. Идея состоит в том, что мультиmodalный монито-

ринг позволит «видеть» как электрические дефекты (частичные разряды, изменение диэлектрических свойств), так и механические дефекты (трещинообразование, разрывы волокон, ослабление структуры) в контролируемых объектах.

В данной работе рассматривается концепция комбинированного интеллектуального акусто-диэлектрометрического прибора, реализующего такой подход. Этот интеллектуальный прибор – edge-устройство (выполняющее вычисления на месте сбора данных), объединяющее датчики акустической эмиссии/ультразвука и диэлектрометрические датчики и использующее встроенные алгоритмы глубокого машинного обучения для анализа сигналов в реальном времени. Далее проводится обзор существующих открытых данных и научных работ, наработанных методов обработки, а также уже доступных коммерческих решений в этой области. Кроме того, обсуждаются архитектура и потенциал внедрения такого интеллектуального прибора, и обосновываются преимущества интеграции акустического и диэлектрического контроля, усиленного edge-ИИ, для применения в условиях реальных объектов (6–36-кВ ГИРУ, опоры ЛЭП и др.). Таким образом, в работе предложена единая акусто-диэлектрическая платформа, способная одновременно диагностировать электрические и механические дефекты (включая трещинообразование, увлажнение и деградацию композитных и железобетонных опор ЛЭП). В опубликованных системах мониторинга эти задачи до сих пор решались раздельно: ЧР-комплексы контролируют только изоляцию, а структурную прочность опор оценивают другими методами. Кроме того, разработана edge-архитектура с аппаратным разделением задач: FPGA-ядро выполняет БПФ/вейвлет-преобразования и формирует фазово-разрешенные диаграммы ЧР «на лету», тогда как встроенный нейропроцессор запускает компактные CNN-модели и байесовское объединение информации с нескольких сенсоров без обращения к облачной инфраструктуре. Насколько нам известно, в открытой литературе немного публикаций, подробно описывающих реализацию формирования PRPD-диаграмм на FPGA в реальном времени; при этом в промышленных устройствах аппаратная фазовая привязка и построение PRPD-матриц применяются давно, но детали обычно не раскрываются.

Цели и направления работы:

- интеграция методов контроля: объединение диэлектрометрических и ультразвуковых подходов и разработка комбинированных датчиков для совместных измерений;

- адаптивные технологии измерения: самообучающиеся и адаптивные алгоритмы калибровки под конкретные материалы и условия эксплуатации;
- компактные интеллектуальные приборы: портативные/стационарные узлы с edge-ИИ, автоматизирующие измерение и анализ «на месте»;
- программное обеспечение и анализ данных: специализированный софт и ИИ-модели для детектирования дефектов, интегральной оценки состояния и прогноза ресурса с рекомендациями по обслуживанию.

5.2. Физико-информационные основы акусто-диэлектрометрического мониторинга

5.2.1. Акустические индикаторы ЧР и дефектов конструкций

Акустический контроль включает использование ультразвуковых волн и акустической эмиссии для обнаружения дефектов. В контексте электрооборудования наиболее показателен ультразвук для выявления частичных разрядов: разряд в газовой или твердой изоляции генерирует высокочастотный звук (ультразвук), который может улавливаться датчиками. Например, портативные датчики ультразвука широко применяются для выявления коронного разряда и поверхностных ЧР на открытых токоведущих частях. Известно, что компания EA Technology разработала ручные детекторы типа UltraTEV, сочетающие ультразвуковой микрофон и датчик электромагнитных импульсов. В частности, прибор UltraTEV Plus² оснащен двумя сенсорами: ультразвуковой для фиксации поверхностных ЧР (в диапазоне выше слышимого звука) и емкостной датчик транзитных напряжений на корпусе (TEV) для регистрации внутренних ЧР [90].

Такое устройство позволяет сразу распознавать как поверхностные разряды, так и внутренние дефекты в выключателях и шкафах ГИРУ. Ультразвук применяется и для локализации источников разрядов. Например, массив из трех ультразвуковых датчиков, расположенных Г-образно, способен не только обнаруживать ЧР, но и определять направление на источник по разности времен прихода сигналов. В лабораторных испытаниях подобная установка показала точность локализации порядка 0,1–0,2 м при расстоянии между датчиками 0,2–0,3 м (при $F_s = 2\text{--}4 \text{ Мвыб/с}$ и $\text{SNR} > 12\text{--}15 \text{ дБ}$) [88]. В дальнейших упоминаниях принимаем базу массива $b = 0.2\text{--}0.3 \text{ м}$. Выбор частоты дискрети-

зации $F_s = 2$ Мвыб/с (опц. 4 Мвыб/с) обусловлен: во-первых, запасом по критерию Найквиста для полосы 100–300 кГц (минимум $\approx 0,6$ Мвыб/с), во-вторых требованием к разрешению ТОА: при $T_s = 0,5$ мкс шаг по времени соответствует $\Delta L \approx c \cdot T_s \approx 0,17$ мм (в воздухе, $c \approx 340$ м/с), что при корреляционно-полиномиальной интерполяции даёт погрешность разности ходов порядка 1–3 см и угловую погрешность $\sim 2\text{--}6^\circ$ для базы $b = 0,2\text{--}0,3$ м при $\text{SNR} > 12\text{--}15$ дБ, и в третьих, приемлемым потоком данных для многоканальной обработки на FPGA/NPU.

В конструкции предлагаемого интеллектуального прибора предполагается использование высокочувствительного акустического сенсора – либо контактного пьезодатчика, либо микрофона воздушного ультразвука, в зависимости от сценария. Кроме того, акустическая эмиссия (АЭ) – перспективный метод контроля механических дефектов: он улавливает упругие волны, возникающие при зарождении и росте трещин в материале. Метод АЭ давно применяется для мониторинга железобетона [91] – формирующиеся микротрещины издают импульсные сигналы, которые фиксируются датчиками.

В композитных опорах ЛЭП акустические датчики могут улавливать звук разрыва волокон или слоев. Кроме того, ультразвуковые измерения можно использовать для оценки упругости материала: скорость распространения ультразвуковой волны через толщу опоры позволит судить о степени расщепления или увлажнения. Таким образом, акустический канал интеллектуального прибора обеспечивает как раннее обнаружение ЧР в электрическом оборудовании, так и выявление трещин и иных структурных нарушений в опорах.

Для событий частичных разрядов прибор фиксирует как электромагнитный импульс (HFCT/TEV/UHF), так и акустическое событие АЭ в полосе 100–300 кГц. Совместная регистрация в одном временном окне и с единой фазовой привязкой 50 Гц обеспечивает консistentные метки для последующего слияния признаков и обучения моделей.

5.2.2. Диэлектрометрические методы и каналы регистрации ЧР и увлажнения

Диэлектрометрический контроль охватывает все методы, связанные с измерением электрических свойств изоляционных материалов и электромагнитных эмиссий от дефектов. В случае ГИРУ ключевую информацию дают

импульсные электрические сигналы от частичных разрядов. Разряд генерирует кратковременный высокочастотный ток и электромагнитное излучение. Для их регистрации используются: высокочастотные токовые трансформаторы (ВЧТТ) на заземлении, емкостные датчики (например, связь через слой изоляции), антенны УВЧ-диапазона, ТЕВ-датчики на корпусе и пр. Современные стационарные системы мониторинга ЧР обычно поддерживают подключение сразу нескольких типов датчиков. Так, система Rugged Monitoring СРМ601-С представляет собой универсальный двухдиапазонный регистратор ЧР (КВ и УКВ), который работает с акустическими/ультразвуковыми датчиками, ВЧТТ, ТЕВ, соединительными емкостями и УВЧ антеннами. Такое многообразие входных каналов позволяет охватить все виды частичных разрядов в разных устройствах – от ГИРУ и трансформаторов до кабельных линий [92].

В предлагаемом интеллектуальном приборе диэлектрометрический канал может быть представлен, к примеру, небольшим встроенным УВЧ-датчиком (для регистрации электромагнитных импульсов ЧР в ГИРУ) или емкостным сенсором, прикрепляемым к поверхности изоляции. Для контроля опор ЛЭП метод может принимать форму диэлектрометрии – измерения диэлектрической проницаемости или сопротивления бетона/композита. Известно, что диэлектрическая проницаемость бетона сильно зависит от влажности: наблюдается высокая корреляция между ϵ_r и содержанием влаги. Это можно использовать для косвенного определения влажности в защитном слое бетона, что важно для оценки риска коррозии арматуры [93].

Выходные данные каналов:

- РД-канал: 20-мс окна, синхронизированные по фазе сети ($0\text{--}360^\circ$), события «время-фаза-амплитуда-полярность» и PRPD-гистограммы фиксированного размера (напр., 72×128).
 - Акустические сигналы в диапазоне 100–300 кГц регистрируются с частотой дискретизации 2 Мвыб/с (дополнительно 4 Мвыб/с для повышенного разрешения ТОА). Перед АЦП применяется полосовой фильтр 100–300 кГц с антиалиас-характеристикой; разрядность АЦП не ниже 12 бит.
 - Диэлектрический канал: вектор признаков (ϵ_r , σ , производные индикаторы увлажнения/коррозионного риска) с периодичностью 0.1–1 Гц.

Все каналы используют общую таймбазу (PLL/PTP/GPS) для межмодальной синхронизации. Таким образом, контролируя диэлектрические параметры опоры (например, с помощью высокочастотного емкостного датчика или портативного прибора типа георадара), предлагаемый интеллектуальный

прибор может выявлять увлажнение и деградацию изоляционных свойств материала опоры.

5.2.3. Алгоритмы обработки на периферии (Edge AI): от PRPD к CNN

Сочетание разнородных датчиков требует интеллектуальной обработки для извлечения диагностической информации. В последние годы в электроэнергетике активно применяются методы машинного обучения для распознавания шаблонов частичных разрядов, а также для оценки состояния оборудования. Классические подходы основывались на методах поверхностного обучения и пороговом анализе, например, фазово-разрешенные диаграммы ЧР (PRPD) или статистические параметры импульсов [94]. Однако такие методы требовали участия экспертов и чувствительны к помехам. Глубокие нейронные сети (глубокое обучение) позволяют автоматизировать этот процесс. Особенно эффективно зарекомендовали себя сверточные нейросети (CNN) для анализа временных рядов: они способны самостоятельно идентифицировать характерные паттерны по сигналу разряда, выделяя скрытые закономерности [84]. Прямое применение глубокого обучения к задаче обнаружения ЧР уже демонстрирует отличные результаты. Например, в соревновании VSB Power Line Fault Detection (публичный набор сигналов токов, Технический университет Остравы) методы глубокого обучения показали высокую эффективность; в литературе сообщалось о результатах уровня $MCC \approx 0.63$ для детекции дефектов по временным рядам [94]. Хотя датасет VSB не специализирован под частичные разряды, он удобен как бенчмарк для задач выявления аномалий на ЛЭП. Другой пример – открытый набор PD-Loc на IEEE DataPort, содержащий разнообразные акустические сигналы (импульсы, шум, реально зарегистрированные ЧР), собранные с помощью прецизионной 32-канальной решетки микрофонов [95]. PD-Loc предназначен для отладки алгоритмов локации источников разрядов и служит источником данных для исследований по акустическому методам мониторинга. Наличие таких открытых данных значительно облегчает обучение нейросетей интеллектуального прибора для различных задач (классификация типа дефекта, фильтрация помех, определение местоположения дефекта и т.д.).

Перед классификацией выполняется адаптивное снижение размерности и нормализация признаков под материало- и объектозависимые условия: для PD – PRPD-гистограммы (например, $72 \times 128 \rightarrow 36 \times 64$, PCA); для АЭ – мел-

спектrogramмы ($128 \times 256 \rightarrow 64 \times 128$, логарифм амплитуды и дельта-признаки); для диэлектрических параметров — компактный вектор (ϵ_r, σ) размерностью 4–16 признаков. Параметры предобработки и пороговые уровни автоматически подстраиваются (self-tuning) на основе недавнего окна эксплуатационных данных. Формирование PRPD-гистограмм выполняется в пределах 20-мс временных интервалов, соответствующих одному периоду промышленной частоты 50 Гц; при работе с системами 60 Гц используется эквивалентное окно 16,67 мс либо фазовая нормализация диаграмм, обеспечивающая сопоставимость признаков.

Edge-архитектура прибора подразумевает, что тяжелые вычисления выполняются на месте, на самом устройстве, без необходимости постоянно передавать большой объем сырого сигнала в облако. Это предъявляет требования к эффективности алгоритмов — часто применяются компактные модели или специальные методы, как знание-дистилляция и квантование сетей. В литературе предлагаются гибридные схемы: например, в работе **[Ошибка! Источник ссылки не найден.6]** реализована облачно-периферийная система, где предварительная обработка и снижение размерности признаков выполняется на краю (edge), а обучение глубоких моделей происходит в облаке; затем обученная модель выгружается обратно на edge-устройства для работы в реальном времени **[Ошибка! Источник ссылки не найден.6]**.

Передача данных сопровождается снижением размерности признаков (PRPD-гистограммы, мел-спектры и др.), что уменьшает трафик и ускоряет обработку.

Обновления ИИ-моделей выполняются безопасно: прошивки и веса подписываются, поддерживается атомарный откат на стабильную версию при сбое проверки подписи.

Такой подход обеспечивает возможность регулярного обновления интеллектуальных функций прибора на основе поступающих эксплуатационных данных. В контексте интеллектуального прибора можно предусмотреть, что сеть из таких приборов будет собирать телеметрию с объектов, периодически отправлять обобщенную информацию в центр (облако) для дообучения моделей и получать обновленные веса нейросети. Но основная задача — моментальное выявление дефекта на месте — решается за счет локального ИИ. Например, сразу на устройстве может работать сверточная сеть, различающая характер акустического импульса (импульс АЭ от зарождения/роста трещины / фоновый шум) или классифицирующая форму ЧР-импульса в ВЧ-сигнале (разряд по поверхности vs. внутренний дефект и т.д.).

5.2.4. Байесовская интеграция акустических и электромагнитных признаков

Для принятия решения о состоянии объекта интеллектуальный прибор должен объединять результаты от акустических и диэлектрических сенсоров. Байесовские методы предоставляют формальный аппарат для слияния разнородной информации с учетом неопределенности. Каждое измерение (например, уровень акустической эмиссии, величина импульсного тока ЧР, диэлектрическая проницаемость материала) может рассматриваться как признак с определенной апостериорной вероятностью дефекта. Байесовская сеть или фильтр способны объединить эти признаки и вычислить интегральную оценку состояния – например, вероятность того, что изоляция повреждена. В инженерной диагностике подобные модели применяются для повышения достоверности: один датчик может давать ложное срабатывание, но совместная вероятность двух независимых признаков существенно снижает риск ошибки.

Так, апостериорная вероятность наличия дефекта D при совместном наблюдении акустического импульса X_A и электромагнитного всплеска X_E определяется по правилу Байеса:

$$P(D|X_A, X_E) = \frac{P(X_A|D)P(X_E|D)P(D)}{P(X_A, X_E)}.$$

Здесь предполагается условная независимость признаков X_A и X_E при фиксированном состоянии D . Это стандартное допущение байесовских моделей, упрощающее совместное вычисление апостериорной вероятности.

В нашем же случае комбинация акустического и электрического «зрения» позволяет более надежно выявлять дефекты. Например, частичный разряд проявляется как одновременный электромагнитный всплеск и акустический импульс; совместная регистрация обоих сигналов значительно повышает апостериорную вероятность дефекта; согласованные срабатывания двух независимых каналов заметно снижают риск ошибки по сравнению с одиночным каналом, тогда как каждый по отдельности мог быть вызван помехой (электромагнитной или акустической). Аналогично для опоры ЛЭП: резкий скачок акустической эмиссии, сопровождающийся изменением диэлектрического отклика материала, укажет на трещину, в которую проникла влага. Тем самым объединение данных с разных сенсоров, поддерживаемое ИИ, повышает чувствительность и специфичность диагностики. Данные литературы подтверждают эффективность таких подходов – например, совмещение ультразвуко-

вого метода с оптическим (камера) уже применялось для идентификации конкретного дефектного изолятора после акустической локализации ЧР [88]. В интеллектуальном приборе заложена возможность расширения: помимо двух основных каналов (акустика и диэлектрика), могут интегрироваться и другие – например, датчики температуры, влажности, вибрации – а edge-алгоритмы ИИ будут проводить многофакторный анализ.

В случае статистически зависимых признаков (например, коррелированных акустических и электромагнитных каналов) апостериорные оценки могут быть скорректированы методами калибровки вероятностей – Platt scaling или изотонной регрессией, что обеспечивает адекватную интерпретацию вероятности дефекта при частичных корреляциях.

Рассмотренные методы уже опробованы на практике и в исследованиях. Открытые наборы данных позволили исследователям обучить и проверить ИИ-алгоритмы диагностики. Так, на датасете VSB (задача детекции неисправностей на ВЛ) свёрточные сети достигли высокого показателя достоверности $\text{MCC} \approx 0.63$, уверенно различая сигналы поврежденной изоляции [97]. Для сравнения моделей использован показатель Мэттьюса (MCC):

$$\text{MCC} = \frac{TP \cdot TN - FP \cdot FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}},$$

где TP , TN , FP , FN — истинно-положительные, истинно-отрицательные, ложноположительные и ложноотрицательные решения соответственно. При этом слияние модальностей асинхронное: РД/АЭ обрабатываются в 20-мс слотах (50 Гц), а диэлектрический канал обновляется с частотой 0.1–1 Гц; для согласования временных шкал используется sample-and-hold с окном ± 1 с.

Набор PD-Loc стал базой для разработки методов акустической локации ЧР по сигналам с 32-канального массива микрофонов [95]. Его появление значительно продвинуло вперед исследование алгоритмов 3D-пеленгации дефектов по звуку. Помимо академических данных, ценные результаты дают и полевые испытания. К примеру, в эксперименте литовских инженеров ультразвуковая установка успешно зафиксировала ЧР на расстоянии до 30 м в открытом распределительстве и правильно определила дефектный ввод трансформатора, используя комбинированную обработку сигналов и классификатор SVM [88]. Эти результаты подтверждают работоспособность акустических методов в реальных условиях подстанций.

5.3. Обзор коммерческих и исследовательских решений

На рынке уже присутствует оборудование, показанное в табл. 5.1, частично реализующее описанные подходы.

Таблица 5.1. Сравнение коммерческих систем мониторинга ЧР и предлагаемого акусто-диэлектрометрического комплекса

Система	Форм-фактор / установка	Измерительные каналы (✓ — встроено; ● — опция)	Edge-аналитика / ИИ	Диапазон применимости	IP-класс	Ключевые возможности	Основные ограничения	Источник / data
EA UltraTEV Plus ²	Ручной портативный прибор (обходной контроль)	УЗ-микрофон ✓; TEV-датчик ✓	Пороговая индикация; нейросетевой классификации не заявлено	KРУ/ГИР У 6–36 кВ	IP54	Быстрый скрининг ЧР; индикация уровня активности (зел./жёлт./красн.)	Нет стационарного мониторинга; не оценивает механические дефекты опор	EA Tech-nology, сайт изделия (2024)
Rugged Monitoring CPM601-C	Стационарный модуль (до 8 каналов)	HFCT ✓; UHF-антенна ●; АЭдатчик ●; TEV ●	Правила/спекtrаль-ные пороги; нейросетевой классификации не заявлено	Трансформаторы, GIS, кабели 6–400 кВ	IP65	Круглосуточный тренд ЧР; интеграция IEC 61850, MQTT	Нет дигитро-метрии; нет автомат-классификации типов дефектов	Rugged Monitoring, даташит (2024)
OMI-CRON PARADIMO 100	Стационарный UHF-блок для GIS/GIL	UHF-антенны ✓ (\approx 1–2 ГГц)	Встроенная автоклассификация PD-	GIS/GIL \geq 72 кВ	IP66	Автоматическое детектирование и	Фокус на элек-трических	OMI-CRO N Energy, сайт

			паттернов (edge-анализ)			классификация; веб-GUI; оптоволоконная сеть узлов	дефектах; акустика не интегрирована	изделия (2025)
Предлагаемый комплекс	Портативный и стационарный режимы	УЗ/АЭ ✓; UHF ✓; HFCT ✓; диэлектрометрия (ϵ, σ) ✓	NPU 0.5 TOPS, CNN-классификация; байесовское слияние модальностей (edge-инфэрэнс)	ГИРУ 6–36 кВ + опоры ЛЭП	IP65 (портативн.) / IP67 (стаци.)	Одновременный контроль ЧР и структурных дефектов; автономный анализ; Wi-Fi 6, LTE-M (Cat-M1), IEC 61850/OP C UA	Прототип; требуется калибровка под материалы и условия; валидация по IEC 60270/ 62478	Настоящая работа (2025)

Компания EA Technology (Великобритания) предлагает портативные приборы серии UltraTEV для экспресс-обследования распределительного устройства. UltraTEV Plus², например, способен одновременно измерять уровень ультразвука и импульсы TEV, выдавая оператору индикацию степени ЧР-активности. Он помогает эксплуатационному персоналу быстро выявить ячейки ГИРУ с подозрением на частичные разряды (зелёный/жёлтый/красный индикатор по уровню PD, а также на слух различить характерный треск разряда в ультразвуковом диапазоне [90]. Однако такие приборы предназначены для периодического ручного контроля и зависят от квалификации оператора. Для непрерывного мониторинга существуют стационарные системы.

Rugged Monitoring (Канада) выпускает систему СPM601, способную круглосуточно снимать и анализировать ЧР-сигналы от нескольких датчиков (до 8 каналов) в высокочастотном и ультра-высокочастотном диапазонах [92]. Это промышленное устройство, рассчитанное на установку непосредственно на объекте (степень защиты IP65) и интеграцию в АСУТП предприятия по стандартным протоколам (Modbus, MQTT, IEC 61850 и др.). В СPM601 заложены алгоритмы фильтрации помех и накопления статистики, однако о применении нейросетей не заявлено – пороговая обработка и передача данных на верхний уровень.

Компания OMICRON (Австрия) предложила новейшую систему PARADIMO 100, ориентированную на мониторинг ГИРУ и газовых шин (GIL). Особенность PARADIMO – встроенный модуль edge-вычислений и интеллектуального анализа: прибор автоматически детектирует и классифицирует тип дефекта изоляции и формирует тревожные оповещения для службы эксплуатации [98]. Фактически, PARADIMO 100 является примером специализированного edge-ИИ устройства для ЧР-мониторинга ГИРУ. Он подключается к предустановленным УВЧ-антеннаам в корпусе ГИРУ, охватывая широкий диапазон частот для уверенного обнаружения сигналов ЧР даже на фоне помех [99]. Несколько таких узлов могут объединяться по оптоволоконной сети, покрывая всю подстанцию и передавая данные на центральный сервер с веб-интерфейсом [98]. Таким образом, возможности PARADIMO во многом предвосхищают функции интеллектуального прибора в части диагностики ЧР в элегазовом оборудовании.

Однако ни одно из перечисленных решений не нацелено на одновременный контроль электрических и механических параметров. Системы типа PARADIMO и СРМ601 концентрируются исключительно на частичных разрядах и состоянии электрической изоляции. Контроль же состояния опор ЛЭП (механической прочности) обычно осуществляется другими средствами – например, периодическим инструментальным контролем прочности бетона, измерением вибраций опоры при ветровой нагрузке или визуальным осмотром. В этом смысле концепт интеллектуального прибора является уникальным интегрированным подходом: один прибор, оснащенный мультимодальными сенсорами и AI-аналитикой, способен обслуживать две задачи одновременно – мониторинг электроизоляции и диагностику конструкции.

5.4. Возможности интеллектуального прибора

5.4.1. Функциональная структура системы

Разработана структурная схема предложенного интеллектуального прибора, которая представлена на рис. 5.1.

В данной схеме выделены восемь взаимосвязанных подсистем:

1. Акустический модуль – принимает импульсы акустической эмиссии или посылает/принимает ультразвуковые сигналы. Состоит из пьезодатчика (либо УЗ-передатчика-приемника), предусилителя на 40 дБ и быстрого коммутатора режима прием/передача.

2. Диэлектрометрический модуль – регистрирует электромагнитные всплески частичных разрядов и измеряет диэлектрические параметры материала. Включает HFCT-вход, малошумящую UHF-антенну либо контактный ε -электрод, а также полосовой фильтр с усилителем.

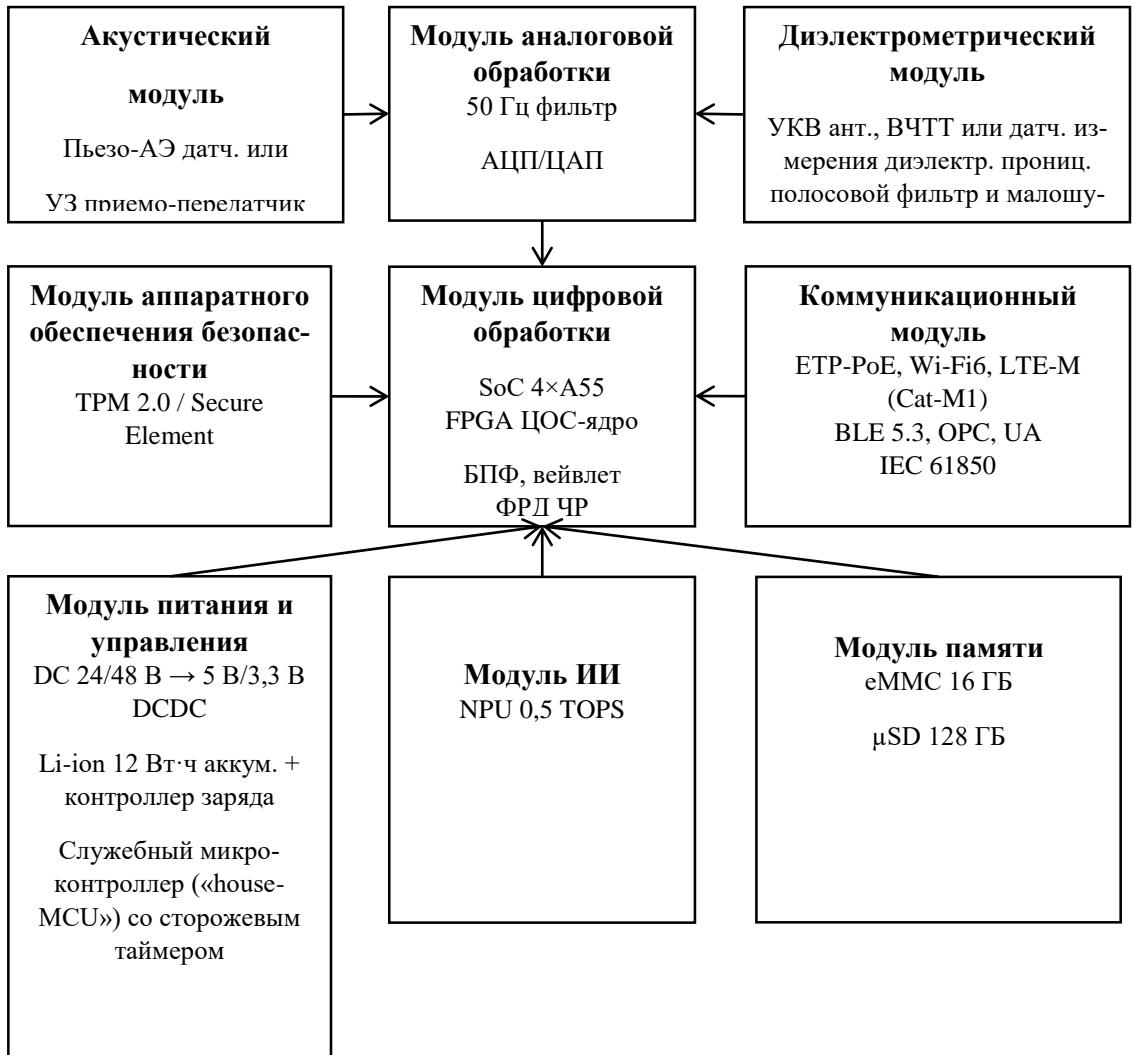


Рис. 5.1. Структурная схема интеллектуального комплекса на базе периферийного ИИ

3. Комбинированная сенсорная головка – сменная сборка с ко-локацией TEV/HFCT/UHF-датчиков и контактного АЭ-датчика (или воздушного УЗ-микрофона) для одновременного PD/АЭ-контроля; дополнительно – ε -электрод. Обеспечивает механическую/электрическую совместимость крепления для ГИРУ/КРУ и опор ЛЭП.

4. Модуль аналоговой обработки – универсальный фронт-энд: мультиплексирует датчики, отфильтровывает помехи, формирует синхронные триггеры; оцифровка выполняется парой независимых АЦП.

5. Модуль цифровой обработки – ядро вычислений: четырехъядерный SoC Cortex-A55 и FPGA-блок, который аппаратно рассчитывает БПФ/вейвлет-преобразования и формирует фазово-разрешенные диаграммы ЧР.

6. Модуль ИИ – встроенный нейропроцессор производительностью 0.5 TOPS, реализующий сверточные сети и байесовское слияние данных в реальном времени.

7. Модуль памяти – eMMC 16 ГБ и съемная µSD до 128 ГБ для круглосуточного буфера «сырых» сигналов и хранения моделей.

8. Модуль безопасности – TPM 2.0 / Secure Element, отвечающий за защищенную загрузку и аппаратное шифрование трафика.

9. Модуль питания и управления – промышленный DC/DC 24/48 В → 5 В/3,3 В, резервный Li-ion аккумулятор 12 Вт·ч с MPPT-зарядкой и служебный микроконтроллер-диспетчер со сторожевым таймером.

10. Сетевая архитектура модуля поддерживает Wi-Fi 6, LTE-M и промышленные протоколы OPC UA и IEC 61850, обеспечивая интеграцию с системами верхнего уровня (SCADA / EMS). Для защиты каналов связи и данных будет применён минимальный криптографический профиль, включающий:

- TLS 1.3 с взаимной аутентификацией (mTLS) и аппаратным хранением сертификатов в TPM 2.0 / Secure Element;
- поддержку политик безопасности OPC UA SecurityPolicy Aes256-Sha256-RsaPss (основная) и Basic256Sha256 (совместимость), с контролем сессий и привязкой к ролям пользователей (role-based access control);
- реализацию требований IEC 62351 для защиты сообщений и управления ключами в протоколах семейства IEC 61850;
- подписанные и защищённые обновления прошивки с двойным образом (A/B update scheme) и проверкой целостности по криптографическому хэшу;
- формирование и сопровождение SBOM (Software Bill of Materials) в соответствии с рекомендациями ISA/IEC 62443-4-1.

Такое портативное, но функционально насыщенное устройство обеспечивает полный цикл «датчик → фильтрация → ИИ-анализ → передача результата», позволяя проводить комплексный неразрушающий контроль на месте установки оборудования без внешних вычислительных ресурсов.

Конструкция предусматривает портативный форм-фактор с быстрой перестановкой комбинированной сенсорной головки и стационарные узлы для непрерывного мониторинга.

5.4.2. Режимы применения: портативный и стационарный

В полевых условиях интеллектуальный прибор может применяться двумя способами: передвижной контроль и стационарный мониторинг. В первом случае прибор используется инспектором: например, при обходе оборудования инженер прикрепляет магнитно/клеевым креплением прибор к корпусу оборудования или к опоре ЛЭП, после чего запускает режим сканирования. Прибор возбуждает ультразвуковую волну и замеряет отклик материала, прослушивает акустическую эмиссию за определенный интервал, одновременно измеряет уровни ЧР в электросигналах.

По завершении цикла в течение нескольких минут прямо на месте выдаются диагностические показатели: степень ЧР-активности, наличие аномальных акустических событий (например, «обнаружены акустические признаки трещинообразования; рекомендована дополнительная проверка опоры»), оценка влажности бетона и т.п.

В стационарном варианте несколько приборов могут быть установлены постоянно – например, один на каждую опору секции ЛЭП или на каждый отсек распределительного устройства. Тогда интеллектуальный прибор выступает как узел системы предиктивной диагностики: непрерывно отслеживает состояние и в случае превышения порогов (или обнаружения характерного паттерна, распознанного ИИ) отправляет тревогу на пульт эксплуатационников.

5.4.3. Реалтайм-обработка сигналов и инференс на устройстве

Архитектурно интеллектуальный прибор мог бы использовать обработку сигналов в реальном времени: аналоговые сигналы с датчиков оцифровываются АЦП высокой частоты: для каналов частичных разрядов используется событийная регистрация с пред-/пост-триггерными окнами при 100 Мвыб/с (типично 1–5 мкс до и 5–20 мкс после события); для ультразвуковых и акусто-эмиссионных каналов — частота дискретизации 2 Мвыб/с (дополнительно 4 Мвыб/с) и полосовой фильтр 100–300 кГц перед АЦП, затем предобрабатываются (фильтрация, усиление, декомпозиция).

Для РД-канала формируются события (время-фаза-амплитуда, полярность) и РРД; для АЭ – энергия/длительность импульса, частота повторения и мел-спектограммы коротких окон; для диэлектрики – вектор ϵ_r , σ и сводные индикаторы увлажнения. Эти представления подаются в ветви модели и в слой байесовского слияния. Выделенные признаки (спектры, огибающие, фазовые

распределения разрядов и др.) подаются на вход встроенной нейросети, которая выдает классификацию или регрессионную оценку состояния. Например, сеть может классифицировать тип ЧР (поверхностный, внутренний, корона) по форме импульса – аналогично тому, как PARADIMO отличает дефекты в GIS [99, 100]. Другая модель может оценивать степень поврежденности бетона по сочетанию признаков (уровень АЭ, диэлектрическая проницаемость) – фактически предсказывать остаточный ресурс или необходимость ремонта. Все эти вычисления выполняются автономно на процессоре устройства, что соответствует концепции Edge AI – интеллектуализации приборов на местах обслуживания.

Следует отметить, что на рынке уже появляются решения с частичным перекрытием функционала предлагаемого интеллектуального прибора. Например, компания EA, помимо поиска ЧР, развивает технологию мониторинга состояния деревянных опор (UltraTEV WoodPole Inspect) на основе акустического отклика при ударе. Хотя материалы и дефекты иные, принцип – анализ отклика опоры через встроенный алгоритм – схож с частью задач предлагаемого интеллектуального прибора. Тем не менее комбинирование в одном приборе контроля высоковольтной изоляции и механической прочности опор является новым шагом. Главным преимуществом такого объединения станет комплексная оценка состояния узлов энергосистемы. Например, при диагностике разъединителя 35 кВ, смонтированного на опоре, интеллектуальный прибор сможет одновременно указать состояние его элегазовой изоляции (есть ли ЧР в приводе, утечка газа) и состояния опоры (нет ли трещин в зоне крепления). Это особенно ценно, учитывая, что повреждения разных подсистем часто взаимосвязаны (разряд мог закоптить изолятор и ослабить диэлектрическую прочность; механическое повреждение опоры могло привести к перекосу оборудования и повышенной напряженности поля и т.п.).

5.5. Методы сбора, разметки и предварительной обработки данных

Для реализации такой комплексной диагностики необходимо не только техническое оснащение прибора соответствующими сенсорами, но и разработка алгоритмов анализа, способных с высокой достоверностью интерпретировать полученные сигналы. В этом контексте особую роль играет обучение нейросетевых моделей на репрезентативных наборах данных, охватывающих как электрические, так и механические аномалии.

Ниже приводится описание использованных датасетов, методов предварительной обработки и особенностей архитектуры модели, обеспечивающей интеллектуальные функции предлагаемого прибора. Для обучения и оценки модели были использованы открытые наборы данных по ЧР и дефектам ЛЭП. Каждая ветвь модели обучается на представлениях, идентичных тем, что формирует прибор: PD-ветвь — на 20-мс окнах и PRPD, АЕ-ветвь — на мел-спектрограммах АЭ/УЗ (2–4 Мвыб/с, 100–300 кГц), диэлектрическая — на векторе признаков (ε_r , σ).

Используются три семейства данных, соответствующие каналам прибора: PD (20-мс окна + PRPD), АЭ/УЗ (2–4 Мвыб/с + мел-спектры), диэлектрика (вектор ε_r , σ). Внешний «антенный» датасет 20-мс окон используется для обучения PD-ветви; его представления приводятся к формату прибора (фаза 0–360°, PRPD одинаковой размерности). АЭ и диэлектрический каналы обучаются на полевых/лабораторных записях прибора; при дефиците данных применяются аугментации.

Использован внутренний (in-house) антенный набор 20-мс окон, собранный на средневольтных ВЛ с изолированными (XLPE) проводниками. Каждый образец представляет собой фрагмент сигнала длительностью 20 мс (один период промышленной частоты), зафиксированный бесконтактным способом. Структура данных и предобработка эквивалентны публичным корпусам (нормализация, синхронизация по фазе, построение PRPD). При наличии ссылок на публичный набор будет добавлен DOI.

Примеры реальных 20-мс сигналов, зарегистрированных в ходе экспериментов, показаны на рис. 5.2.

а) Электромагнитный сигнал фонового характера, снятый бесконтактной антенной на линии с изолированными проводниками (без признаков частичных разрядов); форма колебаний плавная, наблюдается лишь шумовая модуляция сетевого происхождения.

б) Электромагнитный сигнал с импульсными проявлениями частичных разрядов — на фоне шумов фиксируются кратковременные импульсы отрицательной полярности, указывающие на локальные пробои изоляции.

в) Акустический сигнал, зарегистрированный пьезодатчиком на поверхности полимерного образца (LDPE/PP) без признаков ЧР — низкая амплитуда, отсутствие импульсных компонент.

г) Акустический относительный сигнал, зарегистрированный пьезодатчиком на поверхности полимерного образца (LDPE/PP) без признаков частичных разрядов — низкая амплитуда, отсутствие импульсных компонент.

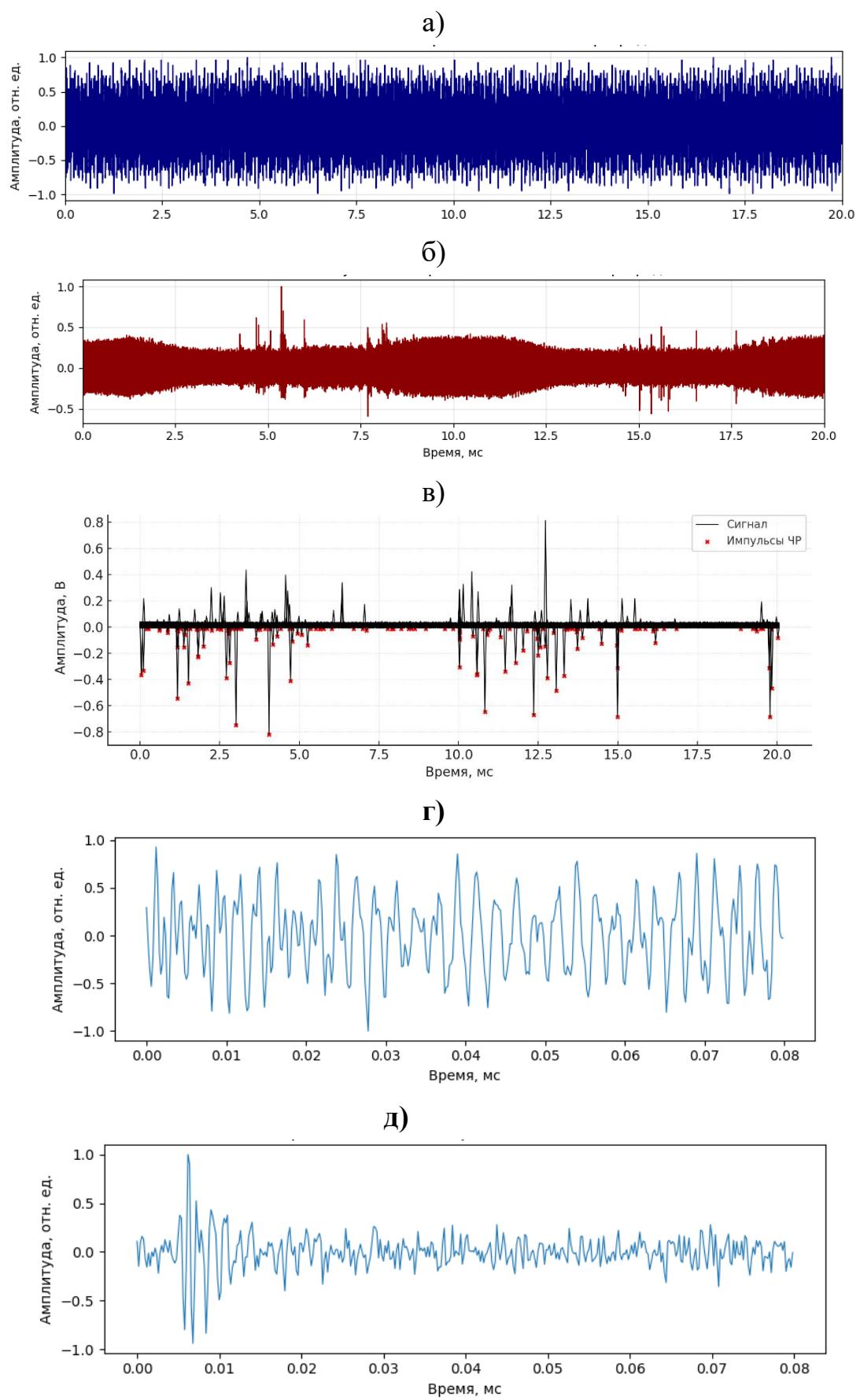


Рис. 5.2. Примеры реальных 20-мс сигналов

д) Акустический сигнал с выраженным колебательными импульсами, соответствующими акустическим проявлениям частичных разрядов в изоляционном материале.

Одновременно на тех же участках ЛЭП работали контактные датчики, позволившие надёжно разметить данные на события ЧР и отсутствие разрядов. Эта вручную проверенная разметка обеспечивает достоверную ground truth для обучения с учителем. Предобработка сигналов включала полосовую фильтрацию (для удаления постоянной составляющей 50 Гц и помех вне диапазона ЧР), нормализацию амплитуды и разбиение длительных записей на отдельные окна по 20 мс, синхронизованные с фазой сети. Для каждого окна дополнительно вычислялись признаки во временно-частотной области — спектрограммы и фазово-разрешённые диаграммы разрядов (PRPD), которые использовались как второе представление данных для нейросетевой модели. Таким образом, на выходе этапа предобработки формировались два взаимодополняющих представления информации: временной ряд, описывающий динамику частичных разрядов, и визуализированные структуры их распределения по частоте и фазе. Кроме реальных данных, применены аугментации. РД: инъекция импульсов, фазовый jitter, синтетические PRPD для редких паттернов. АЭ: импульсные синтезы, time/freq-mask в мел-спектрах, моделирование дождя/ветра. Диэлектрика: стохастика ϵ_r , σ в поверочных допусках, сценарии увлажнения. Визуальный канал (при наличии изображений): геометрические и фотометрические аугментации, миксап дефектных паттернов.

Для комплексного анализа всех этих данных и объединения разнородных признаков была спроектирована специализированная нейросетевая архитектура, обеспечивающая совместную обработку сигналов и изображений.

5.6. Архитектура мультимодели для интеграции акустических и электромагнитных признаков

В разработанном модуле реализована облегчённая сверточно-рекуррентная модель (ResNet-18 / Bi-LSTM с механизмом перекрёстного внимания), адаптированная для выполнения инференса на встроенному нейропроцессоре (NPU) производительностью 0.5 TOPS. Для обеспечения обработки сигналов в реальном времени используется событийная регистрация РД/UHF и частота дискретизации 2–4 Мвыб/с для АЭ/УЗ; применены int8-квантование, фрейм-агрегация, предварительное сжатие признаков и фильтрация на уровне FPGA. Используется облегчённый вариант ResNet-18-tiny с сокращённым числом каналов и свёрточных блоков, а стохастическая регуляризация MC-Dropout на этапе вывода может быть отключена для снижения вычислительной задержки.

Мультимодальная нейросетевая архитектура для обнаружения частичных разрядов показана на рис. 5.3.

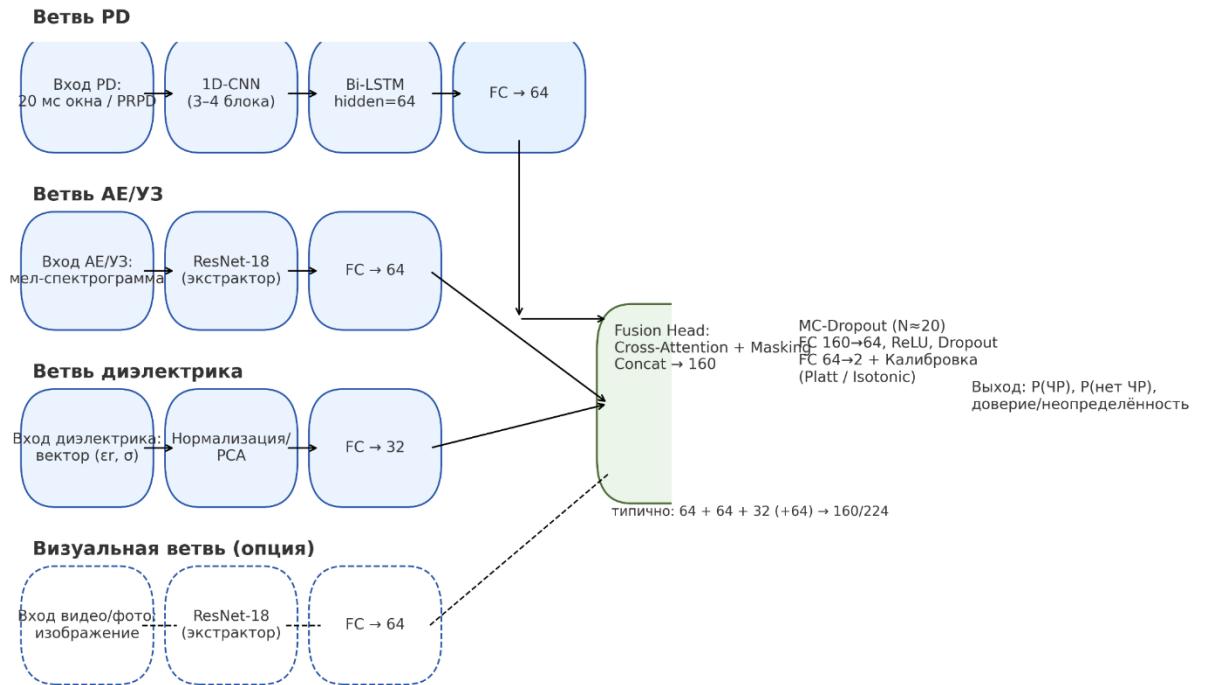


Рис. 5.3. Мультимодальная нейросетевая архитектура для обнаружения частичных разрядов

Типичные размеры входных данных: PRPD — 36×64 (int8), мел-спектrogramмы АЭ — 64×128 (int8), диэлектрический вектор — 8–12 признаков (fp16); отсутствующие модальности маскируются. MC-Dropout используется в режиме оценки неопределенности и отключается в штатном режиме инференса. Размер PRPD 36×64 (int8) получается из 72×128 путем понижения размерности (даунсэмплинг/PCA). Такой подход позволяет количественно учитывать доверие модели к своим предсказаниям без явного построения байесовской вероятностной модели.

На этапе слияния предусмотрен специальный механизм внимания. В частности, реализован модуль cross-attention, который получает на вход признаки от обеих ветвей и вычисляет весовые коэффициенты значимости для каждого признакового канала, учитывая взаимосвязь между модальностями. Такое адаптивное слияние позволяет усилить влияние информативных признаков одной модальности, если другая модальность подтверждает наличие аномалии. Например, если в сигнале обнаружен всплеск ЧР, а на соответствующем временном интервале на изображении опоры виден контакт ветви с проводом, механизм внимания усилит эти коррелированные признаки. Техноло-

тически cross-attention реализован через многоголовочный механизм внимания, аналогичный используемому в трансформерах, что обеспечивает модель гибкой способностью учиться взаимным соответствиям между разными типами данных. После объединения признаков следует полно связанный классификатор, выдающий решение о состоянии линии. Для повышения надежности диагностики в модель интегрирован байесовский блок на этапе выхода. Мы применяем вариационный вывод посредством метода Монте-Карло дропаута: при каждом прогоне на этапе инференса некоторые нейроны случайно отключаются, и финальное решение усредняется по ансамблю прогонов. Это позволяет получать не только прогноз класса, но и оценку неопределенности (разброс вероятностей). Благодаря этому оператор может идентифицировать случаи, когда модель не уверена (например, на границе классов или при атипичных данных) и при необходимости направить такой образец на дополнительную проверку.

Байесовский подход обеспечивает более интерпретируемый вывод, что важно для критически важных систем энергосетей. Итого, предлагаемая архитектура сочетает:

- 1) специализированные подсети для разнородных данных (сигналы и изображения);
- 2) внимание для их интеллектуальной фузии;
- 3) вероятностный оцениватель (Bayesian inference via MC-dropout) для учета неопределенности.

Такой комплексный подход ранее не применялся к задаче мониторинга ЛЭП, что подтверждает научную новизну решения.

На рис. 5.4 представлены кривые обучения модели 1D-CNN→Bi-LSTM \oplus ResNet- на данных внутреннего антенного корпуса (in-house Antenna-PD, 20-мс фрагменты) с добавлением синтетических примеров. На первых эпохах наблюдается согласованное снижение потерь и рост точности на обеих выборках. Максимальная валидационная точность достигается на эпохе 5 (Val Acc \approx 0,912), после чего при продолжении обучения валид. потери слегка возрастают, а точность колеблется в пределах 0.886–0,912, что указывает на появление лёгкого переобучения. Это соответствует режиму, в котором целесообразно применять раннюю остановку по метрике валидации или снижение шага обучения после плато. В практическом применении для повышения устойчивости рекомендуется калибровка порога решения по F1/MCC на валидации и оценка переносимости по схеме leave-one-station-out.

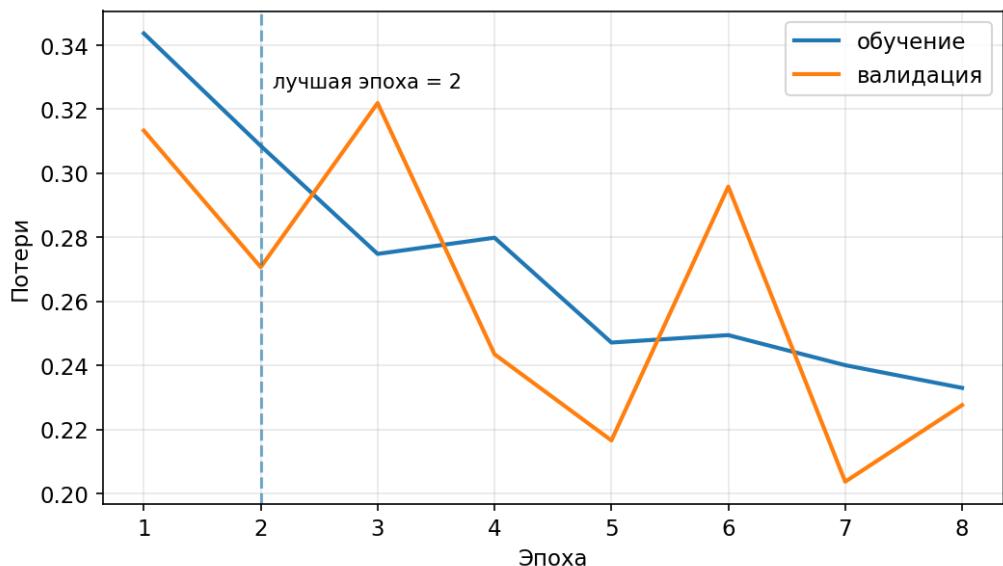


Рис. 5.4. Кривые обучения мультимодальной модели

После обучения мультимодальной модели были рассчитаны интегральные метрики на валидационной выборке. Достигнутые результаты показывают стабильное качество распознавания частичных разрядов и хорошую обобщающую способность модели: ROC-AUC = 0.93, PR-AUC = 0.92, Precision = 0.934, Recall = 0.925, F1-мера = 0.929, Accuracy = 0.925. Матрица ошибок демонстрирует, что большинство положительных примеров ЧР корректно классифицированы ($TP = 99$), тогда как доля ложных срабатываний и пропусков ($FP + FN \approx 7.5\%$) остаётся на умеренном уровне. Это подтверждает, что архитектура 1D-CNN → Bi-LSTM \oplus ResNet-18 обеспечивает надёжное обнаружение импульсов ЧР при анализе коротких 20-мс окон сигналов и обеспечивает возможность встроенного мониторинга высоковольтного оборудования в режиме реального времени.

Таблица 5.2. Качество классификации на валидационной выборке

Метрика	Обозначение	Значение
Точность положит. (Precision)	P	0.934
Полнота (Recall)	R	0.925
F1-мера	F1	0.929
Точность классификации	Acc	0.925

Матрица ошибок	—	TN=86, FP=7, FN=8, TP=99
Доля ошибок	(FP+FN)/N	7.5%

Наиболее частые ошибки связаны с слабовыраженными импульсами и переходными процессами, близкими по форме к шумовым выбросам. Совокупность метрик демонстрирует, что предложенная архитектура ($1D\text{-CNN} \rightarrow Bi\text{-LSTM} \oplus ResNet\text{-18}$) обеспечивает уверенное обнаружение частичных разрядов при работе с короткими временными фрагментами и может быть использована для встроенного мониторинга высоковольтного оборудования.

5.7. Интеграция интеллектуального комплекса в инфраструктуру энергетических сетей

Применение edge-ИИ-приборов, подобных предлагаемому, в энергетической инфраструктуре открывает новые возможности для предиктивного обслуживания. По сравнению с существующими подходами, комплексный интеллектуальный прибор предлагает инженерам простое в использовании решение «двух в одном», снижающее потребность в нескольких разных приборах и экспертной расшифровке данных. Внедрение такой системы может происходить поэтапно.

На первом этапе – опытная эксплуатация: несколько устройств устанавливаются на пилотных объектах (например, на самой загруженной 35-кВ подстанции и на участке ЛЭП с имеющейся историей дефектов). С помощью открытых и накопленных данных обучаются модели обнаружения дефектов, настроены пороги чувствительности под реальные условия (электромагнитные помехи в РУ, фоновые шумы на ЛЭП – ветер, дождь и пр.).

Далее интеллектуальный прибор интегрируется в существующие системы техобслуживания: данные от него могут передаваться в SCADA или специализированный программный комплекс. В случае тревоги диспетчер получит уведомление с рекомендациями.

Верификация измерительных каналов будет выполняться в соответствии с действующими международными стандартами, регламентирующими методы регистрации частичных разрядов и акустических сигналов:

- IEC 60270:2015 — High-voltage test techniques. Partial discharge measurements, определяющий процедуры и требования к измерению электрических частичных разрядов в высоковольтных изоляционных системах;

— IEC 62478:2016 — High-voltage test techniques. Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods, устанавливающий принципы применения электромагнитных и акустических методов для неразрушающего контроля ЧР.

Для акустических испытаний конструкционных материалов будут учитываться профильные документы по акустической эмиссии (ISO/ASTM, JAE-рекомендации) с учётом применимости к конкретному материалу (металлы, бетон, композиты).

Важно подчеркнуть, что периферийный ИИ означает автономность и скорость. Даже при сбоях связи или отсутствии высокоскоростного канала прибор на месте способен сам принять решение и сигнализировать локально (световая сигнализация, звуковой сигнал или передача по резервному каналу SMS). Это особенно ценно для удаленных ЛЭП: опоры, оборудованные интеллектуальным прибором, могли бы по радиоканалу отправлять сигналы непосредственно ремонтной бригаде при обнаружении сильной трещины (например, после урагана).

Серверное ПО обеспечивает агрегацию данных, тренд-анализ, прогноз остаточного ресурса и формирование рекомендаций по ТОиР; edge-узлы получают подписанные обновления моделей с возможностью безопасного отката.

5.8. Научно-практическая интерпретация результатов

Естественно, описываемая система имеет свои технические вызовы. Комбинированный прибор должен быть очень помехоустойчивым: электроразряды генерируют широкий спектр частот, а ультразвук может ложноположительно срабатывать на внешние факторы (дождь, вибрация от транспорта). Для решения этой задачи применяются методы фильтрации и алгоритмы машинного обучения, обученные различать помехи и информативные сигналы [94]. Кроме того, устройство должно отвечать высоким требованиям по климатическому и механическому исполнению (для наружной установки на опорах – широкий диапазон температур, защита от влаги IP65+, виброустойчивость).

Питание может быть реализовано от литиевых аккумуляторов с солнечной подзарядкой в случае автономных узлов на ЛЭП. Еще одна задача – калибровка. Акустический контакт с разными материалами (сталь корпуса, ком-

позит, бетон) требует адаптивных настроек или разных видов датчиков. Возможно, интеллектуальный прибор будет иметь сменные насадки/датчики для различных поверхностей либо автоматическую подстройку усиления под коэффициент отражения сигнала.

В плане алгоритмов дальнейшее развитие видится в расширении библиотек обнаруживаемых дефектов. Обучение на большем количестве эталонных данных (например, добавление данных из Scientific Reports исследований, где опубликованы формы сигналов различных дефектов) повысит надежность классификации. Интеграция байесовского слияния позволит выдавать обобщенный индекс состояния, понятный конечному пользователю – например, процент от износа или риск отказа в баллах. Такой интегральный подход облегчит принятие решений о ремонте.

5.9. Выводы

Проведённый обзор и разработка концепции показывают, что интеграция различных электромагнитных и диэлектрических методов контроля, дополненная алгоритмами искусственного интеллекта, открывает новые возможности для неразрушающего мониторинга состояния электроэнергетических объектов. Современные мультиodalные системы, поддерживающие анализ сигналов непосредственно на уровне устройства (Edge AI), позволяют выявлять не только частичные разряды и деградацию изоляции, но и механические дефекты – трещины, расслоения, увлажнение и другие признаки старения конструкционных материалов.

Разработанный концепт интеллектуального прибора представляет собой унифицированный подход к диагностике электрических и механических подсистем энергосетевой инфраструктуры. Комбинирование различных физических каналов (акустических, электромагнитных, диэлектрических) обеспечивает повышение достоверности диагностики, а использование встроенного ИИ позволяет выполнять реалтайм-анализ и классификацию дефектов непосредственно на месте эксплуатации без обращения к облачным сервисам. Байесовское объединение данных с разных сенсоров повышает точность решений и устойчивость к шумам и помехам, что особенно важно для условий подстанций и линий электропередачи.

Основные преимущества предложенного подхода — комплексность, автономность и оперативность. Интеллектуальные edge-устройства позволяют перейти от периодических проверок и реактивного ремонта к предиктивному

обслуживанию, снижая риск аварий, сокращая затраты и повышая надёжность энергоснабжения. Внедрение таких систем также способствует экологической устойчивости, позволяя предотвратить утечки изоляционных газов (SF_6) и разрушение опор вследствие деградации материалов.

Таким образом, мультимодальный неразрушающий мониторинг с периферийным искусственным интеллектом следует рассматривать как перспективное направление развития цифровых технологий в электроэнергетике. Дальнейшие исследования будут направлены на расширение библиотек данных, совершенствование моделей слияния признаков и верификацию прототипов на реальных объектах. Ожидается, что подобные интеллектуальные приборы станут ключевым элементом цифровой инфраструктуры энергосистем, обеспечивая их долговечность, безопасность и устойчивость к внешним воздействиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2025 году, согласно утвержденного Календарного плана, проводились работы по **трем основным научным направлениям**:

1. Разработка и научное обоснование новых способов контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока в рабочем режиме без отключения их от питания.
2. Разработка вибродатчика для контроля и диагностики опор ЛЭП и системы мониторинга состояния конструктивных элементов ЛЭП.
3. Разработка системы комплексного интеллектуального мониторинга электроэнергетических объектов на основе мультиомодальных сигналов и технологий периферийного искусственного интеллекта.

По первому направлению выполнены следующие работы:

1. Рассмотрены причины нагрева обмоток электрооборудования и влияние нагрева на его работоспособность, а также проанализированы основные методы контроля температуры.
2. Разработан новый способ контроля нагрева обмотки электрических машин переменного тока в рабочем режиме без отключения их от питания. Выполнено его теоретическое обоснование.
3. Разработан и запатентован модернизированный способ контроля нагрева обмотки, обеспечивающий минимальное воздействие на режим работы контролируемого оборудования.
4. Разработана автоматизированная система управления с использованием разработанного способа тепловой защиты с управлением посредством микроконтроллера.

По второму направлению выполнены следующие работы:

5. Проведен анализ систем неразрушающего контроля эксплуатационного состояния конструктивных элементов ЛЭП
6. Предложена концепция построения системы мониторинга целостности опор ЛЭП с использованием технологии PLC.

По третьему направлению выполнены следующие работы:

7. Проанализированы системы комплексного интеллектуального мониторинга электроэнергетических объектов на основе мультимодальных сигналов и технологий периферийного искусственного интеллекта.

8. Разработана структурная схема комбинированного акусто-диэлектрометрического прибора со встроенным искусственным интеллектом, реализующего унифицированный подход к диагностике электрических и механических подсистем энергосетевой инфраструктуры.

9. Проведены исследования методов обработки сигналов и особенностей архитектуры модели, обеспечивающей интеллектуальные функции предлагаемого прибора при контроле ЧР и акустического сигнала от пьезодатчика.

10. Показано, что мультимодальный неразрушающий мониторинг с периферийным искусственным интеллектом следует рассматривать как перспективное направление развития цифровых технологий в электроэнергетике.

Итого за первое полугодие 2025 года по полученным научным результатам опубликовано:

- одна монография (в издательстве МЭИ, г. Москва);
- 9 статей, из них 4 проиндексированы в Scopus и 2 в РИНЦ;
- 2 патента на изобретения.

Основные результаты работы были доложены и получили одобрение на двух Международных научно-технических конференциях:

- International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2025), Russia, Sochi, 12-16 May 2025.
- International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2025), Russia, Sochi, 7-13 September 2025.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишлиakov В. Ф., Соленая О. Я., Соленый С. В. Электроэнергетические системы и сети. – СПб.: ГУАП, 2017. – 127 с.
2. Савина Н.В. Электроэнергетические системы и сети. - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 177 с.
3. Энергетики Кыргызстана. – СПб.: Издательство ДЕАН. 2017, - 144 с.
4. Касымова В.М. Энергоэффективность и устойчивое развитие Кыргызской Республики. – Бишкек. 2005. – 268 с.
5. Гапоненко С. О. Неразрушающий контроль и диагностика оборудования энергетических систем и комплексов: учебное пособие. – Казань: Отечество, 2021. – 82 с.
5. Крюков О. В., Сычев Н. И., Сычев М. Н. и др. Диагностика и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 183 с.
6. Поляков В.А. Основы технической диагностики. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2024. – 118 с.
7. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 2022. – 240 с.
8. Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
9. Каневский И. Н., Сальникова Е. Н. Неразрушающие методы контроля. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
10. Волков Ю.В. Системы технического диагностирования, автоматического управления и защиты. – СПб.: ВШТЭ СПб ГУПТД, 2019. – 115 с.
11. Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. Технические средства диагностирования. – М.: Машиностроение, 1989. – 636 с.
12. Малышенко, Ю.В., Стыцюра, Л.Ф., Саяпин, Ю.Л. Техническая диагностика. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2010. – 302 с.
13. Басманов В.Г. Современные методы диагностики объектов электроэнергетики: учебное пособие. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013. – 136 с.
14. Решетов А. А., Аракелян А. К. Неразрушающий контроль и техническая диагностика энергетических объектов. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2010. – 469 с.
15. Зимняков С. А., Козлов В. К., Муратаева Г. А. и др. Диагностика электрооборудования электрических сетей и подстанций. – Казань: КГЭУ, 2013. – 112 с.

16. Хальясмаа А. И., Дмитриев С. А., Кокин С. Е., Глушков Д. А. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций. — Екатеринбург: Изд во Урал. ун-та, 2015. — 64 с.
17. Гунгер Ю., Чернев В. Диагностика опор и фундаментов ВЛ современные методы оценки // Новости электротехники, 2006, № 2 (38).
18. Науменко А. П., Кудрявцева И. С. Теория и методы мониторинга и диагностики технических систем. – М.: Инфра-Инженерия, 2024. – 204 с.
19. Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю., Халиков М.И. Интеллектуальные технологии в системах управления и диагностики. – М.: Лань, 2012. – 112 с.
20. Грунтович Н. В., Грунтович Н. В. Техническая диагностика электрооборудования. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 254 с.
21. Хренников А. Ю. Техническая диагностика и аварийность электрооборудования. 2021. – 232 с.
22. Салихов З. Г., Будадин О. Н., Ишметьев Е. Н. и др. Инженерные основы теплового контроля. Опыт практического применения. – М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2008. – 476 с.
23. Богаенко, И. Н. Контроль температуры электрических машин. – М.: Техника, 1975. – 176 с.
24. Новиков В.А. Электропривод в современных технологиях. М.: Academia, 2014. 143 с.
25. Бурков А. Ф., Сериков А. В. Электродвигатели электрических приводов. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 104 с.
26. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127-137.
27. Lee S. B., Habetler T. G. An online stator winding resistance estimation technique for temperature monitoring of line-connected induction machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(3), pp. 685-694. <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.811789>.
28. Клюев В. В., Вавилов В.П. Неразрушающий контроль. Т. 5, Книга 1. Тепловой контроль. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.
29. Фомина М. А., Сибилева С. В., Демин С. А., Васильев А. С. Термоиндикаторные материалы и их применение // Труды ВИАМ, 2024, № 8 (138). С. 77-89. doi.org/ 10.18577/2307-6046-2024-0-8-77-89.
30. Balakrishnan G. K., Yaw C. T., Koh S. et al. A Review of Infrared Thermography for Condition-Based Monitoring in Electrical Energy: Applications and Recommendations. Energies, 2022. DOI:10.3390/en15166000.

31. Ukiwe E., Adeshina S. A., Tsado J. Techniques of in-frared thermography for condition monitoring of electrical power equipment. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2023, 10(1).
32. Грищенко А. В., Козаченко Е. В. Новые электрические машины локомотивов. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 271 с.
33. Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
34. Борисенко А. И., Костиков О. Н., Яковлев А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
35. Соловьев А.Л. Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ. – М.: НТФ «Энерго-прогресс», 2007. – 96 с.
36. Овчаров В. В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. – Киев: Изд-во УСХА. 1990. – 168 с.
37. Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. – Москва: Изд-во Колос, 2006. – 279 с.
38. Троицкий-Марков Р.Т. Тепловой контроль технического состояния электрооборудования с целью обеспечения электро- и пожаробезопасности // Энергобезопасность и энергосбережение, 2008, № 3 (21). – С. 30-31.
39. Матюшечкин Н. А., Белов Ю. Г., Болонина А. А., Кочеганов Д. М., Абузяров Т. Х. Волоконно-оптический датчик температуры для систем тепловой защиты электрооборудования // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018, № 1 (120). – С. 122-129.
40. Зюзев А.М., Метельков В.П. Двухканальная термодинамическая модель асинхронного двигателя для систем тепловой защиты // Электротехнические системы и комплексы, 2018, № 2 (39). С. 4-11. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-4-11.
41. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 4. С. 67–76. DOI: 10.14529/power220408.
42. Nasi B. A. Sensor-less Monitoring of Induction Motor Temperature with an Online Estimation of Stator and Rotor Resistances Taking the Effect of Machine Parameters Variation into account. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2022, vol. 70, no. 6, pp. 54-62. doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V70I6P207.

43. ГОСТ 27222-91. Машины электрические вращающиеся. Измерение сопротивления обмоток машин переменного тока без отключения от сети. Введ. 1992-01-01. – М.: Издательство стандартов. – 1991. – 20 с.
44. Достов Л.И. Состояние и перспективы развития средств измерения температуры обмоток электрических машин в рабочих режимах [Текст] / Л.И. Достов // Электротехническая промышленность. Сер. 01. Электрические машины: Обзор. информ. 1990. Вып. 30. 44 с.
45. Бочкарев И.В., Галбаев Ж.Т., Келебаев К.К. Диагностика теплового состояния электрических машин силового электрооборудования ТЭС // Известия КГТУ, 2017, №4 (44), С. 64-72.
46. Albla A. A. H., Brkovic B. M., Ječmenica M. M., Lazarevic Z. M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. Engineering, 2017, p. 276-282.
47. Бочкарев И. В., Келебаев К.К. Системы управления турбомеханизмами тепловых электростанций. – Бишкек: Изд-во «Оптима Технолоджис», 2023. – 219 с.
48. Zhang P. Active thermal protection for induction motors fed by motor control devices. Georgia Institute of Technology, 2010. – 202 p.
49. Zhang P., Lu B., Habetler T. G. Active stator winding thermal protection for AC motors. Conference Record of 2009 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference 2009, pp. 11-19.
50. Aalabaf Sabaghi M., Feshki Farahani H., Hafezi H.R., Kiani P., Jalilian A. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method. Engineering 2007, 42nd International Universities Power Engineering Conference 2007, pp. 217-222.
51. Lee S.B., Habetler T.G. An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 685-694.
52. Sabaghi M., Farahani H. F. Monitoring of induction motor tem-perature under unbalanced supplying by stator resistance estimation. Indian Journal of Science and Technology, 2012, Vol. 5, No 3, pp. 2354-2359.
53. Enany T. A., Hassan M., Othman E. S. Induction motor tempera-ture mon-itoring via signal injection enhanced with adaptive neuro-fuzzy in-ference system. Engineering, 2017. P. 91-109.
54. Enany T. A., Wahba W. I., Hassan M. A Remote and Sensorless Stator Winding Temperature Estimation Method for Thermal Protection for Induction Motor. Engineering, Computer Science IJSDA. 2014, Volume 3, pp 53-72.

55. Zhang P., Du Y., Lu B., Habetler T. G. A DC Signal Injection-Based Thermal Protection Scheme for Soft-Starter-Connected Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, pp. 1351-1358.
56. Zhang P., Lu B., Habetler T. G. A Remote and Sensorless Stator Winding Resistance Estimation Method for Thermal Protection of Soft-Starter-Connected Induction Machines. *Computer Science, Engineering. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, Vol. 55, no.10, pp. 3611 – 3618.
57. Matic P. R., Gecic M. A., Lekić Đ., Marcetic D. P. Thermal Protection of Vector-Controlled IM Drive Based on DC Current Injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015, Volume 62 Issue 4, p.p. 2082 – 2089.
58. Tshimanga T. P., Bezabih E., Iyer V. R., Zhang S., He L., Harley R. G. Stator temperature estimation of open-loop controlled induction machines via active DC voltage injection. *North American Power Symposium (NAPS)*, 2015.
59. Zhang P., Lu B., Habetler T. G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, 9 p.
60. Lee S.B., Habetler T.G. An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 685-694.
61. Baneira F. et al.. Estimation Method of Stator Winding Resistance for Induction Motor Drives Based on DC-Signal Injection Suitable for Low Inertia. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, Volume 34, pp 5646-5654.
62. Yoo J., Lee J.-H., Sul S.-K., Baloch N. A. Stator Resistance Estimation Using DC Injection With Reduced Torque Ripple in Induction Motor Sensorless Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
63. Левашов Ю. COSMO: оптические электронные компоненты. Опто-симисторы // Компоненты и технологии. 2005, №2. С. 18-20.
64. Обозов А.Д., Маматов Н.Ж. Анализ причин отключения высоковольтных линий электропередач 110 кВ и выше в условиях Кыргызской Республики // Вестник ОшГУ, 2017, № 2. С. 136-140.
65. Кабашов, В.Ю. Исследование причин аварийных отключений сельских ВЛ 6-10 кВ // Инновационная наука. – 2017. – №04-3. – С. 70-73.
66. Absimetov, V.A., Saltanova, E.V. Deterioration of Power Transmission Line Supports and Development of Proposals for Increasing their Durability. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2021, vol 151. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_45.

67. Привалов, Е.Е. Диагностика электроэнергетического оборудования. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ-Д, 2015. 226 с.
68. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередач. Новосибирск: Наука, 2009. 137 с.
69. Садыков М.Ф. Ярославский Д.А., Горячев М.П., и др. Анализ современных методов оценки состояния воздушных линий электропередачи по механическим параметрам проводов (обзор) // Известия Российской Академии наук. Серия физическая. 2021, том 85, № 11. С. 1600-1606.
70. Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. Методика контроля механических параметров воздушных линий электропередачи на основе улучшенного инклинометрического метода. Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. 2019;21(3):160-171.
71. Колодий А. Диагностика оборудования воздушных линий электропередач. Ставрополь: Изд-во ПАРАГРАФ, 2014. 38 с.
72. Кожевников А.Н., Красноруцкий Д.А. Анализ напряженно-деформированного состояния опоры воздушных линий электропередачи под действием ветровых нагрузок на провода электросети // В сборнике: Наука Промышленность Оборона. Труды XIX Всероссийской научно-технической конференции. В 4-х томах. Под редакцией С.Д. Саленко. 2018. С. 51-54.
73. Юркевич В.В., Схиртладзе А.Г. Надёжность и диагностика технологических систем. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 304 с.
74. Белозеров Б.К., Лиманов И.Я., Белалами С. Краткий анализ диагностических приборов контроля состояния опор воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1 (58). С. 128-131.
75. Бурнышева Т.В., Кожевников А.Н. Методика оценки технического состояния опор воздушных линий электропередачи с учетом типовых эксплуатационных дефектов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 2 (110). С. 1-12.
76. Кожевников А., Сафонов О., Тарасов А. Экспресс-оценка работоспособности опор воздушных линий электропередачи по динамическим параметрам // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № S3 (22). С. 27-29.
77. Гунгер Ю.Р., Чернев В.Т. Диагностика опор и фундаментов воздушных линий электропередачи. Современные методы оценки. – Новости электротехники, № 2. – 2006. – С. 134-136.
78. Соловьёв С.В. Контроль технического состояния металлических опор воздушных линий электропередач // В сборнике: Энергоэффективность и

энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 171-174.

79. Белалами С., Попов Д. В. Акустический контроль опор линий электропередачи (ЛЭП) // Контроль. Диагностика. 2015, №7. С. 26-32.

80. Федотов А.В. Теория и расчет индуктивных датчиков перемещений для систем автоматического контроля. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.

81. Конюхов Н.Е., Медников Ф.М., Нечаевский М.Л. Электромагнитные датчики механических величин. М: Машиностроение, 1987. 256 с.

82. Karimi H. Vibration Control and Actuation of Large-Scale Systems. Academic Press, 2020. 398 p.

83. Брякин, И.В. Электродинамический акселерометр // Проблемы автоматики и управления, 2012, №2. С.154-148.

84. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Электродно-индуктивный вибродатчик с емкостной связью // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 4(53). С. 39-49.

85. Брякин И.В., Гришин В.М. Система мониторинга технического состояния зданий // Проблемы автоматики и управления, 2014, № 1 (26). С. 144-155.

86. Брякин И. В., Бочкарев И. В., Корякин С.В. Способ передачи информации по сетям электропитания / Патент РФ на изобретение № 2749963. 21.06.2021, Бюл. № 18.

87. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R., et al. Device for Data Communication along Power Lines. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020. Pp. 7-12.

88. Samaitis V., Mažeika L., Jankauskas A., Rekuviénė R. Detection and localization of partial discharge in connectors of air power lines by means of ultrasonic measurements and artificial intelligence models // Sensors. — 2021. — Vol. 21, № 1. — P. 20. — DOI 10.3390/s21010020.

89. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Sixth Assessment Report (AR6), Working Group I: The Physical Science Basis. — 2021. — Table 7.15 — Lifetimes and GWP values for long-lived greenhouse gases.

90. EA Technology. UltraTEV® Detector²: Hand-Held Dual-Sensor Partial Discharge Detector [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: <https://eatechnology.com/solutions/partial-discharge-solutions/partial-discharge-detection/ultratev-detector/> (дата обращения: 05.05.2025).

91. Ohtsu M., Isoda T., Tomoda Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures // Journal of Acoustic Emission. — 2007. — Vol. 25. — P. 21–28.
92. Rugged Monitoring. CPM601-C Dual-Frequency Partial Discharge Monitor [Электронный ресурс]. — 2024. — URL: <https://www.ruggedmonitoring.com/product/cpm601-c/> (дата обращения: 05.05.2025).
93. Jacobs L. J., Kurtis K. E., Sherman R. J., Burney D. C. Recommendations for nondestructive testing (NDT) of concrete components for performance-based specifications. Final Report FHWA-GA-22-2015. — Atlanta: Georgia Department of Transportation, 2022. — 118 с.
94. Michau G., Hsu C.-C., Fink O. Interpretable detection of partial discharge in power lines with deep learning // Sensors. — 2021. — Vol. 21, № 6. — P. 2154. — DOI 10.3390/s21062154.
95. Chelmiah E. T., Madigan C. D., Kavanagh D. F. Partial Discharge – Localisation (PD-Loc) Dataset [Электронный ресурс]. — IEEE DataPort, 2024. — DOI 10.21227/yy7g-2p79. — URL: <https://ieee-dataport.org/open-access/partial-discharge-localisation-pd-loc-dataset> (дата обращения: 05.05.2025).
96. Jia Z., Fan S., Wang Z., Shao S., He D. Partial discharge defect recognition method of switchgear based on cloud-edge collaborative deep learning // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — Art. 10956. — DOI 10.1038/s41598-024-81478-9.
97. VSB Power Line Fault Detection Dataset [Электронный ресурс]. — Kaggle, 2019. — URL: <https://www.kaggle.com/competitions/vsb-power-line-fault-detection> (дата обращения: 05.05.2025).
98. Partial Discharge Monitoring System // PAC World Magazine. — 2024. — Issue 68. — URL: <https://www.pacw.org/partial-discharge-monitoring-system> (дата обращения: 05.05.2025).
99. OMICRON Energy. PARADIMO 100 – Ultra-High-Frequency Partial Discharge Monitoring System for GIS and GIL [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://www.omicronenergy.com/en/products/paradimo-100/> (дата обращения: 05.05.2025).
100. Stanescu D., Nastasiu D., Digulescu A. и др. Continuous monitoring of partial discharge activities in power cables and their stimulation due to the temperature rise // IET Smart Grid. — 2025. — Vol. 8, № 1. — Art. e12187. — DOI 10.1049/stg2.12187.

Приложение 1

к Договору № _____
от « _____ » 2025 года

“СОГЛАСОВАНО”

Министерство энергетики Кыргызской
Республики
Министр Т. О. Ибраев

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ИЭиС
при КГТУ им И. Рazzакова
д.э.н., профессор В.М. Касымова

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
по выполнению НИР «Разработка технических устройств контроля
и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических
систем Кыргызской Республики» на 2025 год

1. Обоснование, актуальность.

В сложившихся экономических условиях в КР очень актуальной проблемой является обеспечение надежности работы электроэнергетических систем и продление срока службы электрооборудования, исчерпавшего назначенный срока службы. Правильно спланированные диагностические мероприятия могут значительно увеличить срок реальной эксплуатации оборудования, что, безусловно, обеспечит снижение затрат. При этом имеющиеся мощности по выработке электроэнергии используются зачастую недостаточно эффективно из-за отсутствия у эксплуатационников приборов контроля и диагностики оборудования, что исключает возможность оперативной замены тех устройств, технические параметры которых выходят за пределы, указанные в технической документации на них.

Основной задачей контроля и диагностики является определение состояния оборудования и сооружений и прогнозирование их работоспособности, определение путей и средств продления их эксплуатационных ресурсов. Разработка мероприятий диагностического контроля непременно является составной частью процесса эксплуатации электрооборудования.

Объекты диагностического контроля определяются главным образом функциональной значимостью конкретного элемента в электроэнергетической системе. В последние годы широкое распространение получила диагностика электрооборудования (генераторов, трансформаторов и т.д.), как наиболее дорогостоящих и ответственных элементов электроэнергетических систем, а также диагностика элементов электрической части воздушных линий (ВЛ) и подстанций (ПС) – проводов, контактных соединений и изоляции. Кроме того, весьма актуальна и диагностика механической части ВЛ и ПС – опор, стоек под оборудование и фундаментов.

Ожидаемая научная новизна данной НИР будет заключаться в том, что будут впервые разработаны, научно обоснованы и запатентованы новые способы и устройства, позволяющие увеличить эффективность и достоверность неразрушающего контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики.

Проблеме диагностики электрической и механической частей ВЛ и ПС, находящихся в длительной эксплуатации, следует уделять более серьезное внимание. В связи с этим разработка новых технологий и систем автоматического контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики является актуальной научной и практической задачей, требующей своего оперативного решения.

2. Основание для выполнения работы:

проект выполняется на основании Договора № ____ от « ____ » _____ 2025 года.

3. Цели и задачи НИР.

Цель работы: повышение надежности и эффективности эксплуатации технических систем электроэнергетики Кыргызстана путем разработки новых неразрушающих методов и средств контроля и диагностики оборудования и сооружений, входящих в их состав.

Поставленная цель будет реализоваться комплексно в течении трех лет. В целом по теме будут решаться **задачи по четырем актуальным научным направлениям:**

1) разработка и научное обоснование новых способов и устройств теплового контроля электрооборудования переменного тока;

2) разработка и научное обоснование новых способов и устройств вибраакустического контроля электрооборудования и конструктивных элементов электроэнергетических систем;

3) разработка и научное обоснование новых способов и устройств дефектоскопии токопроводящих элементов и изоляции кабелей, а также неразрушающего контроля металлоконструкций опор (опор ЛЭП, стальных тросов грозозащиты и заземления, оттяжки опор и т.д.), входящих в состав электроэнергетических систем;

4) разработка интеллектуальных методов и устройств для неразрушающего контроля физико-механических свойств материалов основных узлов электрооборудования и опор линий электропередач.

Каждое из указанных направлений является самодостаточной научной проблемой, решающей свои конкретные научно-практические задачи и требующей использование своего особого научного аппарата исследований. При этом они совместно позволяют комплексно решить основную цель данной работы – повысить эксплуатационную надежность электроэнергетических систем Кыргызской Республики.

Основные задачи исследований.

На 2025 год по теме планируется решение следующих задач:

- Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений, входящих в состав электроэнергетических систем.

- Разработка принципов построения сенсорных компонентов (СК) систем контроля и диагностики, а также конструктивных и схемотехнических решений СК.

- Разработка и научное обоснование нового способа теплового контроля электрооборудования переменного тока.

- Анализ систем вибродиагностики и неразрушающего контроля энергетического оборудования, позволяющих оценить состояние энергетического оборудования без вывода его из процесса работы.

- Разработка и научное обоснование нового способа вибрационного контроля.

- Разработка системы контроля и диагностики элементов линий электропередачи с применением встроенного периферийного искусственного интеллекта.

Достижение целей проекта обусловлено необходимостью широкого внедрения разработанных систем контроля в процесс эксплуатации и диагностики электроэнергетических систем и обеспечения тем самым развитие энергетической отрасли в Кыргызской Республике.

4. Состав исполнителей:

№	ФИО	Должность по НИР	Телефон (моб.)
1	Бочкарев И.В.	г.н.с., руководитель темы	0555-09-07-51
2	Брякин И.В.	г.н.с., ответственный исполнитель темы	0770-20-78-95
3	Верзунов С.Н.	г.н.с.	0553-72-20-30
4	Лыченко Н.М.	г.н.с.	0555-78-87-35
5	Галбаев Ж.Т.	г.н.с.	0700-01-08-12
6	Гунина М.Г.	с.н.с.	0556-00-42-45
7	Попова И.Э.	с.н.с.	0555-43-00-45
8	Сандыбаева А.Р.	с.н.с.	0551-08-78-27
9	Корякин С.В.	с.н.с.	0550-08-90-05
10	Усачева Л.А.	с.н.с.	0550-33-35-81
11	Уметалиев С.Д.	инженер	0706-91-22-33

5. Содержание НИР:

В целом работы по данной теме будут направлены на разработку новых способов и диагностического оборудования для неразрушающего контроля оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики, обладающих повышенной чувствительностью и точностью при расширении диапазона контролируемых параметров, увеличении надежности контроля, повышении удобства обработки и визуализации результатов поиска. Конечные результаты работы будут заключаться в следующем:

а) Будут проведены научно-технические исследования по улучшению систем теплового контроля за счет использования новых подходов к тепловому контролю, основанному, в частности, на использовании различных систем выделения информационных сигналов непосредственно из фазных напряжений и токов электрооборудования. Это позволит разработать, научно обосновать и запатентовать новые эффективные средства тепловой защиты, что является важным направлением повышения технико-экономического уровня современного электрооборудования.

б) Будут разработаны, научно обоснованы и запатентованы новые способы и устройства вибродиагностики, которые позволят без разборки и вывода из процесса работы оценить состояние энергетического оборудования и обеспечить не только выявление отказов, в том числе и еще до их возникновения, но и позволят получить информацию о тенденциях изменения различных параметров. Это делает возможным проводить оценку потенциальных рисков и предпринимать своевременные действия для предотвращения выхода оборудования из строя.

в) Будут разработаны, научно обоснованы и запатентованы новые способы дефектоскопии различных элементов электроэнергетических систем, направленные на повышение точности, оперативности и достоверности решения задач неразрушающего контроля.

г) Будут разработаны интеллектуальные методы и устройства для неразрушающего контроля физико-механических свойств материалов функциональных элементов электрооборудования и опор линий электропередач, на базе которых планируется разработка комбинированных датчиков с повышенной чувствительностью для разных типов электрооборудования. Кроме того, будут использованы алгоритмы самообучения и адаптации, что поз-

волит разработанным системам контроля настраиваться под конкретные условия эксплуатации. Это повысит точность и надежность измерений путем учета внешних факторов и свойств конкретных материалов функциональных элементов электрооборудования.

6. Срок выполнения НИР – с 01 апреля 2025 года по 31 декабря 2025 г.

7. Отчетность: промежуточный отчет за I полугодие к 5 июля и заключительный годовой отчет к 5 декабря каждого года.

8. Ожидаемые результаты:

В 2025 году по теме будут разработаны принципиально новые научные подходы к созданию и функционированию систем контроля и диагностики технических устройств для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений, входящих в состав электроэнергетических систем на базе новых физических принципов, ранее не используемых в оборудовании данного класса.

Планируется получение следующих результатов:

- проанализированы известные способы тепло-, вибро- и акусто-диэлектрометрического неразрушающего контроля электрооборудования и сооружений электроэнергетических систем;
- разработано устройство для контроля нагрева обмоток электрооборудования переменного тока непосредственно во время эксплуатации;
- разработано устройство тепловой защиты электрооборудования переменного тока;
- разработан дифференциальный параметрический индуктивный датчик виброперемещения с новым принципом действия и теоретически обоснована его работоспособность;
- предложена система комплексного акусто-диэлектрометрического неразрушающего мониторинга устройств и опор ЛЭП с применением встроенного периферийного искусственного интеллекта.

Полученные результаты будут иметь научную новизну, подтвержденную патентами на изобретения, а также публикациями в различных научных изданиях, в том числе входящих в Scopus и РИНЦ.

Результаты НИР будут использованы в учебном процессе Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова с целью качественной подготовки специалистов для энергетической отрасли Кыргызской Республики. В частности, по тематике НИР будут подготовлены магистерские диссертации.

Внедрение разработанных технических устройств контроля и диагностики существенно повысит эффективность всего комплекса проводимых эксплуатационных, профилактических и ремонтных работ в электроэнергетических системах, существенно повысит оперативность этих работ. Решение данной проблемы позволит техническим и аварийно-спасательным службам своевременно и в полном объеме решать весь комплекс стоящих перед ними задач.

9. Объем финансирования на 2025 год (с 01.04.25 по 31.12.2025 г.) составляет 1 125 000 (один миллион сто двадцать пять тысяч) сом.

от Исполнителя

Научный руководитель НИР

И.В. Бочкарев

От Министерства образования и науки КР

Начальник Управления науки и инноваций
МОиН КР

Г. Токтошов

Приложение 2
к Договору № _____
«_____» 2025 года

“СОГЛАСОВАНО”

Министр энергетики
Кыргызской Республики
Т. О. Ибраев

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ИЭиС
при КГТУ им И. Рazzакова
д.э.н., профессор В.М. Касымова

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на 2025 год по выполнению НИР
«Разработка технических устройств контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики»

№ п/п	Наименование основных этапов, вид и объемы работ, подлежащих выполнению	Вид отчетности	Срок выполнения
2025 год:			
1	Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений электроэнергетических систем.	Публикация полученных результатов в изданиях, индексируемых в РИНЦ и Scopus	2 квартал
2	Разработка принципов построения сенсорных компонентов систем контроля и обработки диагностических сигналов, а также их конструктивных и схемотехнических решений		
3	Анализ и обработка научных результатов за I полугодие и оформление промежуточного научного отчета	Промежуточный отчет	к 5 июля
4	Разработка и научное обоснование нового способа теплового контроля электрооборудования переменного тока	Патентование разработанных технических решений и публикация полученных результатов в изданиях, индексируемых в РИНЦ и Scopus	3 квартал
5	Анализ систем вибродиагностики и неразрушающего контроля энергетического оборудования, позволяющих оценить состояние энергетического оборудования без вывода его из процесса работы	Патентование разработанных технических решений и публикация полученных результатов в изданиях, индексируемых в РИНЦ и Scopus	4 квартал
6	Анализ, обработка и обобщение полученных научных результатов и оформление заключительного научного отчета. Передача результатов НИР заказчику и МОН.		к 5 декабря
7	Защита научного отчета на Ученом совете (Исполнителя), экспертном совете и НТС ДН МОН КР (Заказчика).	Доклад	По расписанию ОН МОН КР в ноябре-декабре

от Исполнителя

Научный руководитель НИР

И.В. Бочкарев

От Министерства образования и науки КР
Начальник Управления науки и инноваций

МОиН КР

Г. Токтошов

Приложение 3

Отчет по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по государственному заказу, финансируемых из республиканского бюджета

№	Наименование государственной программы и проекта	Научный руководитель, должность, ученая степень и звание	Наименование государственного заказчика	Наименование ВУЗа, НИИ, реализующих проект	Цели и задачи проекта	Объект исследования и разработки	Методы исследования	Примечание
1	Разработка технических устройств контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики	Бочкарев И.В., профессор каф. «Электромеханика» КГТУ, доктор техн. наук, профессор	МОиН КР	КГТУ, НИИ Энергетики	<p>Цель проекта – повышение надежности и эффективности эксплуатации технических систем электроэнергетики Кыргызстана путем разработки новых неразрушающих методов и средств контроля и диагностики оборудования и сооружений, входящих в их состав.</p> <p>Задачи проекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений, входящих в состав электроэнергетических систем. 	<p>Объект исследования – способы и устройства для контроля и диагностики состояния технических компонентов, входящих в состав систем электроэнергетики Кыргызстана</p>	<p>Методы исследования – фундаментальные законы физики и теоретической электротехники, а также современные принципы построения измерительных систем и методы интеллектуального анализа данных</p>	

				<ul style="list-style-type: none"> ➤ Разработка принципов построения сенсорных компонентов (СК) систем контроля и диагностики. ➤ Анализ систем контроля нагрева обмоток электрооборудования. ➤ Разработка и научное обоснование нового способа теплового контроля электрооборудования переменного тока. ➤ Анализ систем вибродиагностики и неразрушающего контроля энергетического оборудования, позволяющих оценить состояние энергетического оборудования без вывода его из процесса работы. ➤ Разработка системы контроля и диагностики элементов линий электропередачи с применением встроенного периферийного искусственного интеллекта. 		
--	--	--	--	--	--	--

Приложение 4

Годовой (промежуточный) отчет государственных программ на основе целевых проектов и разработок, финансируемых из республиканского бюджета

№	Наименование государственной программы и проекта	Задание по календарному плану (Объем работ, подлежащих выполнению)	Выполненные работы по календарному плану (краткая аннотация о полученных научных результатах)	Этапы НИР	Вид отчета	Начало реализации проекта (год)	Срок окончания проекта (год)	Доказательная база
1.	Разработка технических устройств контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики	1. Анализ известных способов и принципов построения технических средств для неразрушающего контроля и диагностики электромеханических устройств и сооружений электроэнергетических систем 2. Разработка принципов построения сенсорных компонентов систем контроля и обработки диагностических сигналов, а также их конструктивных и схемотехнических решений 3. Анализ способов теплового контроля обмоток электрооборудования переменного тока	1. Рассмотрены особенности неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования, описана структура системы технической диагностики. 2. Выполнен анализ известных методов для неразрушающего контроля и диагностики электроэнергетического оборудования, а также принципов построения технических средств для их реализации, в том числе на основе самообучающейся нейронной сети 3. Рассмотрены и проанализированы способы и устройства теплового контроля обмоток электрооборудования переменного тока		Промежуточный	2025 г.	2027 г.	

Приложение 5

Количественная информация о реализации и результатах научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по государственному заказу за первое полугодие 2025 года

№	Наименование государственной программы и проекта	Публикации					Изобретения		Акт внедрения	примечание
		Статьи в SCOPUS, WoS тема статьи, с указанием даты	Статьи в РИНЦ тема статьи, с указанием даты	Статьи в других научных журналах	Тезисы/в т.ч. за рубежом	моно-графии	Патенты	Заявки		
1	Разработка технических устройств контроля и диагностики оборудования и сооружений электроэнергетических систем Кыргызской Республики	4 в том числе 1 статья в журнале Q1	4	1		1	2	1		

Приложение 6

Список научных работ сотрудников грантового проекта, опубликованных в 2025 году

№	Ф.И.О. автора	Ф.И.О. соавторов	Название научного издания	Издание
Книги				
1	Бочкарев И.В.	Ширинский С.В.	Расчет и конструирова- ние асинхронных элек- тродвигателей различ- ных модификаций	М.: Издательство МЭИ, 2025. – 240 с.
Статьи в Scopus				
2	Verzunov S.N.	Bochkarev I.V. Khramshin R.R.	Using a Convolutional Neural Network to Test Induction Sensors under Operating Conditions	Lecture Notes in Electrical Engineering. 2025. 1324. Pp. 401-410 DOI: 10.1007/978-3- 031-82494-4_35.
3	Bryakin I. V.	Bochkarev I.V. Khramshin R.R. Gasiyarov V. R. Erdakov I. N.	Fluxgate Magnetometers Based on New Physical Principles	Sensors 2025, 25 (13), 3893; https://doi.org/10.3390/s25133893
4	Bryakin I. V.	Bochkarev I.V. Khramshin R.R.	Non-Destructive Testing and Cable Product Diag- nostics	International Conference on Industrial Engineering, Appli- cations and Manufacturing (ICIEAM-2025), 2025
5.	Bryakin I. V.	Bochkarev I.V. Khramshin R.R.	Tolerance Control Sys- tems of Cable Products	International Russian Auto- mation Conference (RusAuto- Con), 2025
Статьи в РИНЦ				
6.	Бочкарев И.В.	Брякин И.В. Гунина М.Г. Тузелбай Н.М.	Разработка автоматизи- рованной системы теп- ловой защиты асинхрон- ных электродвигателей	Электротехнические си- стемы и комплексы. 2025. № 1(66). С. 39-48. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2025-1(66)-39-48 .
7.	Брякин И. В.	Бочкарев И. В. Храмшин В.Р.	Кондуктометрический метод неразрушающего контроля параметров электрических кабелей	Известия вузов. Проблемы энергетики, 2025, Т. 27, №2. С. 3-19. doi: 10.30724/1998- 9903- 2025-27-2-3-19.
8.	Брякин И. В.	Бочкарев И. В. Умаров Т.Э.	Контроль состояния эле- ментов опор линий элек- тропередач	Проблемы автоматики и управления, 2025. № 1 (52). С. 127-140.

9.	Верзунов С.Н.	-	Комплексный акусто-диэлектрометрический неразрушающий мониторинг устройств и опор ЛЭП с применением встроенного периферийного искусственного интеллекта	Проблемы автоматики и управления, 2025. № 1 (52). С. 141-151.
----	---------------	---	---	---

Статьи в других научных журналах

10	Лотц С.Д.	Бочкарев И. В. Брякин И.В.	Контроль дефектности обмоточных проводов для электрических машин	Мат-лы 67-й МСНТК «Наука, техника и инженерное образование в эпоху цифровизации и глобализации», 2025, часть 2. С. 128-135
----	-----------	-------------------------------	--	--

Патенты на изобретения

11	Брякин И.В.	Бочкарев И. В.	Динамический способ измерения виброускорения и датчик для его реализации	Патент РФ № 2834759. Опубликовано 14.02.2025, бюл. № 5.
12	Бочкарев И. В.	Брякин И.В. Гунина М.Г. Сандыбаева А.Р.	Устройство для тепловой защиты электрической машины переменного тока	Патент КР по заявке на изобретение № 20250005.01 от 17.01.25.

Приложение 7

ПЕРЕЧЕНЬ КОНФЕРЕНЦИЙ,
проведенных в 2025 г., в которых приняли участие
исполнители грантового проекта МОиН КР,

№	Наименование мероприятия (конференции, семинара, выставки)	Место проведения	Дата	Кол-во докладов
1	International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2025)	Russia, Sochi	12-16 May 2025	1
2	International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2025)	Russia, Sochi	7-13 September 2025	1