

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Непомнящий Валерий Юрьевич



**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

**Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие
системы**

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

докт. техн. наук, доцент
Маслова Анна Александровна

Тула, 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В ОБЛАСТИ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.....	16
1.1 Анализ проблем и перспектив развития информационно-измерительных систем в электроэнергетике	14
1.2 Современные подходы к построению информационно-измерительных систем в электроэнергетике	22
1.3 Обзор и исследование современных технологий мониторинга воздушных электросетей.....	33
1.4 Постановка цели и задач исследования.....	42
2 РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.....	43
2.1 Принципы построения информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.....	43
2.2 Обобщенная структура информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.....	45
2.3 Организация передачи данных в информационно-измерительной системе дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.....	54
2.4 Выводы по главе.....	62
3 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ.....	63

3.1	Определение входных и выходных переменных математической модели измерения тока утечки.....	63
3.2	Математическая модель измерения тока утечки.....	65
3.3	Метод фиксации частичных разрядов.....	69
3.5	Рекомендации по распределению вычислительной реализации математической модели по каналу измерения тока утечки ВЛ на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.....	75
3.6	Выводы по главе 3.....	81
4	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ИЗОЛЯТОР.....	83
4.1	Определение входных и выходных переменных.....	83
4.2	Метод измерения механической нагрузки на изолятор.....	85
4.4	Исследование устойчивости и адекватности метода измерения механической нагрузки на изолятор.....	92
4.5	Рекомендации по распределению вычислительной реализации метода измерения механической нагрузки на изолятор ВЛ на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.....	94
4.6	Выводы по главе 4.....	99
5	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА БЛОКА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ.....	100
5.1	Структура блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.....	100
5.2	Реализация блока измерения частичных разрядов на проводе ВЛ.....	101
5.3	Конструктивное исполнение и основные функции лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.....	103
5.4	Моделирование взаимодействия блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ с математической моделью цифрового двойника.....	108

5.5 Исследование динамических, статических и точностных характеристик лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.....	110
5.6 Выводы по главе 5.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ А ПРОГРАММА-МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА БЛОКА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И СВИДЕТЕЛЬСТВА НА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Транспортировка электроэнергии от электростанции к потребителям является одной из важнейших задач энергетики. Электроэнергия поставляется преимущественно по воздушным линиям электропередач (ВЛ). Эффективность и надежность передачи энергии определяется состоянием сетей электроснабжения. Потери энергии при передаче через воздушные электросети довольно высоки. Мощность теряется как на оборудовании, обеспечивающем преобразование энергии, так и на протяженных проводных линиях. Важным фактором надежной работы ВЛ является состояние гирлянд изоляторов. Нарушения изоляционных свойств гирлянды изоляторов приводит к увеличению токов утечки, энергетическим потерям и, самое главное, к возникновению аварийных ситуаций при пробое изоляторов. Наличие неблагоприятных погодных условий (дождь, снег, туман, сильный ветер, гололед) приводит к дополнительным потерям. Использование информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга ВЛ позволит решить многие проблемы в этой области, обеспечить системного оператора подробными сведениями о текущем состоянии воздушных сетей электроснабжения, а также снизить количество аварийных ситуаций за счет предиктивного обслуживания и замены изоляторов.

В связи с этим возникает **важная научно-техническая задача** расширения функциональных возможностей информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач, обеспечивающей фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов, а также проведение косвенной оценки состояния изоляторов и принятие мер по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций.

Объектом исследования являются информационно-измерительные системы для дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

Предметом исследования являются математические модели и методы дистанционного мониторинга информационно-измерительных систем изоляторов ВЛ.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является расширение функциональных возможностей информационно-измерительной системы для диагностики текущего состояния изоляторов воздушных линий электропередач на основе разработанных математической модели измерения тока утечки, метода фиксации частичных разрядов и метода измерения механической нагрузки на изолятор.

Для достижения указанной цели ставятся следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор информационно-измерительных систем для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.
2. Разработка обобщенной структуры информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.
3. Построение математической модели измерения тока утечки.
4. Разработка метода фиксации разрядов на изоляторах ВЛ.
5. Разработка метода измерения механической нагрузки на изолятор (гололедообразование).
6. Экспериментальные исследования по оценке соответствия выходных параметров математических моделей и методов и промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

Научная новизна работы:

1) разработана обобщенная структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, к основным задачам которой относят непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ, запись и хранение информации, преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа, формирование рекомендаций для принятия управленческих решений;

2) построена математическая модель измерения тока утечки, отличающаяся от известных тем, что позволяет обеспечить фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов, а также проведение косвенной оценки состояния изоляторов и принятие мер по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций.

3) разработан метод фиксации частичных разрядов, отличающийся от известных тем, что позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

4) разработан метод измерения механической нагрузки на изолятор, отличающийся от известных тем, что позволяет обеспечить фиксирование динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда).

Теоретическая значимость работы: развитие теории информационно-измерительных систем для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач на основе математических моделей измерения тока утечки и методов фиксации частичных разрядов и измерения механической нагрузки на изолятор.

Практическая значимость работы состоит в технической реализации информационно-измерительной системы для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, а также в выработке рекомендаций по распределению вычислительной реализации математической модели измерения тока утечки, метода фиксации частичных разрядов и метода измерения механической нагрузки на изолятор на микропроцессоре, а также на сервере центра управления электросетевой компании. Разработано конструктивное исполнение и описаны основные функции промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенного датчиком тока, позволяющего проводить моделирование взаимодействия блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ с математической моделью двойника, а также исследование динамических, статических и точност-

ных характеристик промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

Полученные теоретические и практические результаты находят применение в оперативных службах электросетевых компаний.

Методы исследования базируются на подходах и инструментарии теории информационно-измерительных систем, методах моделирования сложных систем, теории управления, теории измерений, методов математического моделирования, теории принятия решений.

Теоретические предпосылки к разработке таких систем были созданы трудами отечественных и зарубежных ученых: Макоклюева Б.И., Антонова А.В., Набиева Р.Ф., Максимова В.В., Ковалева С.П., Кудряшова Ю., Литвинова П., Полижарова А., Жиленкова Н., Бубенчиков А. А., Будкиной Е.М., Кузнецова Е.Б., Лазовской Т.В., Тархова Д.А., Васильев А.Н. Костикова И., Becker D., Neumann S., Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D., Pettey C., Brosinsky C., Westermann D., Krebs R., Ming M., Wang R., Zha Y., Zhang T. и др.

Личный вклад автора определяется общей формулировкой и обоснованием целей и задач исследований, выбором методов их решения; разработкой обобщенной структуры информационно-измерительной системы для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, рекомендаций по использованию информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач; построением математической модели измерения тока утечки, разработкой метода фиксации частичных разрядов на изоляторах ВЛ и метода измерения механической нагрузки на изолятор; экспериментальными исследованиями по оценке соответствия выходных параметров математических моделей и промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждена экспериментальной частью исследования. Результаты работы

внедрены на ООО НПО «ЭнергоСистемы» и ООО «СервисСофт Инжиниринг», а также в учебный процесс на кафедре охраны труда и окружающей среды ТулГУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) обобщенная структура информационно-измерительной системы для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач позволяет осуществлять непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ, запись и хранение информации, преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа, формирование рекомендаций для принятия управленческих решений;

2) математическая модель измерения тока утечки, отличающаяся от известных тем, что позволяет обеспечить фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов, а также проведение косвенной оценки состояния изоляторов и принятие мер по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций;

3) метод фиксации частичных разрядов, отличающийся от известных тем, что позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения;

4) метод измерения механической нагрузки на изолятор, отличающийся от известных тем, что позволяет обеспечить фиксирование динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования (п. 4 «Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования») специальности 2.2.11. – Информационно-измерительные и управляющие системы.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических и практических конференциях: XXXII международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий» (г. Тула, 2023 г.), XXXI Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы экологии» (г. Тула, 2024 г.), 58-ой и 59-ой научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием (г. Тула, 2022-2023 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в монографии, 12 печатных работах, из них: 7 работ в изданиях, вошедших в перечень рекомендованных ВАК РФ, 5 работ в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций. Кроме того, результаты исследований оформлены как объекты интеллектуальной собственности в виде 3 патентов на изобретение и 3 свидетельств на программы для ЭВМ Роспатента РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов и заключения, изложенных на 155 страницах машинописного текста и включающих 13 рисунков, 3 таблицы, 3 приложения и списка использованной литературы из 151 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель и задачи диссертационной работы, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ проблем и перспектив развития информационно-измерительных систем (ИИС) в электроэнергетике, представлены современные подходы к построению ИИС в электроэнергетике, а также обзор и исследование современных технологий мониторинга воздушных электросетей. Во многих зарубежных и российских публикациях подчеркивается важность согласования методов построения ИИС и моделей, необхо-

димось создания единой ИИС. Нехватка квалификации и опыта практического внедрения новых технологий, в том числе и ИИС в области электроэнергетики приводит к низкой производительности труда и выбору неверных управленческих и технологических решений.

Во **второй главе** разработана обобщенная структурная схема ИИС для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, к основным задачам которой относят непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ, запись и хранение информации, преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа формирование рекомендаций для принятия управленческих решений.

Передача информации от информационно-управляющих блоков в системе проводится по схеме выделенных каналов. Запросы на обслуживание поступают непосредственно в центр сбора информации. Представлена классификация запросов в информационно-измерительной системе и алгоритм выбора режимов работы.

В **третьей главе** разработаны математическая модель измерения тока утечки, учитывающая фиксацию динамики нарастания тока утечки изоляторов, и метод фиксации частичных разрядов.

Мониторинг изоляторов проводится посредством измерения величины токов утечек через изоляторы. Токи утечек замеряются высокочувствительными трансформаторами тока.

Блок дистанционного мониторинга изоляторов проводит фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов. Данные параметры позволяют провести косвенную оценку состояния изоляторов и принять меры по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций.

Основная задача **четвертой главы** – разработка метода измерения механической нагрузки на изолятор с учетом фиксации динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда).

Метод измерения механической нагрузки на изолятор ВЛ реализуется на микропроцессоре блока дистанционной диагностики изоляторов ВЛ и на сервере ЦУ ЭО. Выработаны рекомендации по распределению вычислительной реализации метода измерения механической нагрузки (гололедообразование) на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере ЦУ ЭО.

В пятой главе представлен разработанный блок дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенный датчиком тока для диагностики проводов ВЛ 6-220 кВ, на основе данных которых происходит построение математической модели и разработка методов.

Информация с датчиков, размещенных на ВЛ, передается на сервер сбора информации от средств дистанционной диагностики для последующей обработки и распределения полученной информации по ЦУ ЭО и аварийных служб для оперативного реагирования на возможное проявление нештатных и аварийных ситуаций.

Моделирование схемы измерения тока утечки проводилось с использованием трансформаторного датчика микротоков, использующего передачу данных о величине тока утечки по шине RS485 с применением протокола MODBUS RTU. Опрос датчика происходит через равные промежутки времени, задаваемые программно, в зависимости от требуемых условий. Результат измерений обрабатывается микропроцессорным блоком обработки и передачи данных. Также, данные измеренного значения тока утечки можно контролировать при помощи виртуального терминала UART.

Проведены экспериментальные исследования по оценке соответствия выходных параметров разработанных модели и методов, и промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов при одинаковых входных значениях, подаваемых на их входы. Результаты исследований показали соответствие разработанных модели и методов промышленному образцу блока дистанционного мониторинга изоляторов, расхождение параметров находится в пределах установленных параметров.

В ходе моделирования взаимодействия измерительного блока с математической моделью цифрового двойника ВЛ 6-220 кВ эмулировались основные параметры ВЛ. Результаты моделирования подтвердили работоспособность промышленного образца измерительного блока, его корректное взаимодействие с математической моделью и обеспечение заложенных функций и параметров в требуемых пределах.

Проведены испытания промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ в соответствии с разработанной программой-методикой испытаний.

В целях выполнения дальнейших работ по изготовлению опытного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, были разработаны технические требования, предъявляемые к опытному образцу блока.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В ОБЛАСТИ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

1.1 Анализ проблем и перспектив развития информационно-измерительных систем в электроэнергетике

Цифровая трансформация – ключевое условие для повышения конкурентоспособности российской экономики на глобальном уровне. В настоящее время объективно созрела необходимость масштабных преобразований в сфере электроэнергетики и, как следствие, общего развития промышленности нашей страны. Стратегическая задача по цифровизации энергетического сектора поставлена и Президентом РФ в рамках программы « экономика».

Однако выполнение данной программы объективно сталкивается с рядом проблем и препятствий [75]:

- рост уровня энергопотребления;
- повышение технологических требований;
- ужесточение экологических стандартов;
- низкий технологический уровень энергетического сектора;
- необходимость масштабных инвестиций;
- повышение цен;
- зависимость от импортных технологий;
- отсутствие координации между ключевыми участниками рынка;
- отсутствие практического опыта.

Прежде всего, стоит отметить рост уровня энергопотребления. К 2035 году спрос на потребление электроэнергии увеличится на 50%.

Следующей проблемой является повышение технологических требований. Цифровизация всех аспектов жизни предъявляет жесткие требования к надежности и качеству поставок электроэнергии.

Ужесточение экологических стандартов обусловлено необходимостью снижения антропогенной нагрузки на природу и соблюдения растущих экологических требований к процессу добычи электроэнергии.

Необходимо принять в расчет и низкий технологический уровень энергетического сектора в России. Устаревшая инфраструктура, зависимость от топливных ресурсов, протяженность линий и низкая плотность заселения – все эти проблемы приводят к уменьшению эффективности работы целых секторов экономики.

Нехватка квалификации и опыта практического внедрения новых технологий, в том числе и информационно-измерительных систем в области электроэнергетики приводит к низкой производительности труда и выбору неверных управленческих и технологических решений.

Только переход к модели управления отрасли позволит решить вышеуказанные проблемы.

Для сохранения уровня конкурентоспособности России цифровизацию энергетической системы необходимо провести до 2025 года.

В части перспектив по развитию отрасли, по данным Bloomberg, к 2025-2030 годам в лидеры по цифровизации энергетики выйдут США, Италия и Южная Корея. При этом самыми быстрорастущими нишами станут:

- умные приборы и датчики Iot («интернет вещей»);
- домашние и коммерческие решения в области управление энергопотреблением;
- децентрализация систем производства и доставки электроэнергии;
- развитие гибких систем, адаптирующихся под запросы потребителей.

По внедрению «умных» устройств наиболее перспективными рынками станут Россия, страны Восточной Европы, Средней Азии и Южной Америки.

Новые цифровые экосистемы будут работать на основе следующих технологий и принципов:

- интеграция устройств будет осуществляться на основе IoT-протокола;
- управление устройствами и работой протокола будет осуществляться с использованием облачных технологий;
- управление всей системой будет осуществляться на основе искусственного интеллекта и предиктивных моделей;
- анализ данных будет проводиться на базе нейросетей;
- распределение прав будет осуществляться на базе распределенного реестра (блокчейн).

На российском рынке, несмотря на громкие заявления, лишь небольшой процент компаний энергетического сектора приступил к практическому внедрению технологий по цифровизации отрасли. Большинство компаний испытывает острую нехватку кадров, а также действующих рабочих примеров, которые можно использовать на практике. трансформация в России стоит на месте.

Исследование лучших мировых практик внедрения цифровых решений и новых цифровых моделей организации деятельности, оказания цифровых сервисов в организациях энергетики

Следующим этапом анализа мирового опыта стало исследование лучших практик внедрения цифровых решений, продуктов и сервисов. В целях исследования были выделены следующие классы решений: обработка больших данных, предиктивная и предписывающая аналитика, промышленный интернет, цифровые двойники, комплексы цифровых технологий, а также особенности стратегического целеполагания на уровне компаний.

Большие данные.

Работа с большими данными обуславливает высокие требования к мощностям по их обработке: энергетические компании запускают собственные ЦОД/ЦХОД (центры обработки и хранения данных) и суперкомпьютеры для эффективной обработки данных: например, суммарная вычислительная

мощность компании компания Eni после выхода на пиковую производительность второго суперкомпьютера HPC4 составит 22,4 петафлопса.

В интеллектуальных энергетических системах может осуществляться сбор данных из различных источников, например, от датчиков в электрической сети, библиотек технических параметров промышленного оборудования, метеорологических информационных систем, географических информационных систем, социальных сетей. Данные позволяют улучшить обслуживание потребителей, повысить уровень их удовлетворенности, развить новые сервисы, обеспечить устойчивое функционирование энергосистемы.

Большинство компаний собирают данные из различных источников (датчики, демографические данные, данные из социальных сетей, геоинформационные системы и проч.). Поэтому интеграция и управление большими массивами данных имеют крайне важное значение для компаний. Сложность и разнообразие этой информации требует алгоритмических подходов, которые могут быть реализованы методами статистического анализа, бизнес-аналитики, интеллектуального анализа данных и средствами машинного обучения. Как правило, компании хранят информацию в виде реляционной базы данных (таких, как SQL Server) или в виде неструктурированных данных (например, текстовых или иных документов). Эта информация поступает из ИТ-инфраструктуры, подключенной к промышленным датчикам и средствам мониторинга окружающей среды.

Для интеграции и анализа данных требуются новые средства обработки, такие как in-memoгу платформы (такие как SAP, HANA, Oracle), Hadoop и NoSQL. Технологии этого класса снижают стоимость обработки данных и повышают эффективность анализа. В энергетической отрасли зачастую используются платформы, такие как IBM Open source InfoSphere platform, Microsoft Upstream Reference Architecture (платформа MURA), Oracle Architecture Development Process и проч.. Chevron апробировал концепцию Hadoop (IBM BigInsights) для процессинга сейсмических данных; Shell пилотирует Hadoop в частном виртуальном облаке Amazon (Amazon Virtual Private

Cloud (Amazon VPC)) для анализа данных с сейсмических датчиков; Cloudera Seismic Hadoop project комбинирует Seismic Unix с Apache Hadoop; PointCross Seismic Data Server и Drilling Data Server используют Hadoop и NoSQL; норвежский Университет Ставангера (University of Stavanger) проводит исследовательскую деятельность по сбору данных на Hadoop .

Предиктивная и предписывающая аналитика.

Предиктивная аналитика тесно связана со сбором и анализом больших данных, интернетом вещей, а также с инструментами обработки больших данных. Алгоритмический анализ данных о функционировании производственных активов позволяет перейти к предиктивному обслуживанию, сокращающему и затраты на ремонт оборудования, и вероятность его поломки.

По данным BNEF, ведущие энергокомпании Европы, США и Юго-Восточной Азии активно занимаются развитием предиктивных систем для аналитики состояния своих активов в генерации и сетях. В генерации этот процесс находится на более продвинутой стадии, причем компании выбирают как стратегию развития собственных «цифровых» подразделений, создающих и поддерживающих разработку, так и стратегию привлечения внешнего партнера.

Согласно данным Министерства энергетики США, внедрение технологий предиктивного обслуживания окупается в среднем 10 раз за период использования, при этом затраты на обслуживание снижаются на 25-30% (и до 50% для некоторых типов оборудования - например, турбин для ветрогенераторов), время на устранение поломок – на 70-75%, сокращение времени простоя – на 35-45%, также возможно 20-25-ти процентное увеличение производства. Директор Фонда развития интернет-инициатив в интервью приводит аналогичные цифры – по их оценкам, экономия от внедрения предиктивного обслуживания составляет около 20-30%.

В работе рассмотрены следующие проекты: системы предиктивной аналитики EDF Group, Tata Power, Exelon, система PresAGHO Enel Green Power, система CMMS PSE&G, разработка Google Deepmind, система Swhere.

Промышленный интернет и автоматизация оборудования (в т. ч. через управление из диспетчерского центра)

Под термином промышленного интернета подразумевается использование технологии больших данных в коммерческой сфере, предполагающее сбор информации с элементов промышленной инфраструктуры и её автоматизированную обработку, а также управление такими элементами, с целью повышения эффективности работы данной инфраструктуры. В энергетике развитие промышленного интернета приводит к появлению целого пласта технологий и решений, существенно повышающих эффективность и открывающих возможности для структурной трансформации отраслей.

Цифровизация открывает новые возможности управления распределенной генерацией совместно с другими видами энергоресурсов. Автоматизация оборудования, возможность удаленного наблюдения за состоянием оборудования и дистанционного управления, распространение накопителей энергии и новых бизнес-моделей их использования, превращает потребителей в активных полноправных участников энергосистемы. Для угольной и нефтегазовой промышленности внедрение промышленного интернета позволяет не только снизить операционные расходы, повысить выработку, но и значительно улучшить условия труда и безопасности работников, используя безлюдные технологии для труднодоступных и опасных участков.

Цифровые двойники.

Цифровой двойник представляет собой виртуальную копию реального объекта, что позволяет реалистично моделировать не только сами изделия, но и процессы их сборки, строительства и эксплуатации в различных условиях. Двойник с максимальной точностью представляет в цифровом формате конфигурацию и состояние продукта (процесса, актива и т.д.) на протяжении его жизненного цикла: от проектирования и производства, внедрения или обработки, тестирования, до реализации или эксплуатации. В любой момент времени идентификатор цифрового двойника коррелирует с физическим оригиналом.

Цифровые двойники все более активно используются в самых разных локациях и областях применения: от нефтегазовых трубопроводов на Ближнем Востоке до ветряных турбин в Северном море. По данным GE Digital, на 2019 год в мире эксплуатируется более 1,2 миллиона цифровых двойников в различных отраслях. Цифровые двойники сегодня преимущественно используются для промышленных активов, которые генерируют много данных и подключены к промышленному интернету. Особенно это касается критической инфраструктуры компании. Простой оборудования приводит к значительным потерям прибыли, поэтому максимальное использование доступных данных и их анализ, позволяющий предсказать поведение активов, является производственной необходимостью.

Хотя цифровые двойники являются интеллектуальными системами, важно понимать, что они не всегда полностью автономны. Приложения на основе искусственного интеллекта и цифровые двойники по-прежнему требуют большого вмешательства человека, особенно в случаях, когда эти модели используются для тестирования новых функций и модификации параметров работы физических активов. В промышленности искусственный интеллект не всегда работает эффективнее человеческого. Человеческие навыки же, усиленные анализом и рекомендациями ИИ, показывают наилучшие результаты.

Комплексные цифровые технологии.

Электроэнергетика во многих отношениях демонстрирует опережающие другие отрасли темпы цифрового развития. Так, текущее состояние цифрового развития электроэнергетики можно охарактеризовать развитием концепции Smart Grid – «Умная сеть». Концепция определяет следующие характеристики электроэнергетической системы: интегрированная электроэнергетическая система, обладающая возможностями саморегулирования и самовосстановления, имеющая сетевую топологию, в составе генерирующих источников, передающих и распределительных сетей, потребителей электрической энергии. Управление «умной сетью» осуществляется единой сетью

информационно-управляющих устройств и систем в режиме реального времени.

Ключевыми технологическими инновациями при реализации концепции «умной сети» являются следующие решения: активный потребитель, виртуальная электростанция, распределенная система накопления электроэнергии, решения Интернета энергии.

Анализ рынка модулей дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ для диагностики ВЛ-6-220 кВ.

На рынке модулей дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ широко представлены датчики производства компании Lindsey (США).

Датчики характеризуются высокой точностью измерений, хорошей частотной характеристикой и отсутствием фазового сдвига. Конструктивно, датчики встраиваются в различные конфигурации изоляторов с полной механической нагрузкой [1, 48-51, 85, 99, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**19].

Датчики обеспечивают следующие функциональные и технические характеристики:

- широкий ряд моделей датчиков: только измерители тока, только измерители напряжения, а также комбинированные модели измерения напряжения и тока;
- погрешность измерения напряжения: 0,5%
- погрешность измерения тока: 1%
- среднее время наработки на отказ (MTBF): более 1000 лет
- отсутствие сдвига фаз при измерении тока и напряжения
- наличие моделей для применений, требовательных к гармоникам
- возможность установки на линию под напряжением (горячую линию).

1.2 Современные подходы к построению информационно-измерительных систем в электроэнергетике

Электрическая сеть представляет собой, по сути, единую среду технологических данных, которая обеспечивает полный функционал управления технологическим процессом распределения электроэнергии, включая выработку оптимальных управленческих решений на основе актуальных точных достоверных данных о состоянии всех единиц оборудования. Согласно концепции « трансформация 2030», электрическая сеть должна включать следующий функционал [60, 91, 126, 130]:

- анализ топологии и расчет установившегося режима в распределительной сети;
- автоматический расчет показателей надежности;
- выявление дефектов в сети низкого напряжения;
- дистанционное управление оперативными переключениями в нормальном и аварийном режимах, в том числе из диспетчерских центров субъекта оперативно-диспетчерского управления в отношении объектов диспетчеризации;
- автоматическое регулирование напряжения в соответствии с заданными субъектом оперативно-диспетчерского управления графиками;
- автоматизированное снижение и восстановление нагрузки, в том числе по командам субъекта оперативно-диспетчерского управления;
- перераспределение нагрузки путем реконфигурации распределительной сети;
- сглаживание «пиков» нагрузки в распределительной сети;
- управление устранением неисправностей;
- самодиагностика и самовосстановление после сбоев в работе отдельных элементов;
- управление распределенной малой генерацией для объектов генерации, не отнесенных к объектам диспетчеризации.

Элементом ситуационного управления верхнего уровня является ситуационно-аналитический центр (САЦ) на уровне ПАО «Россети» и дочерних зависимых обществ (ДЗО). Основным элементом САЦ является ситуационно-аналитическая панель, созданная посредством интеграции технологических и корпоративных информационных систем на основе единой модели сети (СІМ). Автоматизированные системы управления ресурсами (на базе единой модели СІМ) включают [13, 60, 92, 112, 122]:

- управление жизненным циклом электросетевых активов на этапах проектирования, производства, эксплуатации, утилизации;
- управление производственными активами предприятия;
- управление взаимодействия с потребителями услуг;
- графическую визуализацию и анализ данных (включая пространственные) об эксплуатируемых объектах.

Ключевым элементом системы оперативно-технологического управления является Центр управления сетями (ЦУС). ЦУС находится на уровне региональных сетевых компаний (как правило – филиал ДЗО) с размещением программно-технического комплекса АСТУ. Информационно-технологическая инфраструктура данного уровня должна обеспечивать реализацию задач оперативно-технологического управления и выполнять следующие функции [66, 97, 147-148]:

- поддержка моделей сетей и объектов, используемых для прогнозов, планирования и расчетов, а также обучения персонала;
- обеспечение доступа к информации внешних прикладных систем, управление подключением прикладных систем к системной шине обмена данными.

Определяющими информационными технологиями уровня оперативно-технологического управления являются следующие:

- системы сбора и обработки данных (SCADA), обеспечивающие решение следующих задач:
 - 1) сбора, верификации и первичного анализа данных;

- 2) ведения архива измерений и сигналов;
- 3) визуализации оперативных данных;
- 4) оповещения персонала об обнаруженных аварийных событиях;
- 5) дистанционного управления (телеуправления) оборудованием сети.

– системы управления распределительной сетью (DMS). Обеспечивают решение задач:

- 1) расчета установившегося режима;
- 2) анализа потокораспределения мощности;
- 3) расчета потерь и автоматического выявления очагов потерь.

– системы управления отключениями, включая аварийные ситуации (OMS), обеспечивающие решение следующих задач:

- 1) локализации мест повреждения и ликвидации аварийных событий;
- 2) автоматического восстановления электроснабжения.

– системы управления мобильными бригадами и ресурсами – цифровое управление оперативными бригадами (WFM);

– геоинформационные системы (ГИС).

– системы оперативного управления энергопотреблением (EMS), обеспечивающие решение следующих задач:

- 1) интеллектуального управления энергопотреблением, основанного на анализе профилей и характере нагрузок;
- 2) интеллектуального управления объектами малой генерации, не отнесенными к объектам диспетчеризации.

– ОЖУР (организация деятельности оперативно-технологического и ситуационного управления в больших социотехнических системах), обеспечивающая следующие функции:

- 1) фиксация событий рабочего режима;
- 2) фиксация событий внештатных ситуаций;

– системы интеллектуального учета электроэнергии (AMI).

Данные для оперативно-технологического управления сети (ТИ, ТС, ИПУ, ИВК и т.д.), а также данные, полученные в результате применения методов «дорасчета», обрабатываются в ЦУС. Цифровые данные для ЦУС поступают в объеме, необходимом и достаточном для оперативно-технологического и ситуационного управления [87, 109, 124, 127].

Автоматизированные системы технологического управления, функционирующие в режиме реального времени, должны быть обеспечены выделенной информационно-технологической инфраструктурой в рамках технологической сети передачи данных. Кроме того, автоматизированные системы технологического управления должны реализовываться на базе отечественного программного обеспечения [34, 57, 60].

Компанией «Россети Северо-Запад» создана воздушная линия электропередач на 110 кВт в Карелии. Это – лишь первый этап пилотного проекта, который уже дал свои результаты.

Электрическая линия снабжена датчиками, они в режиме реального времени передают на пульт управления все параметры сети и реагируют на любые климатические изменения. Сейчас специалисты компании работают над внедрением 3D-моделирования, после чего пилотный проект получит оценку по эффективности. Сомнений в том, что оценка будет высокой, у специалистов нет. Третий этап – создание таких же ВЛ в других регионах и объединение их в общую систему [128-129, 132, 136, 139, 140].

Благодаря этому должна будет решена одна из основных задач российской энергетики – получение объективной информации о состоянии сетей в режиме онлайн. Это позволит минимизировать количество аварийных отключений и увеличить срок службы самих ВЛ не менее чем на 20%. Кроме этого, единая информационная сеть по ВЛ позволит объективно оценивать их состояние по всей стране и планировать затраты, связанные с ремонтными работами [60, 116-118, 141].

В связи с осуществляемыми в электроэнергетике реформами, запуском рынка электроэнергии и мощности многократно увеличилось число предпри-

ятий и организаций, участвующих в процессах выработки, транспортировки, распределения и потребления электроэнергии. В ходе реформ каждая компания разрабатывала свою методологию построения информационно-измерительных систем и моделей. Таким образом, в отрасли естественным путем сформировалась информационная среда, состоящая из «островов» информации. Это обстоятельство осложняет обмен данными и снижает надежность системы в целом.

Во многих зарубежных публикациях подчеркивается важность согласования методов построения информационно-измерительных систем и моделей, необходимость создания единой информационно-измерительной системы [37-39, 89, 123, 149, 150]. В США различные подходы к организации информационных сред в разных штатах затрудняют взаимодействие операторов и энергокомпаний. Несогласованность в этом вопросе приводится как одна из причин сравнительно большого числа системных аварий [101-104, 120, 121]. В других развитых странах проблема информационного обмена стоит не менее остро.

На предприятиях энергетики за рубежом функционирует множество программных комплексов, таких как SCADA, EMS, DMS и GIS-системы от различных производителей: ABB, SIEMENS, General Electric, AEG, AREVA. Соответственно, при их использовании, существует задача организации обмена данными между комплексами различных производителей. При этом, требуется достаточно большое количество адаптеров и конверторов. Большинство конверторов требует индивидуального проектирования и разработки либо производителями программного обеспечения (ПО), либо непосредственно ИТ-службами предприятий [90, 91, 110, 111-115, 133-135].

Очень похожая ситуация в этой сфере сложилась в российской электроэнергетике. Постепенное формирование информационных сред обеспечивалось созданием и внедрением программных средств для решения определенных задач отделов, служб, территориально распределенных энергообъединений и энергокомпаний. Локальные информационно-измерительные си-

стемы проектировались для выполнения одной или нескольких конкретных задач. Обмен данными между уровнями управления и энергокомпаниями, как правило, происходил с помощью файлов определенной структуры (макетов) [101-104, 145].

В настоящее время в энергообъединениях и на предприятиях отрасли используется большое количество программ и баз данных самых разнообразных форматов. Программные продукты и базы данных созданы различными фирмами, их интеграция существенно затруднена, что приводит к большим затратам на разработку различных конверторов, шлюзов, обменных блоков. Ситуацию не улучшает и практикующееся внедрение «больших» систем управления предприятием общего назначения (типа SAP/R3, Oracle E-Business Suite и др.), так как они не имеют стандартных информационных шлюзов с системами ОИК, АСДУ, АСКУЭ [20, 22, 73, 90, 149-151].

О важности решения проблем стандартизации информации в электроэнергетической отрасли говорят и принятые в конце 2008 г. поправки к Закону «О естественных монополиях» [69, 71]. Закон предписывает естественным монополиям предоставлять информацию о своей деятельности «в соответствии со стандартами раскрытия информации, утвержденными Правительством Российской Федерации», что предполагает наличие единой системы структуризации и классификации. При этом к обязательным для раскрытия отнесены не только финансовая и бухгалтерская информация, но и технико-экономические показатели деятельности субъектов естественных монополий.

Решением указанных проблем может стать интеграция и стандартизация информационного и программного обеспечения. Для этого следует создать единую информационно-измерительную систему, включающую обобщенную модель данных, способную достаточно полно описать обрабатываемую информацию для широкого круга задач. Модель должна поддерживать так называемую семантическую интероперабельность – возможность устанавливать связь между понятиями в информационных системах, изначально не предполагающих обмена данными. Подобная модель должна быть доста-

точно глубокой для описания необходимой информации и иметь механизмы расширения (добавления новых типов информации).

Стандарты IEC 61970 и NRECA MultiSpeak 2.2 могут использоваться энергокомпаниями для удовлетворения основных требований по формированию информационной модели, но стандарт NRECA MultiSpeak 2.2 содержит описание относительно небольшого сегмента энергетики, кроме того, он ориентирован на задачи энергосистем США. В то же время IEC 61970-301 CIM является международным стандартом и содержит более широкое описание модели энергосистемы.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что распространенные международные стандарты, в том числе IEC 61970, не могут применяться без расширения и локализации для нужд российской электроэнергетики из-за ее определенной специфики.

Это обстоятельство требует разработки в России собственных информационно-измерительных систем, синхронизированных с международными стандартами, прежде всего с IEC 61970-301 CIM. Процесс их создания подразумевает формирование и обобщение состава объектов и оборудования, а также перечня решаемых технологических задач.

Единая информационная модель ЕЭС России в иерархической структуре диспетчерского управления

Развитие информационных технологий привело к внедрению на предприятиях электроэнергетики большого количества информационно-измерительных систем (далее – ИИС), как правило, предназначенных для решения одной конкретной технологической задачи. Большинство таких ИИС имели свою собственную информационную модель энергетической системы (далее – ЭС) или её части и, как правило, собственный формат хранения. При этом взаимная конвертация информационных моделей разных ИИС реализовывалась точечно и частично. Таким образом, несмотря на то, что информационные модели разных ИИС содержали данные об одном и том же оборудовании, информационный обмен между ними был затруднителен.

Между предприятиями информационный обмен выполнялся, как правило, путем направления табличных или текстовых файлов, редко пригодных для машинной обработки. Такая ситуация была характерна для всех предприятий электроэнергетики, что приводило к следующим проблемам:

- увеличению ресурсоемкости задачи по актуализации информационных моделей по причине их множественности и неприспособленности к информационному обмену;
- разновременности обновления информации в информационных моделях одного предприятия;
- разнородности данных об одном и том же объекте в разных ИИС и у разных предприятий электроэнергетики;
- появлению дополнительных последовательных звеньев, увеличивающих вероятность ошибки;
- увеличению сроков и стоимости внедрения новых ИИС;
- невозможности интеграции приложений, разработанных разными производителями;
- увеличению зависимости от разработчика ИИС по причине реализации не только уникальных алгоритмов работы ИИС, но также и уникального хранения БД.

Усугубляло ситуацию и то, что множество ИИС были разработаны и внедрены в виде распределённых систем, имеющих свою собственную базу данных. Так, например, в АО «СО ЕЭС» эксплуатировалось количество моделей для оценивания состояния энергосистем, равное количеству диспетчерских центров. Описанная ситуация была характерна не только для отечественной электроэнергетики. Результатом чего стало утверждение серии стандартов международной электротехнической комиссии МЭК 61970 и МЭК 61968 на базе разработок института EPRI (США). В указанных стандартах была определена Общая информационная модель (СІМ), описывающая стандартным образом информационную инфраструктуру предприятия

электроэнергетики. В соответствии со стандартом МЭК 61970-301 Общая информационная модель (CIM) – это абстрактная модель, описывающая основные элементы электроэнергетической системы, их свойства и связи между ними в виде общепризнанных и одинаково понимаемых определений и понятий [12, 23-28, 36, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 47, 52, 56].

CIM следует рекомендовать предприятиям, эксплуатирующим две и более информационные системы, содержащие данные об одних и тех же объектах электроэнергетики, оборудовании и устройствах, а также предприятиям, активно участвующим в информационном обмене с другими предприятиями электроэнергетики. Использование CIM позволяет решить следующие задачи:

1. Повысить качество используемых данных, снизить их разнородность и разновременность обновления.
2. Сократить сроки и стоимость внедрения новых информационных систем.
3. Обеспечить интеграцию автоматизированных систем, разработанных независимо разными производителями.
4. Снизить зависимость от конкретного разработчика автоматизированной системы. Что касается производителей автоматизированных систем, то поддержка информационного обмена в формате CIM уже стала одним из обязательных требований к европейским, и крупным отечественным предприятиям электроэнергетики.

После выпуска первой редакции серии стандартов МЭК 61970 и МЭК 61968, вопросы использования CIM активно обсуждались [6, 21**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 66, 67, 77, 79], однако успешно реализованные проекты в отечественной электроэнергетике практически отсутствуют. Начиная с 2005 года АО «СО ЕЭС» инициирована проработка вопросов взаимной интеграции информационных моделей и изучению международного опыта. Были рассмотрены различные технологии и в 2012 году принято окончательное решение об использовании CIM в качестве основы для по-

строения информационной модели ЕЭС России. Предстояло с одной стороны провести масштабный инжиниринг данных, а с другой – разработать и внедрить систему управления изменениями информационной модели. При решении первой задачи был создан не просто ещё один справочник, а сформирована информационная модель, готовая к решению нескольких технологических задач, таких как расчёт установившихся режимов и оценивание состояния энергосистемы. Важно отметить, что СИМ является стандартизованным форматом информационного обмена, но не налагает требований к структуре хранения информации. Это означает, что информационная модель может иметь свой собственный уникальный формат, но должна быть пригодна для информационного обмена в формате СИМ. Очевидно, и то, что чем ближе будет формат модели к формату обмена, тем более простой будет интеграция данной модели с внешними ИИС. Поэтому было принято решение реализовать информационную модель максимально близко к стандарту СИМ [11, 14, 78, 100, 146].

Однако построение информационно-измерительной системы в соответствии со стандартными подходами СИМ не означало просто скопировать зарубежный опыт. При разработке были учтены и особенности отечественной электроэнергетической отрасли, и практический опыт Системного оператора. Создание единой информационно-измерительной системы ЕЭС России осуществлялось в диспетчерских центрах в два этапа – сначала модель содержала информацию об объединенных энергосистемах (далее – ОЭС) Центра, Юга, Северо-Запада и состояла из около 1 миллиона именованных объектов. На втором этапе были добавлены ОЭС Средней Волги, Урала, Сибири и Востока. С момента создания модель активно развивалась и в настоящее время содержит около 4 миллионов физических (оборудование, устройства) и вспомогательных объектов, расположенных более чем на 13 тысячах объектах электроэнергетики ЕЭС России и стран ближнего зарубежья.

При решении второй задачи – разработке системы управления изменениями информационно-измерительной системы, – необходимо было учиты-

вать ряд существенных особенностей оперативно-диспетчерского управления. Основная особенность – существующая трехуровневая иерархическая структура оперативно-диспетчерского управления, включающая в себя 49 региональных диспетчерских управлений (РДУ), обеспечивающих управление режимами территориальных энергосистем, 7 объединённых диспетчерских управлений (ОДУ), отвечающих за управление режимами объединённых энергосистем и главный диспетчерский центр (ГДЦ), обеспечивающий управление режимами Единой энергетической системы, и ответственный за поддержание частоты в энергетическом объединении, в которое входят энергосистемы 12 государств [59, 166].

Описанная структура диспетчерского управления определяет технологию информационного обмена между субъектами электроэнергетики и Системным оператором. Как правило, информация передаётся от субъекта электроэнергетики в РДУ, затем поступает в ОДУ и ГДЦ. При этом подробность модели определяется на уровне РДУ, где решаются задачи оперативно-диспетчерского управления одной или несколькими территориальными энергосистемами. Различие в конфигурации территориальных энергосистем и наличие уникального оборудования, установленного в каждой из них, привело к тому, что каждое РДУ представляет собой центр уникальных компетенций в вопросах моделирования объектов электроэнергетики и оборудования своей операционной зоны. Важной особенностью является и расположение диспетчерских центров Системного оператора в 9 часовых поясах. Это налагает особые условия на оперативность централизованной актуализации информационной модели. Таким образом, при разработке системы управления изменениями информационной модели необходимо было с одной стороны учитывать трехуровневую структуру оперативно-диспетчерского управления, а с другой обеспечить целостность и непротиворечивостью данных одновременно во всех диспетчерских центрах, а также возможность автономной работы каждого из них в аварийных ситуациях. С учётом вышесказанного, информационная модель ЕЭС России была поделена между центрами

уникальных компетенций – РДУ, которые получают от субъектов электроэнергетики информацию о всех изменениях в территориальных энергосистемах, выполняют её первичную проверку, формируют набор изменений и направляют его в ОДУ.

1.3 Обзор и исследование современных технологий мониторинга воздушных электросетей

Транспортировка электроэнергии от электростанции к потребителям является одной из важнейших задач энергетики. Электроэнергия поставляется преимущественно по ВЛ, которые состоят из кабельных линий и оборудования для преобразования энергии и согласования с нагрузкой. Эффективность и надежность передачи энергии определяется состоянием сетей электроснабжения. Мониторинг ВЛ позволяет решить многие проблемы в этой области.

Потери энергии при передаче через воздушные электросети довольно высоки. Мощность теряется как на оборудовании, обеспечивающем преобразование энергии, так и на протяженных проводных линиях. Потери электроэнергии в проводах зависят от силы тока, поэтому при передаче ее на дальние расстояния напряжение повышают с помощью трансформаторов, во столько же раз уменьшая силу тока, что при передаче той же мощности позволяет значительно снизить потери. Однако с ростом напряжения начинают происходить различные разрядные явления, которые также вносят свой вклад в потери. Установленное на узловых станциях для перераспределения электроэнергии оборудование позволяет контролировать потоки энергии и их параметры, а также оценивать потери и качество электроэнергии [81].

Можно выделить следующие типы потерь в ВЛ:

- неизбежные потери за счет омического сопротивления проводов;
- потери на электромагнитное излучение;
- потери при возникновении коронного разряда на проводах и изоляторах;

- потери при возникновении резонансных явлений в проводе при рас-
согласовании с нагрузкой;
- утечки тока за счет нарушения изоляции;
- утечка тока при межфазных коротких замыканиях и замыкании на
землю.

Наличие неблагоприятных погодных условий (дождь, снег, туман, сильный ветер, гололед) приводит к дополнительным потерям, в частности к возникновению коротких замыканий, к частичному повреждению и обрыву проводов.

При транспортировке электроэнергии через конкретную ВЛ регламентированы допустимые токовые нагрузки. При этом используются предельные значения тока, определяющие провис проводов выше критического. Эти данные определены для самых экстремальных условий, которые более чем в 90% времени эксплуатации ВЛ не встречаются. Следовательно, имеется ресурс для пропускания больших мощностей без нарушения регламента. То есть можно передавать дополнительную мощность (15–30%) практически в 90% времени эксплуатации. Наличие системы мониторинга позволяет без уменьшения регламента по надежности использовать этот дополнительный ресурс. Для этого необходимо контролировать уровень тока и температуру проводов по всей трассе и в соответствии с реальным состоянием линии динамически регулировать уровень передаваемой мощности [81].

Структура систем мониторинга воздушных электросетей

В настоящее время во всем мире находят широкое применение различные системы мониторинга воздушных ВЛ, обеспечивающие системного оператора подробными сведениями о текущем состоянии воздушных кабельных сетей электроснабжения. Система мониторинга состоит из сети измерительных блоков, связанных через канал связи с оборудованием на диспетчерском пункте. Измерительные блоки распределены вдоль трассы ВЛ и монтируются на опорах либо непосредственно на высоковольтных проводах.

Диспетчерские пункты расположены в узловых точках сетей перераспределения энергии. В настоящее время в них, как правило, используются системы SCADA, обеспечивающие обработку и интерпретацию полученных от измерительных блоков данных.

В измерительный блок входят следующие базовые компоненты:

- группа датчиков для измерения основных текущих параметров проводной линии;
- процессорный модуль для обработки измеренных данных;
- система передачи данных;
- модуль автономного питания.

В зависимости от функционального назначения, в системах мониторинга могут использоваться следующие типы датчиков:

- для измерения тока в проводе;
- температуры провода в пролете;
- механического напряжения провода в точках подвеса (тензодатчики);
- для измерения затухания в оптических волокнах грозотроса или фазного провода;
- для измерения критических стрел провеса;
- климатических условий (метеостанция);
- вибрационных характеристик проводов (акселерометры).

Измерение тока осуществляется бесконтактным методом, для чего используются датчики на основе эффекта Холла или катушки Роговского [81].

Система питания автономных измерительных блоков

В настоящее время для питания измерительных блоков систем мониторинга воздушных линий (ВЛ) используется два варианта. Для измерительных систем, размещаемых на мачтах опор ВЛ, как правило, используются аккумуляторные батареи, подзаряжаемые от солнечных батарей. Для измеритель-

ных модулей, монтируемых непосредственно на проводах ВЛ, питание производится от токового трансформатора.

Токовый трансформатор преобразует энергию непосредственно из провода ВЛ. В качестве источника возбуждения (первичная обмотка трансформатора) используется токонесущий провод ВЛ. Вторичная обмотка трансформатора – тороидальная катушка с ферромагнитным сердечником. Модуль индукционного источника питания состоит из токового трансформатора, выпрямителя, аккумулятора энергии (ионистора) и преобразователя напряжения, который обеспечивает работу всех цифровых и аналоговых узлов измерителя [10].

Канал передачи данных

В настоящее время для передачи данных в системах мониторинга ВЛ в основном используются беспроводные каналы связи – это GSM- или же ISM-радиомодемы, работающие на частотах 434, 868 МГц и 2,4 ГГц.

GSM-модемы уже более десяти лет используются на рынке средств АСУ ТП, в том числе и для передачи данных в системах мониторинга. У первых моделей возможности были ограничены передачей SMS-сообщений и данных в аналоговом режиме. Работа таких устройств в режиме аналогового модема обеспечивает скорость передачи данных всего 9,5 кбод, а оплата производится в соответствии со временем нахождения в сети. Система GPRS реализует пакетную коммутацию на всем протяжении канала связи, существенно оптимизируя услуги передачи данных в сетях стандарта GSM. Она практически мгновенно устанавливает соединения, использует сетевые ресурсы и занимает участок диапазона частот только в моменты фактической передачи данных, что гарантирует чрезвычайно эффективное использование доступной полосы частот. GPRS предоставляет услугу многоточечной передачи (мультивещания) между провайдером определенной сети и группой мобильных абонентов с терминалами GPRS. Для GPRS необходима оплата трафика, которая начисляется только за объем переданной и принятой информации, а не за время нахождения модема в состоянии приема/передачи.

Для передачи данных от модулей измерителей в сервер системы мониторинга может быть использована беспроводная сеть, созданная на основе радиомодемов xBee компании Digi. В настоящее время выпускаются трансиверы на частоты 868 МГц и 2,4 ГГц. Трансиверы обеспечивают дальность передачи данных в прямой видимости до 4 км. На базе сети трансиверов ZigBee с топологией Backbone можно организовать эстафетную передачу данных по сети между измерителями к серверу данных системы мониторинга. Направление передачи в сети передачи вдоль ВЛ всегда задано в сторону сервера. Для повышения надежности предусмотрена возможность альтернативного обхода проблемного узла, блокирующего связь по цепочке.

Состояние проводов и изоляции ВЛ

В процессе эксплуатации может происходить повреждение и износ проводов, а также загрязнение и пробой изоляторов. При этом возникают межфазные утечки и замыкания, а также замыкания на землю. Кроме того, за счет старения проводов при нагревании протекающим током может происходить критическое провисание и касание проводов как земли, так и объектов рельефа. Большую часть повреждений воздушных линий составляют короткие замыкания и обрывы проводов. При этом определение места повреждения и восстановление поврежденных участков электролиний сети являются наиболее сложными и длительными операциями. Короткие замыкания и обрывы приводят к значительным потерям электроэнергии.

Пропускная способность ВЛ ограничивается нагревом проводов и устойчивостью электропередачи. Причем с увеличением длины линий второй фактор (устойчивость) определяет предел передаваемой мощности. Провисание провода, характеризуемое стрелой провеса, в пролете ВЛ возникает вследствие удлинения провода при нагревании и зависит как температуры воздуха, так и от нагревания самого провода вследствие протекания по нему тока.

В проектной документации на ВЛ указаны допустимые параметры стрелы провеса для каждого пролета трассы. Стрела провеса может опреде-

ляться как с помощью тензодатчиков, расположенных на опорах в точках подвеса проводов, так и косвенно, по данным датчиков акселерометров измерительных модулей, смонтированных непосредственно на проводе. При этом также учитываются температуры окружающего воздуха и провода и величина тока через провод. Наличие этих данных позволяет определять опасные режимы эксплуатации проводов в пролетах и при необходимости изменять ресурс допустимой токовой нагрузки.

Гололед на проводах ВЛ

Обледенение также представляет собой угрозу для ВЛ, а снежный буран может стать тяжелым испытанием для обеспечения работоспособности системы. Гололедно-изморозевые отложения на проводах и тросах ВЛ происходят при температуре воздуха около $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости ветра 5–10 м/с. Гололед обуславливает дополнительные механические нагрузки на все элементы ВЛ. При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор ВЛ. Гололед является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию. Наличие гололеда можно определить при оценке совокупности данных, полученных от метеодатчиков, тензодатчиков подвеса и акселерометров.

Коронный разряд на проводах

Коронный разряд возникает в резко неоднородных полях, в которых ионизационные процессы могут происходить в узкой области вблизи электродов. К такого рода полям относится и электрическое поле проводов воздушных ВЛ. Эта высокочастотная составляющая тока короны является источником интенсивного электромагнитного излучения с широким спектром частот, которое создает помехи радио- и телевизионному приему. Потери на корону для линий различных напряжений имеют свои значения (для линии ВЛ 500 кВ среднегодовые потери на корону составляют около 9–11 кВт/км). Наличие коронного разряда может определяться посредством спектрального

анализа совокупности токовых сигналов, синхронизированных с временными метками GPS [10].

Влияние гармоник

Одной из основных проблем при транспортировке электроэнергии является влияние высших гармоник напряжения и тока на элементы систем электроснабжения. Несинусоидальные токи в элементах электрической сети вызывают добавочные потери мощности и электроэнергии. Величина этих потерь зависит от степени искажения синусоидальности. Основной вклад в потери вносят 3-я, 5-я и 7-я гармоники.

Величина добавочных потерь в линии определяется такими факторами, как гармоническим составом и величиной токов высших гармоник, их распределением вдоль трассы линии, сопротивлениями проводов и тросов. Высокий уровень добавочных потерь активной мощности и энергии говорит о наличии резонансных процессов в линиях, что приводит к ухудшению качества передаваемой электроэнергии и снижению срока службы электрооборудования сети.

Анализ гармоник тока позволяет выявлять утечки и замыкания, а также локализовать их на уровне сегментов сети. Выявление резонансных явлений в топологии сети позволяет принять меры для лучшего согласования с нагрузкой и уменьшить потери энергии в сетях при транспортировке [10].

Примеры коммерческих систем мониторинга воздушных сетей ВЛ

В настоящее время в нашей стране и за рубежом используется ряд коммерческих систем мониторинга воздушных электросетей, ориентированных на решение определенных задач. Рассмотрим структуры типовых систем мониторинга, которые отличаются не только функциональными характеристиками, но и ценой, а также способом монтажа на ВЛ.

Одной из первых коммерческих систем мониторинга проводов ВЛ стала система CAT-1, разработанная в 1991 г. американской компанией The Valley Group, Inc. В настоящее время во всем мире используется свыше 300 систем мониторинга CAT-1. Система обеспечивает мониторинг в реальном

времени погодных условий и натяжения проводов в точках крепления к опорам. Основной модуль системы монтируется на опоре ВЛ и весит порядка 50 кг. Датчики измерения натяжения проводов представляют собой тензодатчики в корпусе из нержавеющей стали с крепежными отверстиями и устанавливаются между изолятором и опорой. Основой тензодатчиков является измерительный преобразователь. Основной модуль САТ-1 состоит из влагостойкого алюминиевого корпуса с блоком электроники, встроенного модема, антенн для передачи данных и крепежных элементов. Модуль предназначен для эксплуатации в диапазоне температур окружающей среды $-40\dots+60$ °С. Для обеспечения непрерывной работы основного модуля используется модуль питания, состоящий из аккумуляторной батареи напряжением 12 В, зарядного устройства и панели солнечной батареи [16].

Несмотря на простоту измерений, система за счет использования патентованных алгоритмов анализа обеспечивает выявление и расчет многих полезных параметров ВЛ, например, стрелы провеса, токовой пропускной способности линии и даже наличия гололеда на проводах.

В настоящее время получила широкое распространение и другая концепция реализации измерительного модуля, использующая бесконтактные измерители тока и температуры провода. Данная концепция использована в системах мониторинга ОТЛМ (Over head Transmission Line Monitoring), осуществляющих мониторинг пропускной способности ВЛ.

В отличие от системы мониторинга САТ-1, измерительный модуль ОТЛМ конструктивно монтируется на высоковольтный провод. Измерение тока в проводе и питание модуля осуществляется бесконтактно. Питание прибора производится от энергии, получаемой от провода через токовый трансформатор. Система ОТЛМ обеспечивает в реальном времени измерение температуры и тока проводов [16].

Основные характеристики измерительного модуля ОТЛМ:

- диаметр капсулы 305 мм, длина 300 мм;
- вес капсулы: 10 кг;
- диапазон применения на линиях ВЛ: до 420 кВ;
- частота: 50 Гц;

- диаметр токонесущего провода: 10 – 50 мм;
- диапазон рабочих токов: 50 – 1100 А;
- диапазон измерения температуры провода: от –40 °С до +125 °С;
- диапазон рабочих температур: от –40 °С до +70 °С;
- точность измерения температуры: до 1 °С;
- канал передачи данных: GSM (900/1100/1800/1900 МГц);
- протокол передачи: SMS/GPRS.

Устройство измеряет ток в проводе и температуру провода в фиксированных точках. Прибор имеет крепление для монтажа непосредственно на провод. Источник питания – встроенный токовый трансформатор. Получаемая энергия используется для питания всего устройства. Никаких внешних источников питания не требуется. Также в приборе используется GPS-приемник. Измеренные значения тока и температуры привязаны, таким образом, к конкретным координатам положения блока на ВЛ и меткам точного времени. Данные измерений периодически передаются в диспетчерский пункт, оборудованный системой SCADA, через стандартный IEC-протокол. Данные доступны через веб-браузер.

Методы локализации токов утечки и КЗ в ВЛ

Линии электрических сетей с большими токами замыкания на землю характеризуются достаточно большой протяженностью. Методы и средства ОМП здесь основаны на измерении и запоминании параметров аварийного режима и вычислении расстояния до мест повреждения. Обработка результатов измерения выполняется уже после отключения линии релейной защитой. Одновременная фиксация аварийного сигнала до отключения источника питания ВЛ устройствами контроля тока и напряжения в проводе воздушной ВЛ и совместная обработка результатов измерений предлагаемыми способами позволяет быстро и достаточно просто определить место повреждения. Метод основан на регистрации системой синхронизированных от GPS датчиков тока и напряжения времени прохождения скачка фазного напряжения. Значения временных меток передаются в диспетчерский центр для обработки, где определяется сегмент поврежденной проводной сети. Анализируется аварийный сигнал, в котором выделяют одиннадцатую гармонику. Анализ

фазовой характеристики вдоль линии передачи позволяет локализовать место аварии [10, 70, 83].

1.4 Постановка цели и задач исследования

В результате проведенного аналитического обзора была поставлена следующая цель исследования – расширение функциональных возможностей информационно-измерительной системы для диагностики текущего состояния изоляторов воздушных линий электропередач на основе разработанных математической модели измерения тока утечки, метода фиксации частичных разрядов и метода измерения механической нагрузки на изолятор.

Для достижения указанной цели ставятся следующие задачи:

1. Аналитический обзор информационно-измерительных систем для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.
2. Разработка обобщенной структуры информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.
3. Построение математической модели измерения тока утечки.
4. Разработка метода фиксации разрядов на изоляторах ВЛ.
5. Разработка метода измерения механической нагрузки на изолятор (гололедообразование).
6. Экспериментальные исследования по оценке соответствия выходных параметров математических моделей и методов и промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

2 РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

2.1 Принципы построения информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач

Для построения информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач необходимо выполнение следующих основных процедур:

- выделение объекта наблюдения и его обследование;
- определение информационной модели для выделенного объекта;
- планирования измерений;
- анализ состояния объекта наблюдения и идентификация его информационной модели;
- прогнозирование изменения состояния объекта наблюдения;
- представление информации в удобной для использования форме и доведение ее до потребителя.

Информационно-измерительная система дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач представляет собой совокупность математических методов, методов программирования и технических средств (ЭВМ, средств связи, устройств отображения информации, передачи данных и т.д.), обеспечивающих рациональное управление сложным объектом (например, предприятием, технологическим процессом). Наиболее важная цель построения информационно-измерительной системы – резкое повышение эффективности управления объектом на основе роста производительности управленческого труда и совершенствования методов принятия управленческих решений [41-43].

Разработка информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач, порядок ее создания и направления эффективного использования базировались на следующих принципах:

- 1) принцип новых задач, это задачи оптимального управления, которые можно решать, используя возможности вычислительной техники;
- 2) принцип комплексного, или системного подхода, в соответствии с которым необходимо комплексно решать вопросы технического, экономического и организационного характера;
- 3) принцип первого руководителя предполагает, что разработка информационно-измерительных систем должна проводиться при участии и под руководством директора предприятия или руководителей функциональных служб;
- 4) принцип непрерывного развития системы, в соответствии с которым количество решаемых задач непрерывно увеличивается, причем новые задачи не заменяют уже внедренные;
- 5) принцип модульности и типизации, заключающийся в выделении и разработке независимых частей системы и использовании их в различных подсистемах;
- 6) принцип согласованности пропускных способностей отдельных частей системы, для обеспечения максимальной производительности системы в целом;
- 7) принцип автоматизации документооборота и единой информационной базы.

Принципы построения информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач зависят от потребностей и условий конкретной организации. Структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач обладает следующими свойствами:

- всесторонность – мониторинг должен быть всесторонним, основываться на простых и сводных измерениях, фокусируясь на исключениях;
- соответствие – мониторинг должен соответствовать миссии, видению, целям и стратегии предприятия;
- приемлемость – эффективный метод мониторинга должен быть приемлем для его объектов, необходимо уважать их личное пространство и не вторгаться в повседневные обязанности;
- своевременность – данные мониторинга должны быть доступны, позволяя выявлять отклонения, о которых надо немедленно сообщить для принятия верных и оперативных решений;
- доказательность – информация, полученная в ходе мониторинга, должна поддаваться проверке другими средствами, то есть быть точной и, по возможности, основанной на фактах;
- динамичность – любая форма мониторинга должна допускать оперативные корректирующие меры;
- гибкость (адаптируемость) – система мониторинга должна легко адаптироваться, обеспечивая точную, значимую и своевременную информацию в изменяющихся обстоятельствах.

2.2 Обобщенная структура информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач

Информационно-измерительная система диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач состоит из основы и функциональной части. Основу составляют информационная база, техническая база, математическое обеспечение, организационно-экономическая база. Основа – общая часть для всех задач, решаемых информационно-измерительными системами.

Информационная база информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, размещенная на машинных носителях информации – совокупность всех данных, необходимых для автоматизации управления объектом или процессом.

Техническая база информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач включает средства обработки, сбора и регистрации, отображения и передачи данных, а также исполнительные механизмы, непосредственно воздействующие на объекты управления (например, автоматические регуляторы, датчики и т.д.), обеспечивающие сбор, хранение и переработку информации, а также выработку регулирующих сигналов во всех контурах автоматизированного управления производством.

Основные элементы технической базы – ЭВМ, которые обеспечивают накопление, хранение и обработку данных, циркулирующих в информационно-измерительных системах. ЭВМ позволяют оптимизировать параметры управления, моделировать производство, подготавливать предложения для принятия решения. Обычно выделяют два класса ЭВМ, используемых в информационно-измерительных системах: информационно-расчётные и учётно-регулирующие.

Средства сбора и регистрации данных при участии человека включают различные регистраторы производства, с помощью которых осуществляются сбор и регистрация данных непосредственно на рабочих местах.

Средства отображения информации предназначены для представления результатов обработки информации в удобном для практического использования виде. К ним относятся различные печатающие устройства, пишущие машины, терминалы, экраны, табло, графопостроители, индикаторы и т.п. Эти устройства, как правило, непосредственно связаны с ЭВМ или с регистраторами производства и выдают либо регулярную (регламентную), либо

эпизодическую (по запросу или в случае аварийной ситуации) справочную, директивную или предупредительную информацию.

Аппаратура передачи данных осуществляет обмен информацией между различными элементами информационно-измерительных систем.

К технической базе информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач относят также средства оргтехники (копировально-множительную технику, картотеки, диктофоны и т.д.), а также вспомогательные и контрольно-измерительные средства, обеспечивающие нормальное функционирование основных технических средств в требуемых режимах.

Математическое обеспечение информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач представляет собой комплекс программ регулярного применения, управляющих работой технических средств и функционированием информационных баз и обеспечивающих взаимодействие человека с техническими средствами информационно-измерительных систем. Пакеты типовых прикладных модулей могут использоваться в различных комбинациях при решении той или иной функциональной задачи.

Функциональная часть информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач состоит из набора взаимосвязанных программ для реализации конкретных функций управления. Все задачи функциональной части базируются на общих для данной информационно-измерительной системы информационных массивах и на общих технических средствах. Включение в систему новых задач не влияет на структуру основы и осуществляется посредством типового для информационно-измерительных систем информационного формата и процедурной схемы. Функциональная часть информационно-измерительных систем поделена на подсистемы в соответствии с основными функциями управления объектом. Подсистемы в свою очередь делят на ком-

плексы, содержащие наборы программ для решения конкретных задач управления в соответствии с общей концепцией системы [41-43].

Обобщенная структура информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач представлена на рисунке 2.2.1.

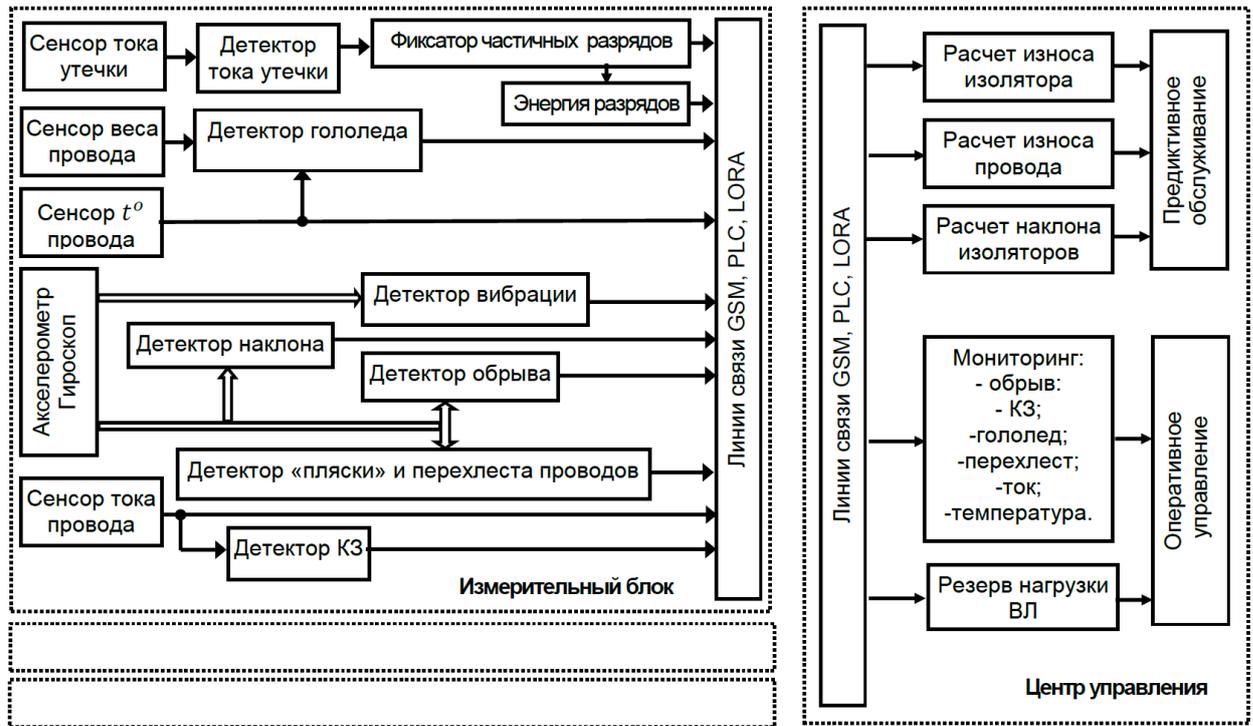


Рисунок 2.2.1 – Обобщенная структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач

Обобщенная структура информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач включает:

- модуль дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач в реальном времени; модуль размещается непосредственно на контролируемой линии и выполняет следующие функции: измерение температуры высоковольтных линий; измерение силы тока в проводе; определение угла провеса стрелы; измерение амплитуды и частоты вибрации; обрыв провода на линии в пролете; передача информационных данных по

каналам GSM/Радиоканал; информирует о следующих явлениях: обрыв провода в пролёте между опорами; «пляска проводов» перехлест проводов; гололёдообразование; фиксация КЗ на линиях с глухозаземлённой нейтралью, со снятием осциллограммы события.

- модуль сбора и передачи данных дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач; в модуль входят следующие базовые компоненты: группа датчиков для измерения основных текущих параметров проводной линии; процессорный модуль для обработки измеренных данных; система передачи данных; модуль автономного питания. В зависимости от функционального назначения в системах мониторинга могут использоваться различные типы датчиков: для измерения тока в проводе; температуры провода в пролете; механического напряжения провода в точках подвеса (тензодатчики); для измерения затухания в оптических волокнах грозотроса или фазного провода; для измерения критических стрел провеса; климатических условий (метеостанция); вибрационных характеристик проводов (акселерометры).

- диспетчерский центр электросетевой компании, на котором происходит регистрация событий; отображение оперативной и архивной информации оперативному персоналу (в том числе с выводом на диспетчерский щит) и руководству компании; технологическая сигнализация, обеспечивающая извещение о возникновении нарушений; диагностика достоверности принимаемой информации; формирование печатных документов и архивирование информации (в виде трендов, отчетных ведомостей, протоколов событий).

Информационно-измерительная система для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач содержит измерительные блоки, установленные на каждой фазе линии электропередач. Каждый блок содержит набор датчиков, трансформатор тока, задатчики значений, блоки сравнения, акселерометры по трем осям относительно провода, фильтры выделения вибрации и «пляски» проводов, блоки памяти, идентификатор фазы, блок мониторинга опоры с датчиком падения опоры и акселерометра-

ми по трем осям относительно опоры, блоки фиксации предельного наклона опоры, первичной фильтрации ускорений, форсирующие блоки, делители ускорений, перестраиваемые полосовые фильтры, блоки фиксации удара. Блок сбора данных и первичной диагностики содержит регистры значений тока фаз, сумматоры, блоки разности токов, задатчики предаварийного мониторинга, корректоры оценки гололедообразования, фиксаторы амплитуд вибрации по осям, сумматор амплитуд вибрации, задатчики уровней аварийных отклонений, предупреждения по амплитуде и углу колебаний, фиксации удара и предупреждения по механическому воздействию, блоки вычисления арктангенсов, идентификатор опоры высоковольтной линии, концентраторы с приемопередатчиками для связи между информационно-измерительными блоками и центром управления энергоснабжающей организации (ЦУ ЭО).

Ток измеряется трансформатором тока, ток утечки и текущий ток – специализированным гибким трансформатором, механическая нагрузка – тензодатчиком. Увеличение механической нагрузки возникает, например, при появлении гололедно-изморозных отложений на проводах.

К основным задачам информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач относят:

- непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ;
- запись и хранение информации;
- преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа;
- формирование рекомендаций для принятия управленческих решений.

Как видно из схемы накопление данных на сервере осуществляется с помощью модулей дистанционного мониторинга, соединенных с сервером по различным каналам связи. Кроме того, в системе имеется дополнительное программное обеспечение, установленное на компьютерах пользователя, которое позволяет операторам видеть актуальную информацию о состоянии изоляторов ВЛ [53-55, 63-65].

На рисунке 2.2.2 представлена информационно-измерительная система диспетчерского пункта электросетевой компании.

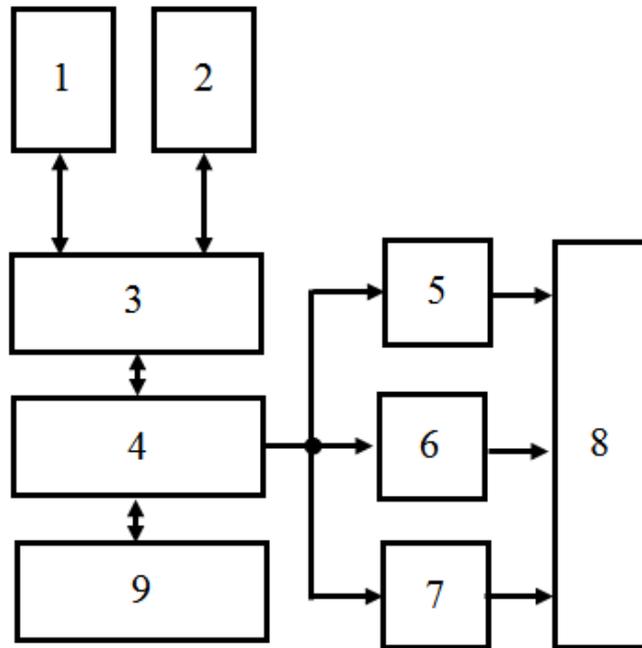


Рисунок 2.2.2 – Информационно-измерительная система диспетчерского пункта электросетевой компании: 1 – блок приема-передачи по радиоканалу; 2 – блок приема-передачи по GSM каналу; 3 – блок выбора канала связи; 4 – блок выработки требований предиктивного обслуживания, оперативного реагирования на предупредительные и аварийные сигналы; 5 – блок предупреждения для проведения предиктивного обслуживания оборудования; 6 – блок предупреждения для отработки предупреждающих сигналов; 7 – блок предупреждения для отработки аварийных сигналов; 8 – блок управления и квитирования требований предиктивного обслуживания, оперативного реагирования на предупредительные и аварийные сигналы; 9 – блок сбора и хранения данных.

На рисунке 2.2.3 показана структурная схема модуля дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач в реальном времени ИИС диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач.

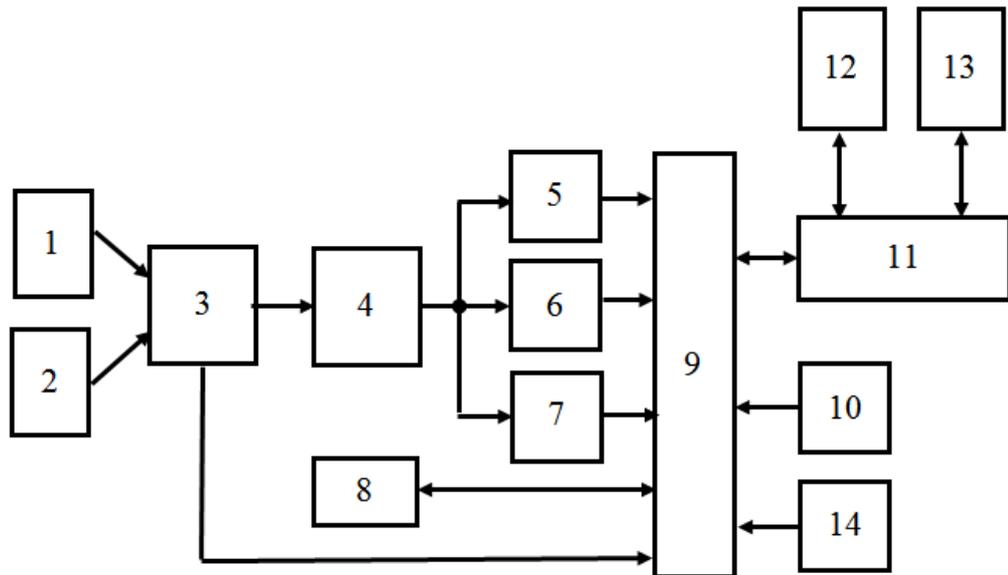


Рисунок 2.2.3 – Структурная схема модуля дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач в реальном времени ИИС диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач: 1 – блок приема-передачи по радиоканалу; 2 – блок приема-передачи по GSM каналу; 3 – блок выбора канала связи; 4 – блок выработки требований предиктивного обслуживания, оперативного реагирования на предупредительные и аварийные сигналы; 5 – блок предупреждения для проведения предиктивного обслуживания оборудования; 6 – блок предупреждения для отработки предупреждающих сигналов; 7 – блок предупреждения для отработки аварийных сигналов; 8 – блок управления и квитирования требований предиктивного обслуживания, оперативного реагирования на предупредительные и аварийные сигналы; 9 – блок сбора и хранения данных; 10 – таймер; 11 – коммутатор мониторинга изоляторов и проводов высоковольтной линии электропередач; 12 – блок мониторинга изолятора высоковольтной линии электропередач; 13 – блок мониторинга провода высоковольтной линии электропередач; 14 – идентификатор модуля.

Структурная схема модуля сбора и передачи данных дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач представлена на рисунке 2.2.4.

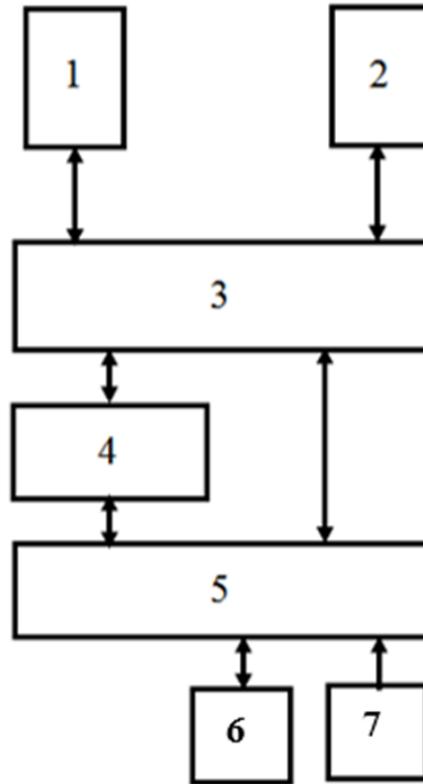


Рисунок 2.2.4 – Структурная схема модуля сбора и передачи данных дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач: 1 – блок приема-передачи по радиоканалу; 2 – блок приема-передачи по GSM каналу; 3 – блок выбора канала связи; 4 – блок выбора приоритета передачи данных; 5 – блок управления модуля дистанционной диагностики параметров высоковольтных линий электропередач; 6 – таймер; 7 – идентификатор модуля.

Вопросы организации передачи данных в информационно-измерительной системе дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач рассмотрены в разделе 2.3.

2.3 Организация передачи данных в информационно-измерительной системе дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач

Следующим этапом является решение проблемы организации передачи данных.

Для решения задачи дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач применяю радиоканалы и сеть GSM. Наиболее эффективно применение сети GSM для организации каналов передачи данных. Это позволит создать единую информационно-измерительную систему дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач с обоснованием загруженности каналов передачи информации, что обеспечит надежность работы системы в целом. Такое решение обеспечивает сбор и хранение информации о местоположении и состоянии изоляторов ВЛ с помощью GPS/ГЛОНАСС и передачу ее с заданной периодичностью с помощью GSM сети в центр информационной системы. Вся информация, отображенная на электронных картах города, области или страны, поступает от всех устройств контроля, которые встроены на объекте [41, 44-45].

Информационно-измерительные системы на основе сети GSM для различных областей применения можно классифицировать по способу передачи информации между центром управления и блоками GSM, установленными на территориально удаленных объектах. Способы передачи могут быть следующими: Voice DATA, SMS, GPRS.

1. Способ передачи информации Voice DATA. Это режим передачи голосовой информации в цифровом виде. В этом режиме технологическая информация передается по соединению «точка-точка».

Достоинство способа состоит в предоставлении наивысшего приоритета данному режиму, отсутствию ограничений в длительности посылок, надежной передачи информации в информационно-измерительной системе.

Недостаток способа состоит в низкой пропускной способности каналов связи, отсутствии возможности одновременного опроса нескольких удаленных объектов.

Применение данного способа в информационно-измерительных системах требует серьезной теоретической проработки и обоснования загруженности каналов передачи информации. Иначе при каких-либо нарушениях технологических параметров работы контролируемого оборудования возможна их перегрузка из-за резкого возрастания потока информации вплоть до полного нарушения работы информационно-измерительной в целом при возникновении нештатных ситуаций на контролируемом оборудовании.

2. Способ передачи информации SMS. Это режим передачи коротких сообщений в виде последовательности байтов информации. В этом режиме информации с контролируемых объектов передается сначала на базовые станции и затем на приемник центра управления.

Достоинство способа состоит в возможности одновременных посылок коротких сообщений от нескольких или всех контролируемых объектов информационно-измерительной системы. При этом условием передачи информации является наличие сотовой связи и регистрация передатчика в сети.

Недостаток способа состоит в ограничении длительности посылок, каждая посылка не может превышать 160 байт, что для целей построения информационно-измерительной системы явно недостаточно. Кроме того, недостатком является низкая пропускная способность каналов связи, невысокая скорость передачи информации, отсутствие возможности одновременного приема коротких сообщений от нескольких удаленных объектов информационно-измерительной системы.

Применение данного способа в информационно-измерительных системах также требует серьезной теоретической проработки и обоснования загруженности каналов передачи информации короткими сообщениями. Имеется опасность при резком возрастании потока коротких сообщений, что характерно для случаев каких-либо нарушений технологических параметров

работы контролируемого оборудования, нарушение работоспособности информационно-измерительной системы в целом.

3. Способ передачи информации GPRS. Это режим передачи данных по IP адресам в сети Интернет. В этом режиме информации с контролируемых объектов передается непосредственно в глобальную сеть Интернет и с использованием протоколов этой сети направляется на приемник центра управления информационно-измерительной системы. Приемник центра управления должен иметь фиксированный IP адрес и постоянно находиться в сети Интернет.

Достоинство способа состоит в возможности одновременных посылок информации от нескольких или всех контролируемых объектов информационно-измерительной системы. При этом условием передачи информации является наличие сотовой связи, регистрация передатчика и нахождение в сети Интернет.

Недостаток способа состоит в проявлении частых потерь сети Интернет в реальных условиях, что снижает надежность информационно-измерительной системы. Кроме того, тарифный план передачи в этом режиме в настоящее время достаточно высок и объем тарификации составляет 100 кБ.

Применение данного способа в информационно-измерительных системах дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач также требует серьезной теоретической проработки и обоснования загруженности каналов передачи информации и оценки вероятности потери связи в сети Интернет. Имеется опасность при резком возрастании потока информации, что характерно для случаев каких-либо нарушений технологических параметров работы контролируемого оборудования, нарушение работоспособности информационно-измерительной системы в целом.

Выбор того или иного способа передачи информации в информационно-измерительной системе дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач зависит от конкретных условий проектирова-

ния информационно-измерительной системы, надежности приема сигналов в сети GSM, загруженности базовых станций на данной конкретной территории расположения контролируемых объектов [142].

Во всех случаях необходимо проводить обоснованную оценку загруженности каналов до подключения информационно-измерительной системы к сети GSM. На основе этой оценки проводить теоретические исследования и моделирование возможных потоков запросов в штатном и аварийном режимах удаленных объектов на предмет обеспечения своевременной их обработки для обеспечения надежной работы системы в реальном масштабе времени [33].

Передача информации от информационно-управляющих блоков в системе проводится по схеме выделенных каналов (ИБВ). Запросы на обслуживание от ИБВ поступают непосредственно в центр сбора информации (ЦИ). В систему введено устройство управления (УУ), информационно связанное с верхним уровнем и каждым информационно управляющим блоком.

Территориально распределенные информационно управляющие блоки инициируют обмен информацией в случае выхода за допустимые пределы параметров обслуживаемых технологических процессов, в аварийных случаях и по таймеру. При этом потоки запросов существенно различаются.

Проведена классификация запросов и выделены следующие режимы обслуживания запросов: «штатный»; «активность»; «тревога»; «выбор».

В штатном режиме обмен информацией инициализируется в основном таймером информационно управляющего блока и, в меньшей степени, запросами от центра сбора информации. Параметры запросов и обслуживания в этом случае определяются следующими выражениями

$$\lambda = \lambda_{и}; \mu = \mu_{и}; \alpha_{и} = \frac{\lambda_{и}}{\mu_{и}}, \quad (2.3.1)$$

где λ_j – плотность потока запросов на обслуживание, генерируемого j -м источником; μ_j – плотность потока обслуживаний, генерируемого j -м каналом.

Приведенная плотность запросов α_u и вероятность отказа $p_{u.омк.}$ на обслуживании от I информационно-измерительных блоков в схеме с шинной организацией сбора информации, каждый из которых генерирует запросы по экспоненциальному закону с плотностью λ_{ui} , определяются выражениями

$$\alpha_u = \frac{\sum_{i=1}^I \lambda_{ui}}{\mu_u} ; p_{u.омк.} = \frac{\sum_{i=1}^I \lambda_{ui}}{\mu_u + \sum_{i=1}^I \lambda_{ui}} . \quad (2.3.2)$$

Параметры обслуживания запросов от J информационно управляющих блоков в схеме с выделенными каналами соответственно определяются соотношениями

$$p_{uj} = \frac{\frac{\alpha_u^j}{j!}}{\sum_{j=0}^J \frac{\alpha_u^j}{j!} + \frac{\alpha_u^J}{J!} \sum_{m=1}^M \left(\frac{\alpha_u}{J}\right)^m} , 0 \leq j \leq J ; \quad (2.3.3)$$

$$p_{uJ+m} = \frac{\frac{\alpha_u^j}{J!} \left(\frac{\alpha_u}{J}\right)^m}{\sum_{j=0}^J \frac{\alpha_u^j}{j!} + \frac{\alpha_u^J}{J!} \sum_{m=1}^M \left(\frac{\alpha_u}{J}\right)^m} , 1 \leq m \leq M . \quad (2.3.4)$$

В режиме повышенной активности, информационно управляющие блоки инициируют обмен информацией, в основном, в случае выхода контролируемых параметров за допустимые пределы в обслуживаемых технологических процессах, то есть контролируется ход технологического процесса. Поток запросов $\lambda = \lambda_a$ существенно возрастает и зависит от степени нарушения хода технологического процесса. Информационно-управляющая система выбирает значение $\mu = \mu_a$ и через устройство управления дает команду перехода в режим «повышенная активность» информационно управляющим блокам системы, которые сокращают количество и емкость посылок в соответствии.

В результате не допускается значительное возрастание параметра

$$\alpha_a = \sum_{i=1}^I \lambda_{ai} / \mu_a.$$

В режиме «тревога», обмен информацией инициируется при резком возрастании количества запросов от множества блоков. Такое явление наблюдается при возникновении крупных аварийных ситуаций, например одновременное прекращение подачи электроэнергии многим предприятиям на значительной территории, резкое падение давления газа в трубопроводах и т.п. Происходит лавинообразный рост потока запросов, система не справляется с их обслуживанием.

Для ликвидации подобного явления информационно-измерительная система через устройство управления изменяет формат посылок и запрещает передачу повторяющихся посылок множеству информационно управляющих блоков, расположенных на территории, где развивается аварийная ситуация,

$$\lambda = \lambda_m, \mu = \mu_m, \alpha_m = \sum_{i=1}^I \lambda_{mi} / \mu_m.$$

В режиме «выбор» для сохранения работоспособности информационно-измерительной системы через устройство управления запрещается передача подача запросов от информационно управляющих блоков. Все запросы инициируются центром сбора информации.

Алгоритм выбора режимов работы информационно управляющей системы в данных режимах приведен на рисунке 2.3.1.

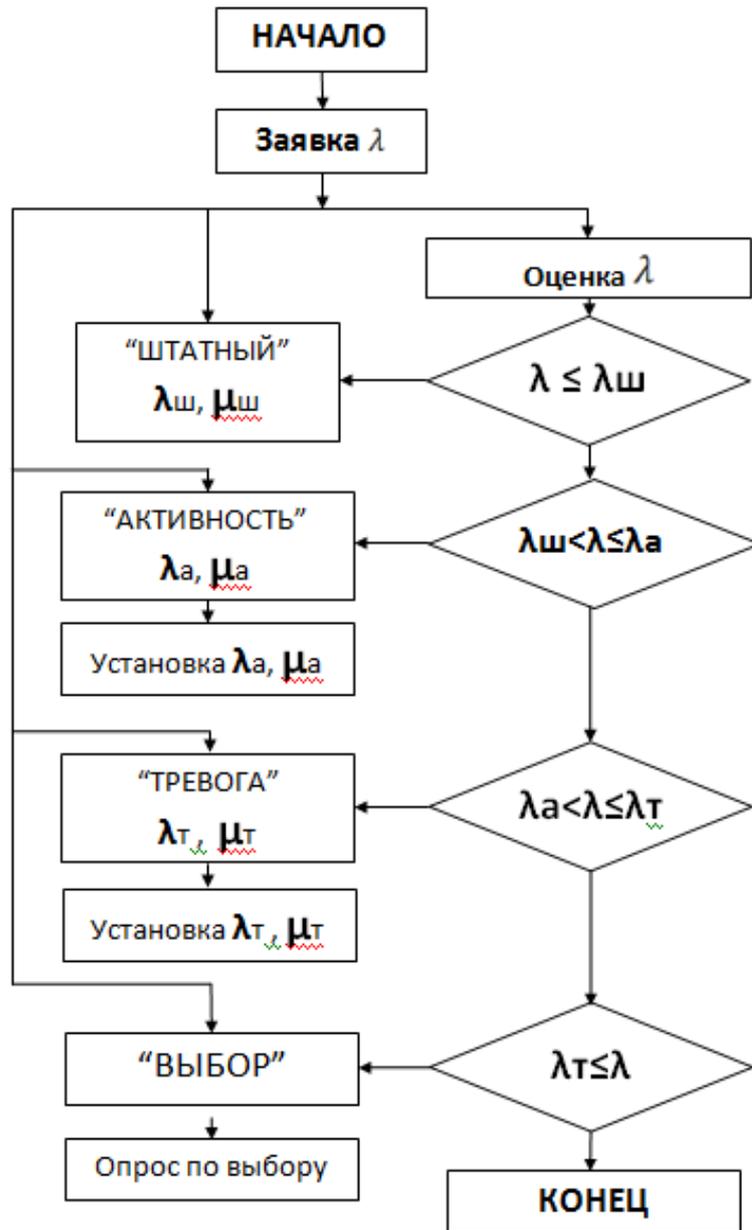


Рисунок 2.3.1 – Алгоритм выбора режимов работы информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач

Временные диаграммы работы в режимах «штатный», «активность» и «тревога» приведены на рисунке 2.3.2.

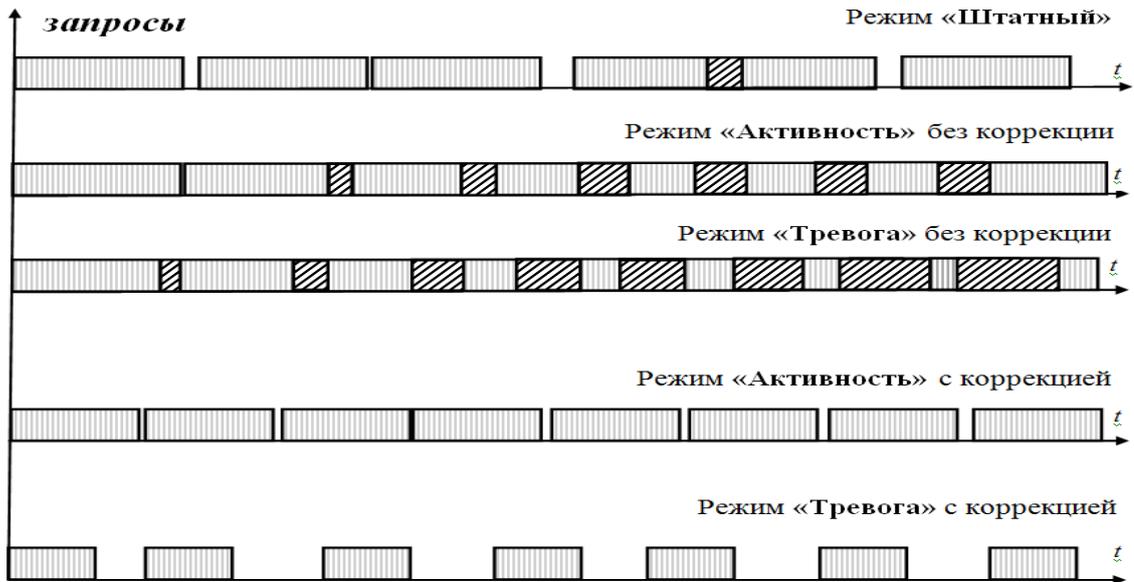


Рисунок 2.3.2 – Временные диаграммы работы: режимы «штатный», «активность», «тревога»

График отработки информационно-измерительной системой дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач потока запросов в режимах «штатный», «активность», «тревога» без коррекции (1) и с коррекцией (2) запросов приведено на рисунке 2.3.3.

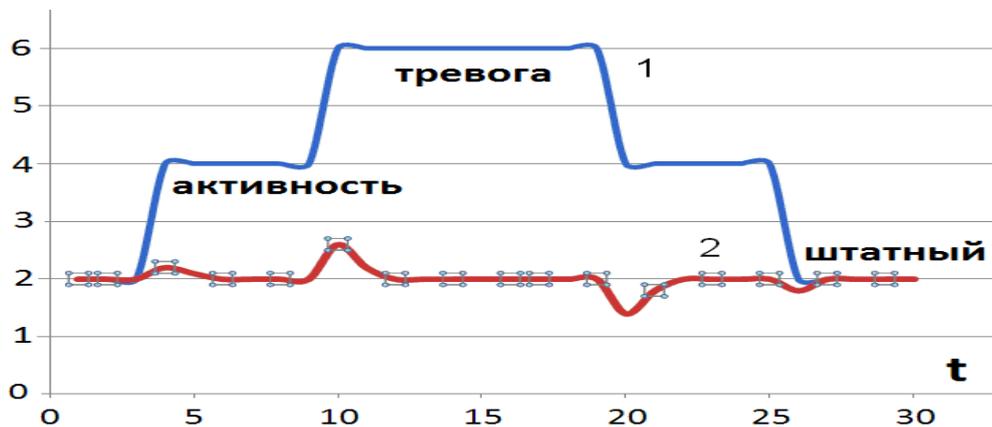


Рисунок 2.3.3 – График отработки потока запросов без коррекции (1) и с коррекцией (2) запросов

2.4 Выводы по главе

В данной главе разработана обобщенная структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, к основным задачам которой относят непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ, запись и хранение информации, преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа, формирование рекомендаций для принятия управленческих решений.

Передача информации от информационно-управляющих блоков в системе проводится по схеме выделенных каналов. Запросы на обслуживание поступают непосредственно в центр сбора информации. Представлена классификация запросов в информационно-измерительной системе и алгоритм выбора режимов работы.

3 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА УТЕЧКИ

3.1 Определение входных и выходных переменных математической модели измерения тока утечки

Мониторинг изоляторов проводится посредством измерения величины токов утечек через изоляторы. Токи утечек замеряются высокочувствительными трансформаторами тока.

Блок дистанционного мониторинга изоляторов проводит фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов. Данные параметры позволяют провести косвенную оценку состояния изоляторов и принять меры по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций [12, 29-33, 58, 95, 96].

Определим входные и выходные переменные математической модели измерения тока утечки, принимая следующие обозначения:

i_{ym} – мгновенное значение тока утечки, А;

T_{yT} – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с;

k – порядок отсчета значений переменных при квантовании;

n – номер отсчета значений переменных при квантовании;

T_{IyT} – период передачи данных от модуля интеллектуальной диагностики (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с;

T_C – период сети переменного тока, с;

N – количество отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени;

N_{Tic} – количество отсчетов значений тока утечки i_{ym} на периоде сетевого напряжения;

$K_{ут}(k)$ – расчетный коэффициент превышения тока утечки;

$K_{утф}$ – коэффициент фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов;

$i_{утфн}$ – значения тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов, А;

$i_{ута}(k)$ – абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда, А;

$i_{ут}(k)$ – измеренное текущее значение тока утечки, А;

$i_{утп}$ – пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе, А.

$Ki_{уто}(k)$ – относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе;

$Ki_{уто max}$ – максимальная относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе;

$N_{утп}$ – количество периодических отсчетов, при которых величина тока утечки превышала пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе;

$T_{утп}$ – длительность частичного разряда на изоляторе, с;

$P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт;

$U_{и}$ – напряжение, прикладываемое к изолятору (гирлянде изоляторов), В;

$KDi_{уто max}(m)$ – максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании для m – принятого отсчета от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ;

$T_{и}$ – интервал наблюдений электросетевой компании, с;

M – количество отсчетов (посылок), принятых от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на интервале наблюдений электросетевой компании;

$TD_{\text{утп}}$ – суммарная длительность частичного разряда на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, с;

$TD_{\text{утп отн}}$ – относительная длительность частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, с;

$PD_{\text{утп}}$ – суммарная мощность частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт;

$P_{\text{ут}}$ – мощность каждого частичного разряда, Вт;

$KDi_{\text{уто max доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании;

$TD_{\text{утп отн доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение относительной длительности частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, с;

$PD_{\text{ут доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение суммарной мощности частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт.

3.2 Математическая модель измерения тока утечки

Последовательность мгновенных измеренных значений тока утечки, измеряемых с периодом квантования по времени $T_{\text{ут}}$, запишем в виде

$$i_{\text{ут}}(k), i_{\text{ут}}(k-1), i_{\text{ут}}(k-2), \dots, i_{\text{ут}}(k-N+1), i_{\text{ут}}(k-N), \quad (3.1)$$

где

k – порядок отсчета значений переменных при квантовании с периодом $T_{\text{ут}}$.

Значение N определяется соотношением

$$N = \frac{T_{I_{ут}}}{T_{ут}}. \quad (3.2)$$

где

N – количество отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени;

$T_{I_{ут}}$ – период передачи данных от модуля интеллектуальной диагностики (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с;

$T_{ут}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с.

В результате последовательность (3.1) формируется непосредственно в модуле дистанционного мониторинга изоляторов.

Данная последовательность представляет собой набор отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени, длина последовательности составляет N отсчетов [31-32, 75].

При построении модели фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ формируется числовая последовательность вида

$$i_{ут}(0), i_{ут}(1), i_{ут}(2), \dots, i_{ут}(N_{T_{ic}} - 1), i_{ут}(N_{T_{ic}} - 2), i_{ут}(N_{T_{ic}}), \quad (3.3)$$

причем $i_{ут}(0) = 0$, фиксация перехода синусоидального тока через ноль в положительную область;

$N_{T_{ic}}$ – количество отсчетов значений тока утечки $i_{ут}$ на периоде сетевого напряжения.

$$N_{T_{ic}} = \frac{T_c}{T_{i_{ут}}}, \quad (3.4)$$

где

T_c – период сети переменного тока, с;

$T_{i_{ут}}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с.

Фиксацию динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ производим на основе анализа изменения связанных отсчетов тока на соседних периодах сети.

Для этого формируются две последовательности отсчетов тока утечки, сдвинутые на один период.

Последовательность отсчетов тока утечки текущего периода имеет вид

$$i_{ут}(0), i_{ут}(1), i_{ут}(2), \dots, i_{ут}(N_{T_{ic}} - 1), i_{ут}(N_{T_{ic}} - 2), i_{ут}(N_{T_{ic}}). \quad (3.5)$$

Последовательность отсчетов тока утечки предыдущего периода представим в виде

$$\begin{aligned} i_{ут}(N_{T_{ic}}), \quad i_{ут}(N_{T_{ic}} + 1), \quad i_{ут}(N_{T_{ic}} + 2), \dots, i_{ут}(N_{T_{ic}} + 3), \\ i_{ут}(N_{T_{ic}} + N_{T_{ic}}). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Проводим сравнение связанных отсчетов тока утечки на соседних периодах сети

$$K_{ут}(k) = \frac{i_{ут}(k)}{i_{ут}(N_{T_{ic}} + k)} \quad \text{для } k \in (1, N_{T_{ic}}), \quad (3.7)$$

где

$K_{ут}(k)$ – расчетный коэффициент превышения тока утечки.

Полученный расчетный коэффициент превышения тока утечки сравнивается коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов $K_{утф}$.

Если

$$K_{ут}(k) > K_{утф}, \quad (3.8)$$

то вырабатывается сигнал фиксации динамики нарастания тока утечки изолятора $K_{утфн}$, на котором установлен модуль интеллектуальной диагностики изоляторов.

При соблюдении условия (3.8) модуль интеллектуальной диагностики изоляторов формирует последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов [88]

$$i_{утфн}(0), i_{утфн}(1), i_{утфн}(2), \dots, i_{утфн}(N_{T_{ic}} - 1), i_{утфн}(N_{T_{ic}} - 2), i_{утфн}(N_{T_{ic}}), \quad (3.9)$$

где

$i_{утфн}$ – значения тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов.

Модуль интеллектуальной диагностики изоляторов передает полученную последовательность в диспетчерский пункт электросетевой компании с установленным периодом передачи данных.

В диспетчерском пункте электросетевой компании формируют общую последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов, и используют для анализа работы и диагностики изоляторов.

3.3 Метод фиксации частичных разрядов

Фиксация частичных разрядов, оценка их мощности и повторяемости рассчитывается с помощью разработанного метода фиксации частичных разрядов, который позволяет своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения [88, 133-135].

Фиксация разрядов на изоляторах осуществляется на входных данных, представляющих собой последовательность тока утечки на некотором интер-

$$\text{вале } N = \frac{T_{\text{ут}}}{T_{\text{ут}}}$$

$$i_{\text{ут}}(k), i_{\text{ут}}(k-1), i_{\text{ут}}(k-2), \dots, i_{\text{ут}}(k-N+1), i_{\text{ут}}(k-N). \quad (3.10)$$

Метод заключается в следующем:

1. Для фиксации разрядов на изоляторах вводится пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе $i_{\text{утп}}$.

Если измеренное значение тока утечки $i_{\text{ут}}(k)$, ниже порогового значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{\text{утп}}$, то принимается, что частичного разряда на изоляторе не произошло.

2. Условие фиксации разрядов на изоляторах представляется в виде неравенства

$$i_{\text{ут}}(k) > i_{\text{утп}} \quad . \quad (3.11)$$

При соблюдении данного неравенства блок дистанционного мониторинга изоляторов принимает решение о проявлении частичного разряда на изоляторе.

Параметры частичного разряда на изоляторе фиксируются через величину превышения тока утечки в абсолютной и относительной величинах, а также длительности частичного разряда и выделяемой мощности каждого частичного разряда.

3. Определяется абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда на изоляторе

$$i_{\text{ута}}(k) = i_{\text{ут}}(k) - i_{\text{утп}} \quad (3.12)$$

где

$i_{\text{ута}}(k)$ – абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда, А;

$i_{\text{ут}}(k)$ – измеренное текущее значение тока утечки, А;

$i_{\text{утп}}$ – пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе, А.

4. Фиксируется параметр частичного разряда на изоляторе, характеризующий во сколько раз возрастает величина тока утечки при частичном разряде, как величина относительного превышения тока утечки

$$Ki_{\text{уто}}(k) = \frac{i_{\text{ут}}(k)}{i_{\text{утп}}} \quad (3.13)$$

где

$Ki_{\text{уто}}(k)$ – относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе.

Из последовательности $Ki_{\text{уто}}(k)$ выделяется максимальная $Ki_{\text{уто max}}$ относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе.

Дополнительно параметр частичного разряда на изоляторе фиксируется через длительность частичного разряда.

Для этого при наступлении события для k отсчета, при котором измеренное значение тока утечки $i_{\text{ут}}(k)$ превышает пороговое значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{\text{утп}}$

$$i_{\text{ут}}(k) > i_{\text{утп}} \quad (3.14)$$

5. Запускается счетчик количества отсчетов, при которых соблюдается данное условие

$$N_{\text{утп}} = N_{\text{утп}} + 1 \quad (3.15)$$

и проверяем

$$i_{\text{ут}}(k + 1) > i_{\text{утп}}. \quad (3.16)$$

Затем

$$i_{\text{ут}}(k + 2) > i_{\text{утп}} \quad (3.17)$$

и так далее

$$i_{\text{ут}}(k + 3) > i_{\text{утп}} \quad (3.18)$$

вплоть до спада тока утечки ниже величины порогового значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{\text{утп}}$

$$i_{\text{ут}}(k + N_{\text{утп}}) < i_{\text{утп}}, \quad (3.19)$$

где

$N_{\text{утп}}$ – количество периодических отсчетов, при которых величина тока утечки превышала пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе.

6. Фиксируется длительность частичного разряда на изоляторе уравнением

$$T_{\text{утп}} = N_{\text{утп}} * T_{\text{ут}} \quad (3.20)$$

где

$T_{\text{утп}}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с.

7. Определяется величина, пропорциональная выделяемой мощности каждого частичного разряда, соотношением

$$P_{ут} = \sum_{k=1}^{N_{утп}} U_{и} * i_{ут} (k), \quad (3.21)$$

где

$P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт;

$U_{и}$ – напряжение, прикладываемое к изолятору (гирлянде изоляторов),

В.

Рассчитанные интеллектуальным модулем дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ интегрированные параметры частичного разряда на изоляторе:

$Ki_{уто max}$ – максимальная относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе;

$T_{утп}$ – длительность частичного разряда на изоляторе, с;

$P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт.

В реальном времени передаются в диспетчерский пункт электросетевой компании с установленным периодом передачи данных $T_{I_{ут}}$.

Принятые в диспетчерском пункте электросетевой компании значения параметров частичных разрядов на изоляторах объединяются на продолжительных интервалах времени.

8. На основании данных относительных величин превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе строится функция максимальных значений на интервале наблюдений электросетевой компании

$$KDi_{уто max}(m), KDi_{уто max}(m+1), KDi_{уто max}(m+2), KDi_{уто max}(m+3), \\ KDi_{уто max}(m+M), \quad (3.22)$$

где

$KDi_{\text{уто max}}(m)$ – максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании для m – принятого отсчета от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ;

$T_{\text{н}}$ – интервал наблюдений электросетевой компании, с;

$M = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{Iут}}}$ – количество отсчетов (посылок), принятых от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на интервале наблюдений электросетевой компании $T_{\text{н}}$.

Переданные от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ и принятые в диспетчерском пункте электросетевой компании значения длительности частичного разряда на ре $T_{\text{утп}}$ суммируются на том же интервале наблюдения $T_{\text{н}}$

$$TD_{\text{утп}} = \sum_{m=1}^M T_{\text{утп}}, \quad (3.23)$$

где

$TD_{\text{утп}}$ – суммарная длительность частичного разряда на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании $T_{\text{н}}$.

9. Определяется относительная длительность частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании $T_{\text{н}}$ соотношением

$$TD_{\text{утп отн}} = \frac{1}{T_{\text{н}}} \sum_{m=1}^M T_{\text{утп}}. \quad (3.24)$$

10. Определяется мощность частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании $T_{\text{н}}$ соотношением

$$PD_{\text{ут}} = \frac{1}{T_{\text{н}}} \sum_{m=1}^M P_{\text{ут}}(m), \quad (3.25)$$

где

$PD_{\text{утп}}$ – суммарная мощность частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании $T_{\text{н}}$, Вт;

$P_{ут}$ – мощность каждого частичного разряда, Вт;

$T_{н}$ – интервал наблюдения на сервере электросетевой компании, с.

11. Параметры частичных разрядов на сервере электросетевой компании сравниваются с допустимыми пределами

$$\begin{aligned} KDi_{\text{уто max}} &< KDi_{\text{уто max доп}} \\ TD_{\text{утп отн}} &< TD_{\text{утп отн доп}} \\ PD_{\text{ут}} &< PD_{\text{ут доп}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

где

$KDi_{\text{уто max доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании;

$TD_{\text{утп отн доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение относительной длительности частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании;

$PD_{\text{ут доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение суммарной мощности частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт.

Если полученные неравенства соблюдаются, то сервер электросетевой компании предупреждающих сигналов не вырабатывает. Принимается, что изолятор работает по параметрам частичных разрядов в допустимых пределах.

Если данные неравенства не соблюдаются, что соответствует работе изолятора по параметрам частичных разрядов вне допустимых пределов, то сервер электросетевой компании вырабатывает предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба проверяет состояние указанного изолятора.

3.5 Рекомендации по распределению вычислительной реализации математической модели по каналу измерения тока утечки ВЛ на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании

Математическая модель измерения тока утечки и метод фиксации частичных разрядов реализуются непосредственно на интеллектуальном блоке и на сервере ЦУ ЭО. Выработаны рекомендации по распределению вычислительной реализации разработанной математической модели на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере ЦУ ЭО. Распределение реализаций соотношений математической модели измерения тока утечки в изоляторе и сопутствующих функций приведено в таблице 3.5.1.

Таблица 3.5.1 – Распределение реализаций соотношений математической модели измерения тока утечки в изоляторе и сопутствующих функций между блоком дистанционной диагностики изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании

Реализация соотношений математической модели на блоке дистанционного мониторинга изоляторов	Реализация соотношений математической модели на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
<p><u>Загрузка в модуль дистанционного мониторинга изоляторов постоянных коэффициентов и переменных математической модели от сервера диспетчерского пункта электросетевой компании:</u></p> <p>$i_{ут}$ – мгновенное значение тока утечки, А;</p> <p>$T_{ут}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с;</p> <p>k – порядок отсчета значений переменных при квантовании;</p> <p>n – номер отсчета значений переменных при квантовании;</p> <p>$T_{I_{ут}}$ – период передачи данных от модуля интеллектуальной диагностики (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с;</p> <p>T_C – период сети переменного тока, с;</p> <p>N – количество отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени;</p>	<p><u>Загрузка на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании постоянных коэффициентов и переменных математической модели:</u></p> <p>$T_{I_{ут}}$ – период передачи данных от модуля интеллектуальной диагностики (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с;</p> <p>T_C – период сети переменного тока, с;</p> <p>N – количество отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени;</p> <p>$i_{утп}$ – пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе, А.</p> <p>$T_{утп}$ – длительность частичного разряда на изоляторе, с;</p> <p>$P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт;</p> <p>$U_{и}$ – напряжение, прикладываемое к изолятору (гирлянде изоляторов), В;</p> <p>$KDi_{уто\ max}(m)$ – максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании для m – принятого отсчета от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ;</p>

Продолжение таблицы 3.5.1

Реализация соотношений математической модели на блоке дистанционного мониторинга изоляторов	Реализация соотношений математической модели на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
<p>$N_{T_{ic}}$ – количество отсчетов значений тока утечки $i_{ут}$ на периоде сетевого напряжения;</p> <p>$K_{ут}(k)$ – расчетный коэффициент превышения тока утечки;</p> <p>$K_{утф}$ – коэффициент фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов;</p> <p>$i_{утфн}$ – значения тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом</p>	<p>T_n – интервал наблюдений электросетевой компании, с;</p> <p>M – количество отсчетов (посылок), принятых от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на интервале наблюдений электросетевой компании;</p> <p>$TD_{утп}$ – суммарная длительность частичного разряда на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, с;</p> <p>$TD_{утп\ отн}$ – относительная длительность</p>
<p>фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов, А;</p> <p>$i_{ута}(k)$ – абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда, А;</p> <p>$i_{ут}(k)$ – измеренное текущее значение тока утечки, А;</p> <p>$i_{утп}$ – пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе, А.</p> <p>$Ki_{уто}(k)$ – относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе;</p> <p>$Ki_{уто\ max}$ – максимальная относительная величина превышения тока утечки порогового значения тока</p>	<p>частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, с;</p> <p>$PD_{утп}$ – суммарная мощность частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт;</p> <p>$P_{ут}$ – мощность каждого частичного разряда, Вт;</p> <p>$KDi_{уто\ max\ доп}$ – предельно допустимое максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании;</p> <p>$TD_{утп\ отн\ доп}$ – предельно допустимое максимальное значение относительной длительности частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, с;</p>

Реализация соотношений математической модели на блоке дистанционного мониторинга изоляторов	Реализация соотношений математической модели на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
<p>частичного разряда на изоляторе;</p> <p>$N_{утп}$ – количество периодических отсчетов, при которых величина тока утечки превышала пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе;</p> <p>$T_{утп}$ – длительность частичного разряда на изоляторе, с;</p> <p>$P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт;</p> <p>$U_{и}$ – напряжение, прикладываемое к изолятору (гирлянде изоляторов), В;</p> <p><u>Реализация уравнений математической модели на уровне модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу тока утечки:</u></p> <p>Формирование последовательности мгновенных измеренных значений тока утечки, измеряемых с периодом квантования по времени $T_{ум}$,</p> <p>$i_{ут}(k), i_{ут}(k - 1), i_{ут}(k - 2), \dots, i_{ут}(k - N + 1), i_{ут}(k - N)$.</p> <p>Расчет значения N</p> $N = \frac{T_{Iут}}{T_{ут}}$ <p>Последовательность мгновенных измеренных значений тока утечки формируется непосредственно в</p>	<p>$PD_{ут доп}$ – предельно допустимое максимальное значение суммарной мощности частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт.</p> <p><u>Реализация уравнений математической модели на уровне сервера диспетчерского пункта электросетевой компании:</u></p> <p>По запросам сервера диспетчерского пункта электросетевой компании получение от модуля дистанционной диагностики последовательности мгновенных измеренных значений тока утечки $i_{ут}(k), i_{ут}(k - 1), i_{ут}(k - 2), \dots, i_{ут}(k - N + 1), i_{ут}(k - N)$.</p> <p>Расчет значения N</p> $N = \frac{T_{Iут}}{T_{ут}}$ <p>При выработывании сигнала фиксации динамики нарастания тока утечки изолятора $K_{утфн}$, на</p>

Реализация соотношений математической модели на блоке дистанционного мониторинга изоляторов	Реализация соотношений математической модели на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
<p>модуле дистанционного мониторинга изоляторов.</p> <p>Формирование числовой последовательность вида</p> $i_{ут}(0), i_{ут}(1), i_{ут}(2), \dots, i_{ут}(N_{T_{ic}} - 1),$ $i_{ут}(N_{T_{ic}} - 2), i_{ут}(N_{T_{ic}}),$ $N_{T_{ic}} = \frac{T_c}{T_{i_{ут}}} .$ <p>Фиксация динамики нарастания тока утечки изоляторов производится на основе анализа изменения связанных отсчетов тока на соседних периодах сети.</p> <p>Формируются две последовательности отсчетов тока утечки, сдвинутые на один период.</p> $i_{ут}(0), i_{ут}(1), i_{ут}(2), \dots, i_{ут}(N_{T_{ic}} - 1),$ $i_{ут}(N_{T_{ic}} - 2), i_{ут}(N_{T_{ic}}).$ $i_{ут}(N_{T_{ic}}), i_{ут}(N_{T_{ic}} + 1), i_{ут}(N_{T_{ic}} + 2), \dots,$ $i_{ут}(N_{T_{ic}} + 3), i_{ут}(N_{T_{ic}} + N_{T_{ic}}).$ <p>Сравнение связанных отсчетов тока утечки на соседних периодах сети</p> $K_{ут}(k) = \frac{i_{ут}(k)}{i_{ут}(N_{T_{ic}}+k)} \quad \text{для } k \in (1, N_{T_{ic}}).$ <p>Расчетный коэффициент превышения тока утечки сравнивается коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов</p>	<p>котором установлен модуль дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу тока утечки, модуль формирует последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов, которая передается на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.</p> <p>Сервер диспетчерского пункта электросетевой компании формируют общую последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов и используют для анализа работы и диагностики изоляторов</p> $i_{утфн}(0), i_{утфн}(1), i_{утфн}(2), \dots, i_{утфн}(N_{T_{ic}} - 1),$ $i_{утфн}(N_{T_{ic}} - 2), i_{утфн}(N_{T_{ic}}),$ $N_{T_{ic}} = \frac{T_c}{T_{i_{ут}}} .$ <p>математическая модель фиксации разрядов на изоляторах модуля дистанционного мониторинга изоляторов разрабатывается на входных данных, представляющих собой последовательность тока утечки на некотором интервале</p>

Реализация соотношений математической	Реализация соотношений математической
---------------------------------------	---------------------------------------

модели на блоке дистанционного мониторинга изоляторов	ской модели на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
<p>Если $K_{ут}(k) > K_{утф}$, то вырабатывается сигнал фиксации динамики нарастания тока утечки изолятора $K_{утфн}$, в противном случае формируется последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов.</p> <p>Условие фиксации разрядов на изоляторах модуля дистанционного мониторинга изоляторов представим в виде неравенства $i_{ут}(k) > i_{утп}$.</p> <p>Абсолютная величина превышения тока утечки при фиксации частичного разряда на изоляторе $i_{ута}(k) = i_{ут}(k) - i_{утп}$.</p> <p>Параметр частичного разряда на изоляторе, характеризующий во сколько раз, возрастает величина тока утечки при частичном разряде, фиксируем как величину относительного превышения тока утечки $Ki_{уто}(k) = \frac{i_{ут}(k)}{i_{утп}}$.</p> <p>Для этого при наступлении события для k отсчета, при котором измеренное значение тока утечки $i_{ут}(k)$ превышает пороговое значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$</p>	$N = \frac{T_{Iут}}{T_{ут}}$ $i_{ут}(k), i_{ут}(k-1), i_{ут}(k-2), \dots$ $\dots i_{ут}(k-N+1), i_{ут}(k-N).$ <p>Длительность частичного разряда на изоляторе фиксируем уравнением</p> $T_{утп} = N_{утп} * T_{ут}$ <p>Величина пропорциональная выделяемой мощности каждого частичного разряда определяется соотношением</p> $P_{ут} = \sum_{k=1}^{N_{утп}} U_{и} * i_{ут}(k),$ <p>На основании данных относительных величин превышения тока утечки порогового значения тока частичного разряда на изоляторе, поступивших от интеллектуального модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, строится функция максимальных значений на интервале наблюдений электросетевой компании</p> $KDi_{уто\ max}(m), KDi_{уто\ max}(m+1),$ $KDi_{уто\ max}(m+2), KDi_{уто\ max}(m+3),$ $KDi_{уто\ max}(m+M),$ $M = \frac{T_{п}}{T_{Iут}}.$ $TD_{утп} = \sum_{m=1}^M T_{утп}.$ <p>Относительная длительность частичных разрядов на изоляторах на</p>

Продолжение таблицы 3.5.1

Реализация соотношений математической модели на блоке дистанционного монито-	Реализация соотношений математической модели на сервере диспетчерского
--	--

ринга изоляторов	пункта электросетевой компании
<p>$i_{ут}(k) > i_{утп}$.</p> <p>Запускаем счетчик количества отсчетов, при которых соблюдается данное условие</p> $N_{утп} = N_{утп} + 1$ <p>и проверяем</p> $i_{ут}(k + 1) > i_{утп}$ <p>Затем</p> $i_{ут}(k + 2) > i_{утп} \quad \text{и}$ <p>так далее</p> $i_{ут}(k + 3) > i_{утп}$ <p>вплоть до спада тока утечки ниже величины порогового значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$</p> $i_{ут}(k + N_{утп}) < i_{утп}$	<p>интервале наблюдения на сервере электросетевой компании T_n определяется соотношением</p> $TD_{утп\ отн} = \frac{1}{T_n} \sum_{m=1}^M T_{утп}$ <p>Мощность частичных разрядов на изоляторах на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании T_n определяется соотношением</p> $PD_{ут} = \frac{1}{T_n} \sum_{m=1}^M P_{ут}(m)$ <p>Параметры частичных разрядов на сервере электросетевой компании сравниваются с допустимыми пределами</p> $KDi_{уто\ max} < KDi_{уто\ max\ доп}$ $TD_{утп\ отн} < TD_{утп\ отн\ доп}, PD_{ут} < PD_{ут\ доп}$ <p>Если полученные неравенства соблюдаются, то сервер электросетевой компании предупреждающих сигналов не вырабатывает. Принимается, что изолятор работает по параметрам частичных разрядов в допустимых пределах.</p> <p>Если данные неравенства не соблюдаются, что соответствует работе изолятора по параметрам частичных разрядов вне допустимых пределов, то сервер электросетевой компании вырабатывает предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба проверяет состояние указанного изолятора.</p>

3.6 Выводы по главе 3

В процессе выполнения главы построена математическая модель, позволяющая обеспечить фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов, а также проведение косвенной

оценки состояния изоляторов и принятие мер по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций; разработан метод фиксации частичных разрядов, позволяющий своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

Определены входные и выходные переменные математической модели измерения тока утечки, позволяющая обеспечить фиксирование токов утечки.

Выработаны рекомендации по распределению вычислительной реализации математической модели измерения тока утечки (частичные разряды) на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ИЗОЛЯТОР

4.1 Определение входных и выходных переменных

При разработке метода измерения механической нагрузки на изолятор для определения входных и выходных переменных математической модели приняты следующие обозначения:

$p_{из}$ – величина усилия, измеряемое датчиком механической нагрузки на изолятор, Н;

$T_{из}$ – период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор, с;

k – порядок отсчета значений переменных при квантовании;

n – номер отсчета значений переменных при квантовании;

$T_{изпп}$ – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с;

$p_{прВЛ}$ – статическая механическая нагрузка на изолятор, определяемая величиной веса провода на пролете ВЛ, Н;

$p_{из}(N)$ – усредненная величина замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени, Н;

N – количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени;

Nn – количество отсчетов на интервале наблюдения усредненных величин замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании;

$pD_{из}$ – нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, Н;

$KpD_{из}(l)$ – относительное нарастание механической нагрузки на изолятор (относительное нарастание веса гололеда) на интервалах наблюдения на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании;

$pD_{из}(l)$ – нарастание веса гололеда, Н;

ln – интервал наблюдения образования гололеда на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании;

$pD_{mg}(l)$ – величина нарастания веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на интервалах наблюдения l на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, Н;

Tmg – постоянная времени фильтра оценки нарастания веса гололеда, с;

Ktg – коэффициент передачи фильтра оценки нарастания веса гололеда;

$pD_{mgкг}(l)$ – величина веса гололеда на пролете ВЛ, кг;

$pD_{mgкг метр}(l)$ – вес гололеда на 1 метр провода ВЛ, кг;

$Lпр$ – длина пролета, м;

$KpD_{mgс}(l)$ – величина относительного нарастания (скорости нарастания) веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на интервалах наблюдения ln на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, 1/с;

$Tmgс$ – постоянная времени фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда, с;

$Kmgс$ – коэффициент передачи фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда;

$pD_{mgкг доп}$ – предельно допустимое максимальное значение веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, кг;

$KpD_{mgc \text{ доп}}$ - предельно допустимая скорость нарастания веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, 1/с.

4.2 Метод измерения механической нагрузки на изолятор

Метод измерения механической нагрузки на изолятор с учетом фиксации динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда) заключается в следующем:

1. Определяется последовательность измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор при квантовании во времени по формуле:

$$p_{\text{из}}(k), p_{\text{из}}(k - 1), p_{\text{из}}(k - 2), \dots, p_{\text{из}}(2), p_{\text{из}}(1), \quad (4.1)$$

где

$p_{\text{из}}(k)$ – текущий отсчет измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор, Н.

Механическая нагрузка на изолятор состоит из статической и динамической составляющих нагрузок. Статическая нагрузка определяется величиной веса провода на пролете ВЛ электропередач. Динамическая нагрузка определяется метеоусловиями, в которых находится ВЛ и состоит из ветровой нагрузки, приводящей к возникновению вибрации и «пляски» проводов.

В рамках построения математической модели модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изолятор рассматривается статическая нагрузка с перспективой в дальнейшем оценки процессов гололедообразования на проводах ВЛ электропередач.

Вес провода на пролете ВЛ электропередач формирует статическую (постоянную) механическую нагрузку на изолятор $p_{\text{прВЛ}}$, определяемую величиной веса провода на пролете ВЛ электропередач.

Используя последовательность измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор при квантовании во времени и сопоставляя с величиной статической нагрузки на изолятор, определяемой величиной веса

провода на пролете ВЛ электропередач, в дальнейшем проведем оценку нарастания механической нагрузки на изолятор и фиксацию образования гололеда на проводе ВЛ.

2. Проводится фиксация нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда) для снижения погрешностей измерений посредством суммирования ряда замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени

$$p_{\text{из}}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{\text{из}}(k), \quad (4.2)$$

где

$p_{\text{из}}(N)$ – усредненная величина замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени, Н;

N – количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени.

Под интервалом времени замеров понимается период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

3. Определяется количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени соотношением

$$N = \frac{T_{\text{изпп}}}{T_{\text{из}}}, \quad (4.3)$$

где

$T_{\text{изпп}}$ – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с;

$T_{\text{из}}$ – период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор, с.

Значения $p_{из}(N)$ передаются от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

4. На сервере ЦУ ЭО при поступлении значений $p_{из}(N)$ от блока дистанционного мониторинга изоляторов формируется последовательность усредненных на интервале $T_{изпп}$ передачи данных по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе.

$$p_{из}(N), p_{из}(N - 1), p_{из}(N - 2), p_{из}(N - 3), p_{из}(N - Nn), \quad (4.4)$$

где

Nn – количество отсчетов на интервале наблюдения усредненных величин замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

5. Определяется динамика нарастания механической нагрузки на изолятор для фиксации образования гололеда на сервере ЦУ ЭО в соответствии с соотношением

$$pD_{из} = p_{из}(N) - p_{из}(N - 1), \quad (4.5)$$

где

$pD_{из}$ – нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, Н.

Величина нарастания механической нагрузки на изолятор $pD_{из}$ соответствует весу образовавшегося на проводе ВЛ гололеда.

6. Определяется относительное нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок по каналу измерения механической нагрузки на сервере ЦУ ЭО в соответствии с соотношением

$$KpD_{из} = \frac{p_{из(N)}}{p_{из(N-1)}}, \quad (4.6)$$

где

$KpD_{из}$ – относительное нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

Учитывая, что образование гололеда процесс значительно более медленный, чем период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор и период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании в математической модели фиксации динамики нарастания механической нагрузки на изолятор применен фильтр первого порядка с постоянной времени определяемому динамикой процесса гололедообразования на проводах ВЛ электропередач.

7. Для фильтрации полученных значений на сервере ЦУ ЭО формируется последовательность нарастания механической нагрузки на изолятор, определяемой образованием гололеда

$$pD_{из}(l), pD_{из}(l-1), pD_{из}(l-2), pD_{из}(l-ln), \quad (4.7)$$

где

$pD_{из}(l)$ – нарастание веса гололеда, Н;

ln – интервал наблюдения образования гололеда на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Фильтрация проводится в соответствии с соотношением

$$pD_{mg}(l) = \frac{1}{Tmg} * pD_{mg}(l-1) + \frac{Kmg}{Tmg} * pD_{из}(l), \quad (4.8)$$

где

$pD_{mg}(l)$ – величина нарастания веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на интервалах наблюдения l на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, Н;

Tmg – постоянная времени фильтра оценки нарастания веса гололеда, с;

Kmg – коэффициент передачи фильтра оценки нарастания веса гололеда.

Постоянная времени Tmg и коэффициент передачи Kmg фильтра оценки нарастания веса гололеда выбираются в соответствии с динамикой гололедообразования на проводах в соответствии с климатическими условиями территории пролегания ВЛ электропередач.

В полученном соотношении значение коэффициентов можно представить в виде

$$\frac{Kmgc}{Tmgc} = \frac{T_{из}}{3 * T_{изпп}}, \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{Tmgc} = 1 - \frac{Kmgc}{Tmgc},$$

где

$T_{из}$ – период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор, с;

$T_{изпп}$ – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с.

В результате получаем величину веса гололеда на проводах ВЛ на текущем интервале наблюдения $pD_{mg}(l)$ в Ньютонах.

В килограммах вес гололеда на проводах ВЛ на пролете на текущем интервале наблюдения составит

$$pD_{mgкг}(l) = pD_{mg}(l)/9,81, \quad (4.10)$$

где

$pD_{mgкг}(l)$ – величина веса гололеда на пролете ВЛ, кг.

Величина веса гололеда на 1 метр провода ВЛ составит

$$pD_{mgкг \text{ метр}}(l) = \frac{pD_{mgкг}(l)}{L_{пр}}, \quad (4.11)$$

где

$pD_{mgкг \text{ метр}}(l)$ – вес гололеда на 1 метр провода ВЛ, кг;

$L_{пр}$ – длина пролета, м.

8. Аналогично для фильтрации значений относительного нарастания механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок на сервере ЦУ ЭО формируется последовательность

$$KpD_{из}(l), KpD_{из}(l-1), KpD_{из}(l-2), KpD_{из}(l-ln), \quad (4.12)$$

где

$KpD_{из}(l)$ – относительное нарастание веса гололеда на интервалах наблюдения, Н;

ln – интервал наблюдения образования гололеда на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Фильтрация проводится в соответствии с соотношением

$$KpD_{mgс}(l) = \frac{1}{Tmgс} * pD_{mgс}(l-1) + \frac{Kmgс}{Tmgс} * KpD_{из}(l) \quad (4.13)$$

где

$KpD_{mgс}(l)$ – величина относительного нарастания (скорости нарастания) веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на интервалах наблюдения ln на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, 1/с;

T_{mgc} – постоянная времени фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда, с;

K_{mgc} – коэффициент передачи фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда.

Постоянная времени T_{mgc} и коэффициент передачи K_{mgc} фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда выбираются в соответствии с динамикой нарастания гололедообразования на проводах и климатическими условиями территории пролегания ВЛ электропередач.

В полученном соотношении значение коэффициентов можно представить в виде

$$\frac{K_{mgc}}{T_{mgc}} = \frac{T_{из}}{3 * T_{изпп}} \quad (4.14)$$

$$\frac{1}{T_{mgc}} = 1 - \frac{K_{mgc}}{T_{mgc}},$$

где

$T_{из}$ – период квантования по времени данных с датчика механической нагрузки на изолятор, с;

$T_{изпп}$ – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с.

В результате получаем величину скорости нарастания веса гололеда на проводах ВЛ на текущем интервале наблюдения $KpD_{mgc}(l)$.

9. Рассчитанные значения на сервере ЦУ ЭО сравниваются с допустимыми пределами

$$pD_{mgкг}(l) < pD_{mgкг \text{ доп}}$$

$$KpD_{mgc}(l) < KpD_{mgc \text{ доп}} \quad (4.15)$$

где

$pD_{mgk \text{ доп}}$ – предельно допустимое максимальное значение веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, кг;

$KpD_{mgc \text{ доп}}$ – предельно допустимая скорость нарастания веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, 1/с.

Если полученные неравенства соблюдаются, то сервер электросетевой компании предупреждающих сигналов не вырабатывает. Принимается, что максимальное значение веса гололеда на проводе ВЛ электропередач и скорость его нарастания находятся в допустимых пределах.

Если данные неравенства не соблюдаются, что соответствует превышение параметров гололедообразования допустимых значений, то сервер электросетевой компании вырабатывает предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба принимает соответствующие методы противодействия гололедообразованию.

4.4 Исследование устойчивости и адекватности метода измерения механической нагрузки на изолятор

Устойчивость разработанного метода проверялась на предмет соответствия частоты дискретизации аналоговых значений тока утечки через изолятор и механической нагрузки на изолятор для оценки гололедообразования на интервалах наблюдения за период времени передачи соседних посылок от блока дистанционного мониторинга изоляторов на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.

В ходе исследования был выполнен анализ соответствия сохранения высших гармоник при дискретизации на основе теоремы Котельникова. Установлено, что наиболее критичным к частоте дискретизации являются значения тока утечки изолятора.

С учетом проявления высших гармоник при измерениях токов утечки изоляторов, особенно при резких возрастаниях токов утечек, характерных

для частичных разрядов, принято ограничиться 1, 3 и 5 гармониками тока утечки изоляторов.

Принимая, что токи утечек в большинстве случаев проявляются на четверти периода сети 50 Гц, примем частоту первой гармоники тока утечки равной 200 Гц.

При этом частотный диапазон определяется соотношением

$$f_1 \leq f \leq f_5, \quad (4.16)$$

где

$f_1 = 200$ – частота разрядов на изоляторах, Гц;

$f_5 = 1000$ – частота пятой гармоники разрядов на изоляторах, Гц.

В соответствии с теоремой Котельникова период опроса тока нагрузки выбран

$$T_{из} = 1/2f_5, \quad T_{из} = 0,0005 \text{ с}. \quad (4.17)$$

Таким образом, частота дискретизации $T_{из}$ аналогового значения тока утечки изолятора должна быть не ниже 2000 Гц.

Требования к частотам дискретизации измерения механической нагрузки блоком дистанционного мониторинга изоляторов для оценки гололедообразования на интервалах наблюдения за период времени передачи соседних посылок на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании значительно ниже, так как динамика процессов гололедообразования существенно отличается. Процесс проявления гололеда на проводах определяется единицами и десятками минут.

Для фиксации гололедообразования принято

$$f_{измг} = 0,01 \text{ Гц},$$

где

$f_{измг}$ – частота дискретизации аналогового значения механической нагрузки на изолятор в блоке дистанционной диагностики изоляторов ВЛ электропередач.

При таких параметрах сохранялась устойчивость разработанного метода.

Кроме того применение динамических объектов и устройств фильтрации представлены в виде апериодических динамических звеньев первого порядка с большими постоянными времени, что не приводит к потере устойчивости модели в целом на широком интервале изменения входных и выходных параметров математической модели.

Адекватность разработанной математической модели проверена оценкой соответствия выходных параметров математической модели и лабораторного макета блока дистанционного мониторинга изоляторов при одинаковых входных значениях, подаваемых на входы математической модели и лабораторного макета блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ электропередач.

Результаты исследований показали соответствие математической модели лабораторному макету блока дистанционного мониторинга изоляторов, расхождение параметров находится в пределах установленных параметров.

4.5 Рекомендации по распределению вычислительной реализации метода измерения механической нагрузки на изолятор ВЛ на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании

Метод измерения механической нагрузки на изолятор ВЛ реализуется на микропроцессоре модуля дистанционной диагностики изоляторов ВЛ и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Распределение реализаций соотношений метода и сопутствующих функций приведено в таблице 4.5.1.

Таблица 4.5.1 – Распределение вычислительной реализации метода измерения механической нагрузки на изолятор ВЛ на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании

Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на блоке дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ	Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
<u>Загрузка в модуль модуля дистанционного мониторинга изоляторов постоянных коэффициентов математической модели</u>	<u>Загрузка на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании постоянных коэффициентов математической модели:</u>
<p>$p_{из}$ – величина усилия, измеряемого датчиком механической нагрузки на изолятор, Н;</p> <p>$T_{из}$ – период квантования по времени данных с датчика, с;</p> <p>k – порядок отсчета при квантовании;</p> <p>n – номер отсчета значений переменных при квантовании;</p> <p>$T_{изпп}$ – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с;</p> <p>$p_{прВЛ}$ – статическая механическая нагрузка на изолятор, определяемая величиной веса провода на пролете ВЛ, Н;</p> <p>$p_{из}(N)$ – усредненная величина замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор, Н;</p> <p>N – количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени;</p>	<p>$T_{изпп}$ – период передачи данных от модуля дистанционного мониторинга изоляторов на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, с;</p> <p>$pD_{из}(l)$ – нарастание веса гололеда, Н;</p> <p>ln – интервал наблюдения образования гололеда на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании;</p> <p>$pD_{mg}(l)$ – величина нарастания веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования, Н;</p> <p>Tmg – постоянная времени фильтра оценки нарастания веса гололеда, с;</p> <p>Kmg – коэффициент передачи фильтра оценки нарастания веса гололеда;</p> <p>$pD_{mgкг}(l)$ – величина веса гололеда на пролете ВЛ, кг;</p> <p>$pD_{mgкг метр}(l)$ – вес гололеда на 1 метр провода ВЛ, кг;</p> <p>$L_{пр}$ – длина пролета, м;</p>

<p>Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на блоке дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ</p>	<p>Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании</p>
<p>Nn - количество отсчетов на интервале наблюдения усредненных величин замеров значений датчика механической нагрузки;</p> <p>$pD_{из}$ - нарастание механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании, Н;</p> <p>$KpD_{из}$ - относительное нарастание механической нагрузки на изолятор (относительное нарастание веса гололеда) на интервалах наблюдения на интервале времени передачи соседних посылок от модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изоляторе на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.</p>	<p>$KpD_{mgs}(l)$ – величина относительного нарастания (скорости нарастания) веса гололеда, отфильтрованная в соответствии с динамикой процесса гололедообразования на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, 1/с;</p> <p>$Tmgs$ – постоянная времени фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда, с;</p> <p>$Kmgs$ – коэффициент передачи фильтра оценки скорости нарастания веса гололеда;</p> <p>$pD_{mgs\text{ кг доп}}$ - предельно допустимое максимальное значение веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, кг;</p> <p>$KpD_{mgs\text{ доп}}$ - предельно допустимая скорость нарастания веса гололеда на проводе ВЛ электропередач на интервале наблюдений электросетевой компании, 1/с.</p>
<p><u>Реализация уравнений математической модели на уровне модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ:</u></p>	<p><u>Реализация уравнений математической модели на уровне сервера диспетчерского пункта электросетевой компании:</u></p>

<p>Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на блоке дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ</p>	<p>Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании</p>
<p>Формирование последовательности измеренных значений датчика механической нагрузки на изолятор при квантовании во времени</p> $p_{из}(k), p_{из}(k - 1), p_{из}(k - 2), \dots, p_{из}(2), p_{из}(1);$ <p>Фиксация нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда) посредством суммирования замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени</p> $p_{из}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{из}(k),$ <p>Рассчитываем количество замеров значений датчика механической нагрузки на изолятор на интервале времени определяется соотношением</p> $N = \frac{T_{изпп}}{T_{из}}.$	<p>Значения $p_{из}(N)$ передаются от модуля дистанционного мониторинга изоляторов на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании.</p> <p>Формируется последовательность усредненных значений</p> $p_{из}(N), p_{из}(N - 1), p_{из}(N - 2), p_{из}(N - 3), p_{из}(N - Nn)$ <p>Динамику нарастания механической нагрузки на изолятор для фиксации образования гололеда определяем</p> $pD_{из} = p_{из}(N) - p_{из}(N - 1),$ <p>Относительное нарастание механической нагрузки рассчитывается</p> $KpD_{из} = \frac{p_{из}(N)}{p_{из}(N - 1)},$ <p>Для фильтрации формируется последовательность нарастания механической нагрузки на изолятор, определяемой образованием гололеда</p> $pD_{из}(l), pD_{из}(l - 1), pD_{из}(l - 2), pD_{из}(l - ln),$ <p>Фильтрация проводится в соответствии с соотношением</p> $pD_{mg}(l) = \frac{1}{Tmg} * pD_{mg}(l - 1) + \frac{Kmg}{Tmg} * pD_{из}(l)$ <p>Значения коэффициентов</p> $\frac{Kmg}{Tmg} = \frac{T_{из}}{3 * T_{изпп}}$ $\frac{1}{Tmg} = 1 - \frac{Kmg}{Tmg},$

<p>Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на блоке дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ</p>	<p>Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании</p>
	<p>В килограммах вес гололеда на проводах ВЛ на пролете на текущем интервале наблюдения составит</p> $pD_{mgкг}(l) = pD_{mg}(l)/9,81,$ <p>Величина веса гололеда на 1 метр провода ВЛ составит</p> $pD_{mgкг \text{ метр}}(l) = \frac{pD_{mgкг}(l)}{L_{пр}},$ <p>Для фильтрации значений относительного нарастания механической нагрузки на изолятор на интервале времени передачи соседних посылок сформируем последовательность</p> $KpD_{из}(l), \quad KpD_{из}(l-1), \quad KpD_{из}(l-2), \\ KpD_{из}(l-ln),$ <p>Фильтрация проводится в соответствии с соотношением</p> $KpD_{mgс}(l) = \frac{1}{T_{mgс}} * pD_{mgс}(l-1) + \frac{K_{mgс}}{T_{mgс}} * KpD_{из}(l)$ $\frac{K_{mgс}}{T_{mgс}} = \frac{T_{из}}{3 * T_{изпп}}$ $\frac{1}{T_{mgс}} = 1 - \frac{K_{mgс}}{T_{mgс}},$ <p>Формируем неравенства</p> $pD_{mgкг}(l) < pD_{mgкг \text{ доп}}$ $KpD_{mgс}(l) < KpD_{mgс \text{ доп}}$ <p>Если полученные неравенства соблюдаются, то сервер электросетевой компании предупреждающих сигналов не вырабатывает.</p> <p>Если данные неравенства не соблюдаются, что соответствует превышению параметров гололедообразования допустимых значений,</p>

Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на блоке дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ	Реализация соотношений математической модели и сопутствующих функций на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании
	то сервер электросетевой компании вырабатывает предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба принимает соответствующие методы противодействия гололедообразованию.

4.6 Выводы по главе 4

В процессе выполнения работы разработан метод измерения механической нагрузки на изолятор, позволяющий обеспечить фиксирование динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда).

Определены входные и выходные переменные, а также выработаны рекомендации по распределению вычислительной реализации разработанного метода на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере ЦУ ЭО.

Исследована устойчивость и адекватность метода измерения механической нагрузки на изолятор

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБРАЗЦА БЛОКА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ

5.1 Структура блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ

В основу разработки лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ заложена структура обработки данных, полученных от датчика, установленного непосредственно в чашке изолятора, что позволяет обеспечить построение математической модели на основе выходных данных, получаемых от датчика. На данном этапе проекта рассматривается оснащение блока диагностики изолятора ВЛ датчиком утечки тока на землю.

Информация с датчиков модулей, размещенных на ВЛ, передается на сервер сбора информации от средств дистанционной диагностики для последующей обработки и распределения полученной информации по диспетчерским пунктам электросетевых компаний и аварийных служб для оперативного реагирования на возможное проявление нештатных и аварийных ситуаций.

Блок дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ оснащен датчиком тока для диагностики проводов ВЛ 6-220 кВ, на основе данных которых происходит построение математической модели.

Структура блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенного датчиком тока, приведена на рисунке 5.1.1.

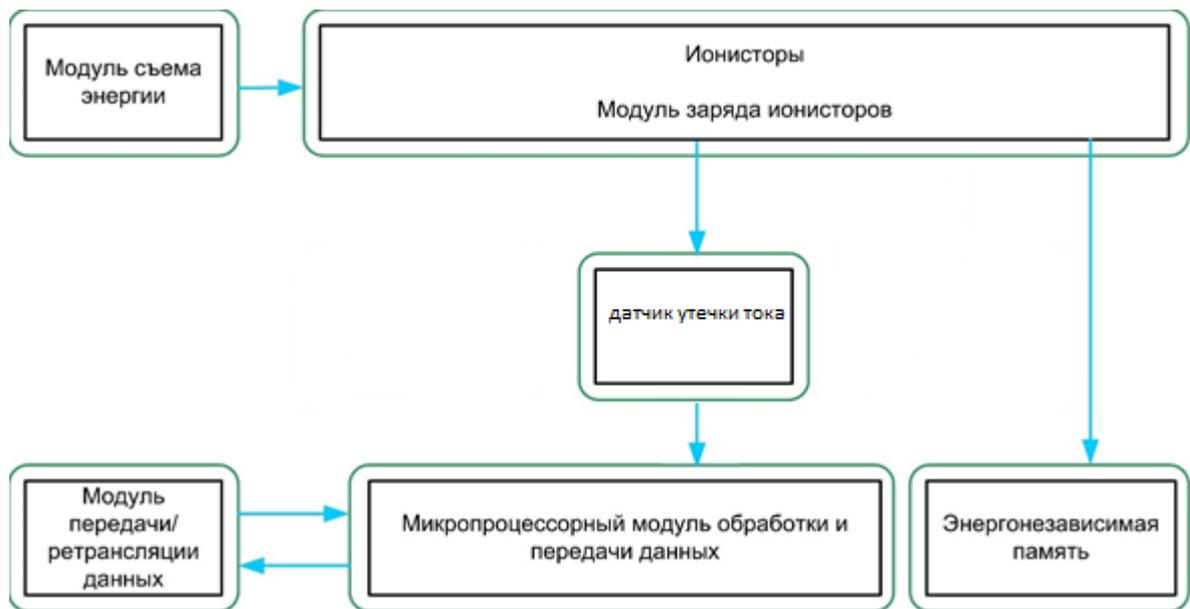


Рисунок 5.1.1 – Структура блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенного датчиком тока

Моделирование схемы измерения тока утечки проводилось с использованием трансформаторного датчика микротоков, использующего передачу данных о величине тока утечки по шине RS485 с применением протокола MODBUS RTU. Опрос датчика происходит через равные промежутки времени, задаваемые программно, в зависимости от требуемых условий. Результат измерений обрабатывается микропроцессорным модулем обработки и передачи данных. Также, данные измеренного значения тока утечки можно контролировать при помощи виртуального терминала UART.

5.2 Реализация блока измерения частичных разрядов на проводе ВЛ

Измерение частичных разрядов на проводе производится путем измерения уровня микротоков, возникающих при появлении искрового разряда. Измерение осуществляется блоком измерения частичных разрядов.

Структурная схема блока измерения частичных разрядов приведена на рисунке 5.2.1.

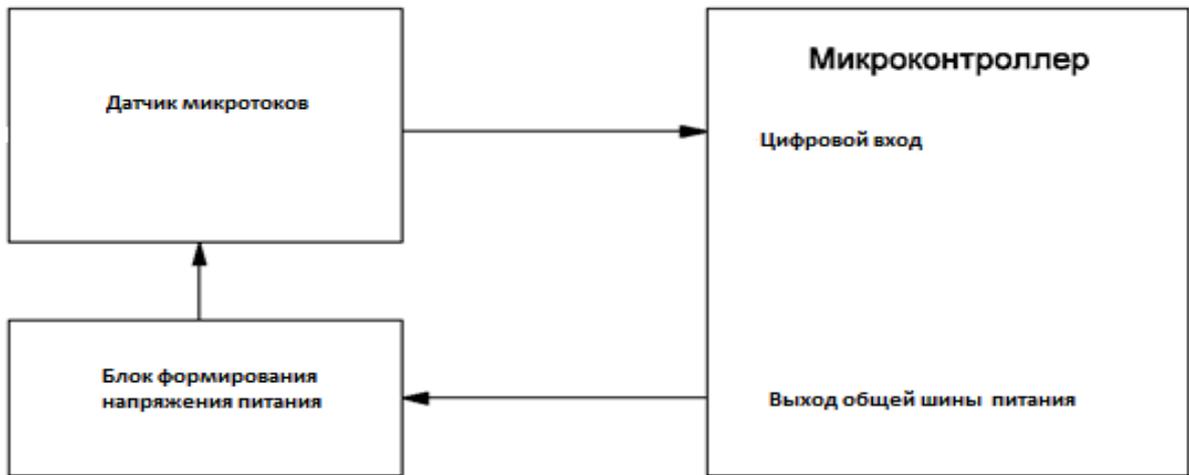


Рисунок 5.2.1 – Структурная схема блока измерения частичных разрядов

Блок измерения частичных разрядов на изоляторе построен на базе микроконтроллера ESP32 и состоит из следующих основных блоков:

1. Чувствительный элемент – датчик микротоков
2. Блок формирования напряжения питания;
3. Микроконтроллер.

Общий принцип работы блока измерения частичных разрядов описан ниже.

При возникновении частичных разрядов на изоляторах возникают всплески микротоков, измеряемых чувствительным элементом (датчиком тока) модуля. Измеренные данные тока передаются в микроконтроллер, который производит анализ полученных данных и, в соответствии с полученными данными, определяет факт возникновения случайного искрового разряда.

5.3 Конструктивное исполнение и основные функции лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ

Блок дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ предназначен для удаленной диагностики параметров опорных и линейных изоляторов ВЛ 6-220 кВ и обеспечения непрерывного мониторинга состояния арматуры. Лабораторный образец блока дистанционного мониторинга проводов ВЛ обеспечивает следующие основные функции:

- измерение микротоков утечки через изолятор на землю в пределах 1-10 мА (уточняется при реализации проекта);
- фиксация возникновения случайных разрядов;
- фиксация динамики нарастания токов утечки;
- передача информации на сервер с использованием канала связи GSM/GPRS или по радиоканалу;
- обмен данными по радиоканалу с сервером моделирования цифрового двойника

ВЛ 6-220 кВ.

Конструктивно, лабораторный образец блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ представляет собой защитный корпус с платой микроконтроллера, соединенный с чувствительным элементом – датчиком микротока. Защитный корпус лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ обеспечивает возможность установки модуля на провод ВЛ.

Чувствительный элемент представляет собой трансформаторный датчик микротока, содержащий встроенный блок преобразователя аналогового сигнала микротока в сигнал интерфейса RS485. Конструкция трансформаторного датчика микротока обеспечивает возможность его установки на изолятор ВЛ. Передача данных тока утечки от трансформаторного датчика микротока на микроконтроллер, заключенный в защитный корпус, осуществляется посредством сигнального провода по интерфейсу RS485.

Пример установки конструкции блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на провод ВЛ показан на рисунке 5.3.1.



Рисунок 5.3.1 – Пример установки конструкции блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на провод ВЛ

Технические характеристики блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ

Основные технические требования к разрабатываемому изделию приведены в таблице 5.3.1.

В состав разрабатываемого изделия должны входить следующие компоненты:

- радиомодуль CC1310 868 МГц;
- GSM/GPRS модем;
- внутренние антенны GSM, 868МГц;
- FLASH память для хранения архивов;
- ионистор (двухслойный электрохимический конденсатор);
- схема заряда и контроля напряжения ионистора;
- разъемные трансформаторы тока для осуществления электропитания устройства и контроля тока в несущем проводе;
- датчик микротоков утечки;
- схема измерения частичных разрядов на проводе.

Таблица 5.3.1 – Основные технические требования к разрабатываемому изделию

№п/п	Наименование	Характеристики
1	Габаритные размеры, не более, мм	L:400; D:130
2	Внешнее питание	Съем энергии с высоковольтного провода (6-220кВ) посредством токового трансформатора
3	Рабочий диапазон микротоков утечки, мА	От 1 до 10
4	Погрешность измерения тока, %	20
5	Внутреннее дополнительное питание	Ионистор (двухслойный электрохимический конденсатор)
6	Время работы от ионистров, не менее, ч	4
7	Материал корпуса	пластик
8	Степень защиты корпуса	не ниже IP67
9	Радиоканал обмена данными между модулями	868 МГц
10	Канал обмена данными с сервером	GSM/GPRS
11	Диапазон рабочих температур, °С	От минус 40 до +60

К разрабатываемому изделию предъявляются следующие функциональные требования:

- Измерение тока утечки должно проводиться путем оцифровки 20 периодов синусоидального сигнала измерительного токового трансформатора с последующим вычислением среднеквадратического значения. Частота дискретизации – 1 кГц;

- Измерение частичных разрядов на проводе должно осуществляться методом детектирования всплесков микротоков, возникающего при появлении разрядов;

- Сбор данных с датчиков и передача на сервер должны происходить с настраиваемым интервалом времени от 1 до 720 минут;

- При отсутствии сигнала сети GSM информация с датчиков должна передаваться от модуля к модулю по радиоканалу 868 МГц в режиме ре-

трансляции до блока с уверенным приемом сигнала GSM. Последовательность ретрансляции задается после выполнения монтажа на контролируемые линии при помощи радио-конфигуратора;

- Размещение блока должно быть непосредственно на контролируемом проводе ВЛ;

- Питание блока должно осуществляться от двух ионисторов (суперконденсаторов) емкостью по 100 Ф каждый, напряжением 3 В, соединенными параллельно;

- Зарядка ионисторов должна осуществляться от токового трансформатора, расположенного непосредственно на проводе ВЛ. Схема заряда должна обеспечивать контроль напряжения ионисторов и не допускать их перезаряд;

- Возможность реализации контроля частичных разрядов на проводе должна быть оценена в процессе технической реализации проекта.

К конструкции изделия предъявляются следующие требования:

- конструкция изделия должна обеспечивать выравнивание потенциала земли электронного блока и потенциала высоковольтного провода;

- корпус изделия должен обеспечивать защиту от УФ-излучения, перепадов температуры, повышенной влажности, а также критически низкой и высокой температур;

- конструкция изделия должна обеспечивать простоту монтажа в полевых условиях при отсутствии напряжения на контролируемом проводе;

- изделие должно допускать монтаж на провод диаметром от 12 до 20 мм.

Порядок контроля и приемки изделия должен включать по завершению работ проведение функциональных и полевых испытаний модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ с целью проверки соответствия требованиям, предъявляемым к изделию. По результатам испытаний, при необходимости, в изделие следует внести соответствующие изменения.

После монтажа на проводе изделие не должно требовать технического обслуживания на протяжении всего срока эксплуатации. Изделие является неремонтопригодным и при обнаружении неисправности подлежит замене.

Документирование результатов выполненных работ должно включать в себя следующую документацию:

- 1) принципиальная электрическая схема
- 2) монтажная электрическая схема печатной платы
- 3) проект печатной платы (Gerber)
- 4) спецификация печатной платы
- 5) 3D-модель устройства
- 6) чертежи деталей
- 7) сборочный чертеж
- 8) спецификация сборки
- 9) встраиваемое ПО
- 10) отчет функционального тестирования
- 11) методика настройки и тестирования (МНиТ)
- 12) методика проведения приемочных испытаний (МППИ)
- 13) протокол проведения испытаний
- 14) паспорт
- 15) руководство по эксплуатации
- 16) акт перевода в серийное производство

5.4 Моделирование взаимодействия блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ с математической моделью цифрового двойника

Моделирование взаимодействия лабораторного образца модуля дистанционной диагностики изоляторов ВЛ с математической моделью цифрового двойника ВЛ 6-220 кВ проводилось в лабораторных условиях.

Экспериментальная установка содержит непосредственно лабораторный образец модуля дистанционной диагностики изоляторов ВЛ, компьютер, на котором реализуется математическая модель, электронный блок генерирования входных параметров, поступающих на входы лабораторного образца модуля дистанционной диагностики изоляторов ВЛ и блок преобразования выходных параметров для ввода в компьютер.

В результате, работа лабораторного образца модуля дистанционной диагностики изоляторов ВЛ проводилась в условиях эмуляции параметров ВЛ.

Графики работы блока дистанционного мониторинга ВЛ и показаны на рисунках 5.3.2-5.3.3.



Рисунок 5.3.2 – Блок дистанционного мониторинга на ВЛ 110 кВ «Звезда – Бегичево» (амплитуда вибрации)

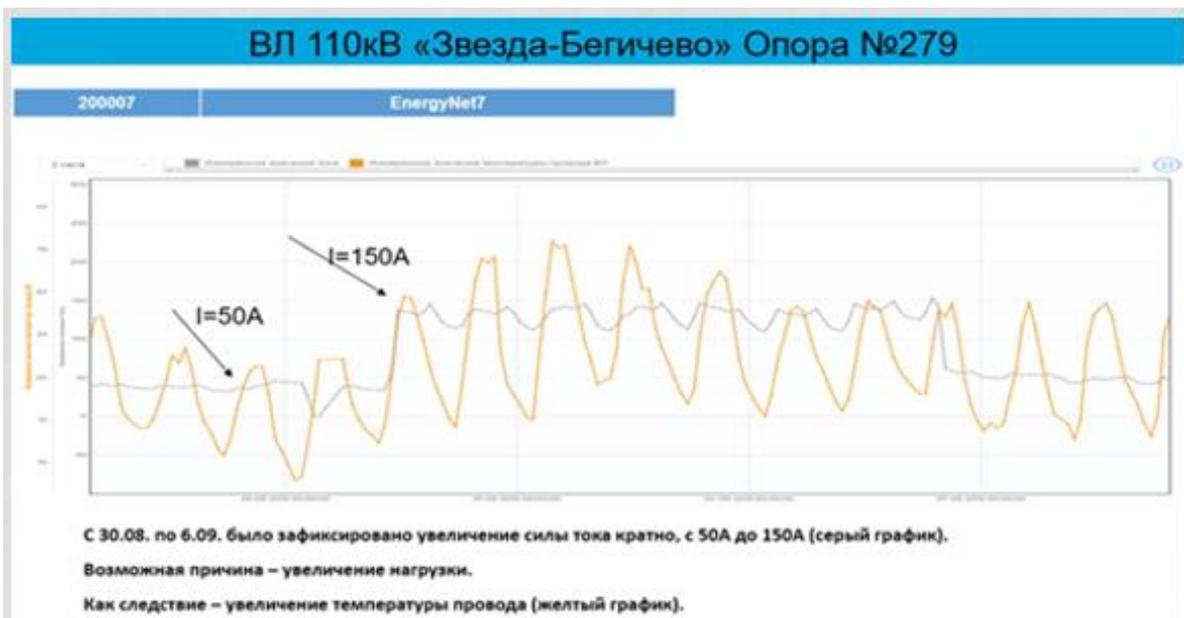


Рисунок 5.3.3 – Блок дистанционного мониторинга на ВЛ 110 кВ «Звезда – Бегичево» (фиксация увеличения силы тока)

При моделировании взаимодействия модуля с математической моделью цифрового двойника ВЛ эмулировались следующие параметры:

- ток утечки в диапазоне от 0 до 25 мА;
- всплески тока утечки в пределах 25 мА, длительностью 1 – 10 мс.

На рисунке 5.3.4 показаны экспериментальная зависимость значений фиксируемого количества частичных разрядов на интервале времени наблюдений и допустимое значение.

Возрастание графика зависимости значений фиксируемого количества частичных разрядов по месяцам объясняется загрязнением поверхности гирлянды изоляторов на интервале времени наблюдений. Блок дистанционного мониторинга изоляторов был установлен в пролете ВЛ над автодорогой, где загрязнение изоляторов повышенное.

Диапазоны моделирования изначально выбраны в более широких пределах относительно реально действующих значений для проверки возможностей моделирования взаимодействия модуля с математической моделью цифрового двойника.

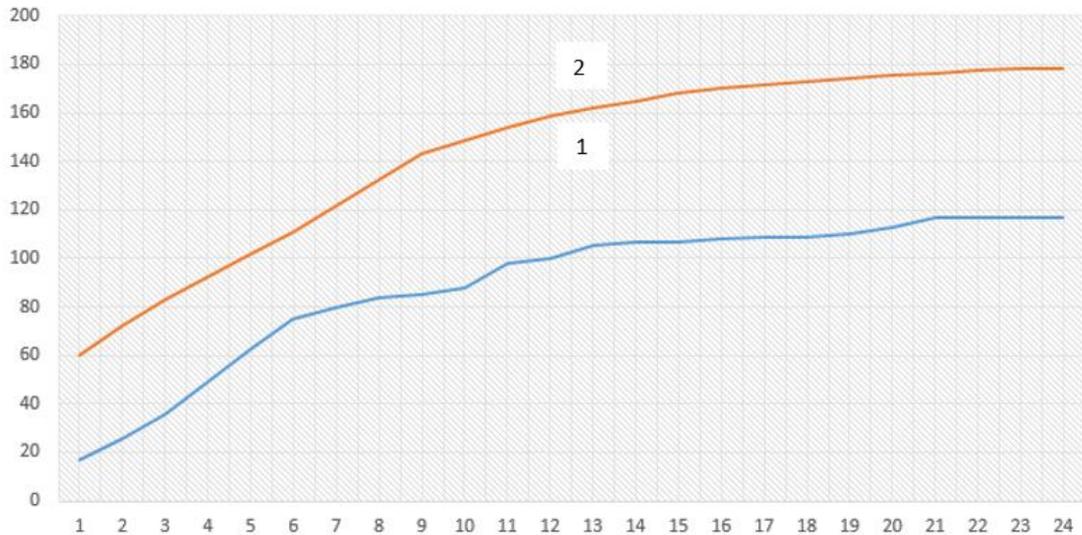


Рисунок 5.3.4 – Экспериментальная зависимость фиксируемого количества частичных разрядов (1) на интервале времени наблюдений по месяцам и допустимое значение (2).

Результаты моделирования показали сохранение работоспособности и поддержание заданных в техническом задании параметров лабораторного образца модуля дистанционной диагностики изоляторов ВЛ. Лабораторный образец в условиях моделирования подтвердил выполнение заложенных функций и параметров в требуемых пределах.

5.5 Исследование динамических, статических и точностных характеристик лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ

Исследование динамических, статических и точностных характеристик лабораторного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ проводилось в рамках программы испытаний лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, приведенной в разделе 2 настоящего отчета. В соответствии с программой испытаний лабораторного

образца модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ, исследование включало в себя определение следующих характеристик модуля:

- измерение микротоков утечки через изолятор на землю;
- фиксация возникновения случайных разрядов;
- фиксация динамики нарастания токов утечки.

В ходе исследования было установлено, что динамические, статические и точностные характеристики лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ удовлетворяют требованиям технического задания.

Проведены испытания лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ в соответствии с разработанной программой-методикой испытаний, которая приведена в Приложении А диссертации.

Форма протокола испытаний по результатам испытаний модуля приведена в Приложении А диссертации.

5.6 Выводы по главе 5

Разработан блок дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенный датчиком тока для диагностики проводов ВЛ 6-220 кВ, на основе данных которых происходит построение математической модели и разработка методов.

Проведены экспериментальные исследования по оценке соответствия выходных параметров разработанных модели и методов, и промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов при одинаковых входных значениях, подаваемых на их входы. Результаты исследований показали соответствие разработанных модели и методов промышленному образцу блока дистанционного мониторинга изоляторов, расхождение параметров находится в пределах установленных параметров.

В ходе моделирования взаимодействия измерительного блока с математической моделью цифрового двойника ВЛ 6-220 кВ эмулировались ос-

новые параметры ВЛ. Результаты моделирования подтвердили работоспособность промышленного образца измерительного блока, его корректное взаимодействие с математической моделью и обеспечение заложенных функций и параметров в требуемых пределах.

Эффективность разработанной системы состоит в том, что она заранее предупреждает о возможных проявлениях нештатных и аварийных ситуаций в работе ВЛ и позволяет принять предупредительные меры по их устранению.

Статистические данные показывают, что возникновение аварийных ситуаций по причине пробоев изоляторов в электроэнергетике составляет в среднем 19,5% от общей аварийности.

Применение предложенной системы снижает аварийность и повышает надежность электроснабжения потребителей.

Проведены испытания промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ в соответствии с разработанной программой-методикой испытаний.

В целях выполнения дальнейших работ по изготовлению опытного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, были разработаны технические требования, предъявляемые к опытному образцу блока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена важная научно-техническая задача, а именно потребность расширения функциональных возможностей информационно-измерительной системы для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач, обеспечивающей фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов, а также проведение косвенной оценки состояния изоляторов и принятие мер по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций.

В диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты:

1) разработана обобщенная структура информационно-измерительной системы для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач, к основным задачам которой относят непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ, запись и хранение информации, преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа и формирования рекомендаций для принятия управленческих решений. Передача информации от информационно-управляющих блоков в системе проводится по схеме выделенных каналов. Запросы на обслуживание поступают непосредственно в центр сбора информации. Представлена классификация запросов в информационно-измерительной системе и алгоритм выбора режимов работы.

2) построена математическая модель, позволяющая обеспечить фиксирование токов утечки, динамику изменения токов утечек во времени и частичных разрядов, а также проведение косвенной оценки состояния изоляторов и принятие мер по проведению предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций.

3) разработан метод фиксации частичных разрядов, позволяющий своевременно выявить развивающиеся повреждения изоляции и принять необходимые меры для их устранения.

4) разработан метод измерения механической нагрузки на изолятор, позволяющий обеспечить фиксирование динамики нарастания механической нагрузки на изолятор (фиксация образования гололеда).

Определены входные и выходные переменные разработанной модели измерения тока утечки, метода фиксации частичных разрядов и метода измерения механической нагрузки на изолятор, а также выработаны рекомендации по распределению вычислительной реализации математической модели и методов на микропроцессоре блока дистанционного мониторинга изоляторов и на сервере ЦУ ЭО. Исследованы устойчивость и адекватность полученных моделей и методов.

5) проведены экспериментальные исследования по оценке соответствия выходных параметров разработанных математической модели и методов и промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов при одинаковых входных значениях, подаваемых на их входы. Результаты исследований показали соответствие математической модели и методов промышленному образцу блока дистанционного мониторинга изоляторов, расхождение параметров находится в пределах установленных параметров.

В ходе разработки промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ была определена структура, общий принцип работы и компоненты информационно-измерительных блоков.

Проведены испытания промышленного образца блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ в соответствии с разработанной программой и методикой испытаний. Разработаны технические требования, предъявляемые к опытному образцу блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является применение предложенных в диссертационном исследовании моделей, методов и технических решений для совершенствования информационно-измерительных систем для дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач в части выработки предиктивных управляющих решений с применением методов искусственного интеллекта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. АйТи Умный Город. Метеостанция. URL: <https://unilight.ru/oborudovanie/meteomonitoring/> (дата обращения 06.07.2022)
2. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // подстанция. № 12. 2019. С.38-43.
3. Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н., Веселов Ф.В., Воропай Н.И. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно – адаптивной сетью. М.: ФСК ЕЭС. 2012. 219 с.
4. Боровков А. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovieteni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (дата обращения 24.11.2021)
5. Васильев А.Н., Тархов Д.А., Шемякина Т.А. Приближенные аналитические решения обыкновенных дифференциальных уравнений / В.А. Сухомлин, Е.В. Зубарева, М.А. Шнепс-Шнеппе // Избранные научные труды XI Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (SITITO 2016). Москва, Россия, 25-26 ноября 2016. CEUR Workshop Proceedings. Т. 1761. С. 393-400. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1761/paper50.pdf> (дата обращения: 05.06.2021).
6. Вишняков Л. Н., Кудряшов Ю. М., Литвинов П. В., Лондер М. И., Макоклюев Б. И., Попов С. Г., Тулинов Ю. В., Чирков С. А., Шадунц Ю. А., Шумилин В. Ф.14. О концепции формирования Единой системы классификации и кодирования информации в электроэнергетической отрасли // Электрические станции. 2008. № 1. С.58-64.
7. Воловач В.И., Артюшенко В.М. Вероятностные характеристики процесса поиска и обнаружения протяженного объекта в непрерывном и дискретном времени наблюдения // Успехи современной радиоэлектроники. 2016, № 12. С. 58-67.

8. Воропай Н.И., Клер А.М., Кононов Ю.Д., Санеев Б.Г., Сендеров С.М., Стенников В.А. Методические основы стратегического планирования развития энергетики // Энергетическая политика. 2018. вып.3. С. 35- 44.
9. Всережимная математическая модель линий электропередачи /А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый// Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 7. – С.206-210.
10. Жиленков Н. Новые технологии беспроводной передачи данных // СТА. 2003. № 4. –С.44-47.
11. Здирук К. Б. Применение цифровых двойников в системах управления сложными объектами [Электронный ресурс] //Экстремальные технологии и системы. URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения: 07.07.2021).
12. Информационное обеспечение при разработке системы управления режимами работы энергосистем/ Степанов В.М., Ершов С.В., Непомнящий В.Ю., Акулинин Г.Н.// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 3-7.
13. Ковалев С.П. Применение онтологий при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем // Автометрия. 2008. Т. 44, № 2. С. 41–49.
14. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса. Colloquium-journal // Technical science. №10(34), 2019. С. 31 35.
15. Копайгородский А.Н. Управление знаниями в коллективной экспертной деятельности по обоснованию рекомендуемых решений в энергетике // Труды XX Российской научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ – 2017)». М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2017. С. 128-135.
16. Костиков И. Система мониторинга САТ-1 — повышение пропускной способности и надежности в ВЛ // Энергетика. 2011. № 3 (38). https://www.ruscable.ru/article/Sistema_monitoringa_SAT_1_effektivnaya_zashhita/ Дата обращения 23.06.2020.

17. Костиков И. Система мониторинга «САТ-1» – эффективная защита ВВЛ от гололёда // Электроэнергия. Передача и распределение. 2011. №1(4). С. 32–35.

18. Краснов Ф., Хасанов М. Двойник научной организации: подходы и методики // International Journal of Open Information Technologies. ISSN: 2307-8162. 2019. vol 7. № 6. С. 62-66. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-nauchnoyorganizatsii-podhody-i-metodiki> (дата обращения 24.11.2021)

19. Левченко И.И., Сацук Е.И. Программное обеспечение информационной системы контроля гололедообразования // Электрические станции. 2004. №10. С. 15–18.

20. Литвинов П. В. ОИК СК — платформа для СИМ-совместимых приложений: Сборник докладов четвертого специализированного научно-технического семинара «Современные методы и программные средства анализа и планирования электропотребления, балансов мощности и электроэнергии». М.: Элекс-КМ, 2006.

21. Лондер М.И., Моржин Ю.И. Информационная модель ЕЭС на основе стандартов МЭК / Энергия единой сети № 1. – 2014. – С. 28-35.

22. Макоклюев Б.И., Лондер М.И., Попов С.Г. и др. Единая система классификации и кодирования в энергетике. Проблемы и пути решения / Электрические станции № 3. – 2006. – С. 2-6.

23. Массель Л.В. Проблемы создания интеллектуальных систем семиотического типа для стратегического ситуационного управления в критических инфраструктурах // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Научный журнал. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2016. № 1. С. 7- 27.

24. Массель Л.В., Массель А.Г. Язык описания и управления знаниями в интеллектуальной системе семиотического типа // Труды XX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т. 3. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 112 - 124.

25. Массель Л.В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по трансформации энергетики // Энергетическая политика. 2018. № 5. С. 30-42.

26. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. С. 135- 141.

27. Массель Л.В., Массель А.Г. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // Открытые семантические технологии для интеллектуальных систем. № 3. 2013. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. С. 247- 250.

28. Массель Л.В. Интеграция семантического и математического моделирования в исследованиях проблем энергетической безопасности // Международная конференция «Моделирование-2012»: труды. Киев. ИПМЭ НАН Украины. 2012. С. 270- 273.

29. Математическая модель дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу измерения тока утечки/ Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Степанов В.М., Панарин М.В., Панарин В.М., Маслова А.А.// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 159-165.

30. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод воздушной линии/ Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Панарин М.В., Маслова А.А.// Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 2. С. 41-45.

31. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналу измерения температуры провода воздушной линии/ Акуличев В.О., Непомнящий В.Ю., Висич С.Г., Панарин М.В., Маслова А.А.// Энергобезопасность и энергосбережение. 2021. № 3. С. 46-51.

32. Математическая модель измерения тока в системе дистанционной диагностики проводов ВЛ / В.О. Акуличев, В.Ю. Непомнящий, А.Д. Дудин, С.Г. Висич, В.М. Степанов, М.В. Панарин, А.А. Маслова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып.12. С.405-410.
33. Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ/ СТО 56947007-29.240.55.111-2011. С.22-25.
34. Методы создания цифровых двойников на основе нейросетевого моделирования/ А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, Г.Ф. Малыхина // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – Том 14 № 3 (2018). С.521-532.
35. Минуллин Р.Г. и др. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 207 с.
36. Моделирование внутренних конфликтов автоматизированных систем сбора и обработки данных / В.А. Минаев, А.В. Мазин, К.Б. Здирук, Е.В. Поддубная // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 118–123.
37. МНПП Антракс. Монитор электрической сети. URL: <https://www.antraks.ru/produktsiya/universalnoe-ustrojstvo-monitoringa> (дата обращения 06.07.2021)
38. МНПП Антракс. Индикаторы аварийного процесса ИКЗ. URL: <https://www.antraks.ru/produktsiya/indikatory-avarijnogo-protsessa-ikz> (дата обращения 06.07.2021)
39. МНПП Антракс. Система мониторинга и управления электрическими сетями КОМОРСАН 2.2. URL: <https://www.antraks.ru/produktsiya/sistemy-i-kompleksy/komorsan.html> (дата обращения 06.07.2021)
40. Непомнящий В.Ю. Математическая модель канала измерения механической нагрузки на изолятор/ В.Ю. Непомнящий, В.М. Панарин, А.А.

Маслова [и др.]// Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024;12(2). <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1550>

41. Непомнящий В.Ю., Панарин М.В., Панарин В.М., Маслова А.А. Современные системы дистанционного мониторинга воздушных линий электропередач как элемент трансформации в электроэнергетике. Монография. – Тула, Изд-во ТулГУ, 2023. 227 с.

42. Непомнящий В.Ю. Структура модуля дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий, оснащенного датчиком тока// Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXXII международной науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. – С.224-227.

43. Непомнящий В.Ю. Практическое применение изоляторов ВЛ 6-220 кВ в информационно-измерительной системе мониторинга состояния воздушных линий// Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXXII международной науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. –С. 227-229.

44. Непомнящий В.Ю. Математическая модель фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ// Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXXII международной науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. –С. 229-232.

45. Непомнящий В.Ю., Панарин В.М., Маслова А.А. Структура и реализация модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенного датчиком тока// В сборнике: Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы 19-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, 2023. С. 315-321.

46. Непомнящий В.Ю. Обобщенная структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач// Современные проблемы экологии: до-

клады XXXI всероссийской науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2024. –С. 98-101.

47. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике. Режим доступа: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения 24.11.2021)

48. НТПП «Горизонт». Наклонометры / Инклинометры. URL: <https://www.ntpgorizont.ru/product-category/tiltmeters/> (дата обращения 06.07.2021)

49. НТПП «Горизонт». Инклинометр ИН-Д3. URL: <https://www.ntpgorizont.ru/product/in-d3/> (дата обращения 06.07.2021)

50. НТПП «Горизонт». IN-Q2M Инклинометр двухкоординатный. URL: <https://www.ntpgorizont.ru/product/in-q2m/> (дата обращения 06.07.2021)

51. НТПП «Горизонт». SVWG-EC Закладной тензометр. URL: <https://www.ntpgorizont.ru/product/svwg-e%d1%81/> (дата обращения 06.07.2021)

52. Оценка автоматизированных систем сбора и обработки данных на основе показателя внутренней конфликтности /В.А. Минаев, К.Б. Здирук, А.В. Мазин, Е.В. Поддубная // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 29–34.

53. Пат. 2756975 РФ Устройство модуля дистанционного мониторинга проводов воздушных линий электропередач. МПК H02J 13/00; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU)/ Непомнящий В.Ю. [и др.] - № 2020142833; заявл. 23.12.2020; опубл. 07.10.2021, Бюл. № 28.

54. Пат. 2756296 РФ Изолятор с модулем дистанционного мониторинга воздушной линии электропередач. МПК H02J 13/00; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU)/ Непомнящий В.Ю. [и др.] - № 2021102313; заявл. 01.02.2021; опубл. 29.09.2021, Бюл. № 28.

55. Пат. 2762065 РФ Устройство модуля дистанционного мониторинга высоковольтных линий электропередач. МПК H02J 13/00; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU)/ Непомнящий В.Ю. [и др.] - № 2021107948; заявл. 24.03.2021, опубл. 15.12.2021, Бюл. № 35.

56. Петров А.В. Имитация как основа цифровых двойников. Вестник ИрГТУ. 2018. Том 2. №10. С. 56-66.

57. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике/ <https://gisprofi.com/gd/documents/popali-v-seti-kak-rabotayut-tsifrovye-dvojniki-v-elektroenergetike.html> Дата обращения 25.06.2021.

58. Разработка научно обоснованных сценариев и прогнозов использования цифровых технологий в отраслях топливно-энергетического комплекса, включая анализ международного опыта трансформации энергетики и смежных отраслей промышленности, на среднесрочном (2024 год) и долгосрочном горизонтах (2035 год) планирования. URL:<https://in.minenergo.gov.ru/upload/iblock/ac1/ac12569388d4819f2560c76e79c4d953.pdf> (дата обращения 03.06.2021)

59. Реферат-презентация работы «Разработка и внедрение инновационных аппаратно-программных платформ мониторинга, управления и защиты цифровых электрических сетей на основе отечественных технологий и элементной базы»/ Д.И. Панфилов, М.Г. Асташев, В.Ф. Лачугин [и др.]// <https://minobrnauki.gov.ru/common/upload/library/2020/06/referat/R20-039.pdf> Дата обращения 20.06.2021.

60. «Россети»: «Трансформация 2030». Подробнее о том, что такое электрическая сеть// https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Россети:_трансформация_2030_Подробнее_о_том_что_такое_электрическая_сеть Дата обращения: 20.06.2021

61. Самарин А. В., Рыгалин Д. Б., Шкляев А. А. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ВЛ // Естественные и технические науки. 2012. № 1, 2.- С.1-3.

62. Сацук Е.И. Программные и технические средства систем мониторинга гололедообразования и предотвращения гололедно-ветровых аварий // Доклады Всероссийской научно-практической конференции «Высокочастотная связь, электромагнитная совместимость, обнаружение и плавка гололеда на линиях электропередачи». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. С. 208–222.

63. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610037. Программа устройства дистанционного мониторинга проводов воздушных линий электропередач/ Непомнящий В.Ю. [и др.]/ Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU). - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2021 г.

64. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612213. Программа устройства дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач/ Непомнящий В.Ю. [и др.]/ Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU). - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.02.2021 г.

65. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614931. Программа цифрового модуля дистанционного мониторинга опор воздушных линий электропередач / Непомнящий В.Ю. [и др.]/ Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU). - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.03.2021 г.

66. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2010. 686 с.

67. CIM в России: опыт АО «СО ЕЭС» по внедрению и сопровождению Единой информационной модели ЕЭС России в иерархической структуре диспетчерского управления, планы и перспективы/ Н.А. Беляев, Р.А. Богомолов // https://fondsmena.ru/media/EGM_publicationfiles_Article/CIM_-_опыт_СО_ЕЭС_по_внедрению_и_сопровождению_Единой_информационной_модели_ЕЭС_России.pdf Дата обращения: 23.06.2020

68. Современные методы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи. Часть 1. Методы прогнозирования и взвешивания проводов / Р.Г. Минуллин, Э.Ю. Абдуллазянов, В.А. Касимов, М.Р. Яруллин// Проблемы энергетики, 2013, № 7-8. – С. 68-78.

69. Современные подходы к построению информационных моделей в электроэнергетике. Проблемы создания Единой системы классификации и кодирования информации/ Ю. Кудряшов, П. Литвинов, Б. Макоклюев, А. Полижаров// Энергорынок. - №2, 2009. <https://gisprofi.com/gd/documents/2009/97050> Дата обращения 20.06.2021¹.

70. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ВЛ/ А. Самарин, В. Масалов// CONTROL ENGINEERING РОССИЯ. №3 (45), 2013. –С.88-94.

71. СТО 56947007-29.240.003-2008 Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35-1150 кВ. -30 с.

72. Структура системы неразрушающего контроля параметров высоковольтных ЛЭП/ Степанов В.М., Ершов С.В., Непомнящий В.Ю., Шарлай А.О.// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 16-20.

73. Тархов Д.А., Шершнева Е.А. Приближенные аналитические решения уравнения Матьё, построенные на основе классических численных методов / В.А. Сухомлин, Е.В. Зубарева, М.А. Шнепс-Шнеппе // Избранные научные труды XI Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (SITITO 2016). Москва, Россия, 25-26 ноября 2016. CEUR Workshop Proceedings. Т. 1761. С. 356-362. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1761/paper46.pdf> (дата обращения: 05.06.2021).

74. Толстых Т.О., Гамидуллаева Л.А., Шкарупета Е.В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производ-

ства и индустрии 4.0 // Экономика в промышленности. 2018. Т. 11. №. 1. С. 11-19.

75. Трансформация в энергетике. Проблемы и перспективы развития. URL: <http://smartenergysummit.ru/novosti/czifrovaya-transformacziya-v-energetike-problemyi-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения 03.06.2021)

76. «Умные» цифровые двойники – основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения/ А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, В.М. Марусева// Трампин к успеху. 2018. -№13. – С. 12-16.

77. Федоров В. Стандарты обмена данными в электроэнергетике /Открытые системы №9. – 2005. <https://www.osp.ru/os/2005/09/380385> Дата обращения 25.06.2021.

78. Цифровые двойники объектов в решении задач управления/ В.А. Минаев, А.В. Мазин, К.Б. Здирук, Л.С. Куликов// Радиопромышленность. Т. 29, № 3. 2019. – С.68-78.

79. Чекалин А. А., Скрыль С. В., Минаев В. А. Комплексный технический контроль эффективности мер безопасности систем управления в органах внутренних дел. Ч. 2. Практические аспекты технической разведки и комплексного технического контроля. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 205 с.

80. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам/ Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н.// «Информационные и математические технологии в науке и управлении» 2019 № 4 (16). – С.5-19.

81. Электрические сети энергоемких предприятий - воздушные линии 6-220 КВ// <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/elektricheskie-seti-energoemkih-predpriyatij-12.html> Дата обращения 25.06.2020

82. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ

В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). 8-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2002.

83. Эффективные инженерные решения по повышению пропускной способности ВЛ на основе применения системы мониторинга тока и температуры проводов, математического моделирования поведения элементов линий в различных режимах эксплуатации // Материалы презентации МРСК Ходинг// <https://transformator.com.ru/docs/2011/doc/Эффективные%20инженерные%20решения%20.pdf> Дата обращения: 23.06.2021.

84. Яковлев Л.В. Комплексные методы и устройства для защиты проводов и грозозащитных тросов воздушных линий от вибрации, «пляски» и гололедообразования // Энергетик. 2004. № 3. С. 15–17.

85. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // Proc. 17th IEEE Intl. Conf. Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE, 2019. P. 1536–1542.

86. Antonov V., Tarkhov D., Vasilyev A. Unified approach to constructing the neural network models of real objects. Part 1 // Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2018. Vol. 41, issue 18. Pp. 9244-9251. DOI: 10.1002/mma.5205

87. Atroshchenko E., Xu G., Tomar S., Bordas S. Weakening the tight coupling between geometry and simulation in isogeometric analysis: from sub-and super-geometric analysis to Geometry Independent Field approximation (GIFT). 2017. arXiv:1706.06371

88. Bloomberg New Energy Finance (2Q 2017 Energy Smart Technologies Market Outlook, June 2017). URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (дата обращения 03.06.2021)

89. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // Journal of Service Management. 2018. T. 29. №. 5. Pp. 776 - 808.

90. Bortkovskaya M.R., Vasilyev P.I., Zulkarnay I.U., Semenova D.A., Tarkhov D.A., Udalov P.P., Shishkina I.A. Modeling of the membrane bending with multilayer semi-empirical models based on experimental data / V. Sukhomlin, E. Zubareva, M. Shneps-Shneppe (Eds.) // Proceedings of the 2nd International scientific conference “Convergent cognitive information technologies” (Convergent’2017). Moscow, Russia: November 24–26, 2017. CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2064. Pp. 150-156. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2064/paper18.pdf> (дата обращения: 05.06.2021).

91. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect / P. Hehenberger, D. Bradley (Eds.) // Mechatronic Futures. Springer International Publishing, 2016. Pp. 59-74. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5

92. Brosinsky C., Westermann D., Krebs R. Recent and prospective developments in power system control centers: Adapting the digital twin technology for application in power system control centers // Proc. 2018 IEEE International Energy Conference ENERGYCON. IEEE, 2018. P. 1–6.

93. Budkina E.M., Kuznetsov E.B., Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., She-myakina T.A., Vasilyev A.N. Neural network approach to intricate problems solving for ordinary differential equations // Optical Memory and Neural Networks. 2017. Vol. 26, issue 2. Pp. 96-109. DOI: 10.3103/S1060992X17020011

94. Chawla V., Sogani P. Cloud Computing – The Future / A. Mantri, S. Nandi, G. Kumar, S. Kumar (Eds.) // High Performance Architecture and Grid Computing. HPAGC 2011. Communications in Computer and Information Science, Vol. 169. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. Pp. 113-118. DOI: 10.1007/9783-642-22577-2_15

95. Digital Transformation Initiative Oil and Gas Industry World Economic Forum. URL:<http://reports.weforum.org/sap-teched/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/dti-oil-and-gas-industry-white-paper.pdf> (дата обращения 01.09.2021)

96. Digitalization and energy 2017. URL: <https://www.iea.org/digital/> (дата обращения 01.09.2021)

97. Dong-Ki K. et al. A Study of Resource Management for Fault-Tolerant and Energy Efficient Cloud Datacenter / Y. Zhang, L. Peng, C-H. Youn (Eds.) // Cloud Computing. 6th International Conference, CloudComp 2015, Daejeon, South Korea, October 28-29, 2015, Revised Selected Papers. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Vol. 167. Springer International Publishing, 2016. Pp. 22-29.

98. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. T. 25. №. 2. Pp. 87-92.

99. Erikstad S. Design patterns for digital twin solutions in marine systems design and operations // Proc. 17th Intl. Conf. Computer and IT Applications in the Maritime Industries COMPIT'18. Hamburg, Technische Universität Hamburg, 2018. P. 354–363.

100. Estelles-Arolas E., Gonzalez-Ladron-de-Guevara F. Towards an Integrated Crowdsourcing Definition. Journal of Information Science, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 189–200.

101. Fraunhofer IZM. ASTROSE Line Optimization. URL: <https://www.astrose.de/en/astrose-einsatzgebiete/leitungsoptimierung.html> (дата обращения 06.07.2021)

102. Fraunhofer IZM. ASTROSE Ice Warning. <https://www.astrose.de/en/astrose-einsatzgebiete/eiswarnung.html> (дата обращения 06.07.2021)

103. Fraunhofer IZM. ASTROSE Risk Detection <https://www.astrose.de/en/astrose-einsatzgebiete/gefahrendetektion.html> (дата обращения 06.07.2021)

104. Fraunhofer IZM. ASTROSE Theft Detection. URL: <https://www.astrose.de/en/astrose-einsatzgebiete/diebstahlschutz.html> (дата обращения 06.07.2021)

105. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // Benchmark. July 2018. Pp. 48–53.

106. Fuentes D., Oden J., Diller K., Hazle J., Elliott A., Shetty A., Stafford R. Computational modeling and real-time control of patient-specific laser treatment of cancer // *Annals of Biomedical Engineering*. 2009. Vol. 37, issue 4. Pp. 763-782.
107. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. Pp. 18.
108. Gorbachenko V.I., Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N., Zhukov M.V. Neural Network Technique in Some Inverse Problems of Mathematical Physics / L. Cheng, Q. Liu, A. Ronzhin (Eds.) // *Advances in Neural Networks – ISSN 2016*. ISSN 2016. Lecture Notes in Computer Science - LNCS. Vol. 9719. Springer, Cham, 2016. Pp. 310-316. DOI: 10.1007/978-3-319-40663-3_36
109. Hughes T.J. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Courier Corporation, North Chelmsford, 2012. 704 p
110. Kainov N.U., Tarkhov D.A., Shemyakina T.A. Application of Neural Network Modeling to Identification and Prediction Problems in Ecology Data Analysis for Metallurgy and Welding Industry // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2014. Vol. 17, no 1. Pp. 57–63.
111. Kaverzneva T., Lazovskaya T., Tarkhov D., Vasilyev A. Neural network modeling of air pollution in tunnels according to indirect measurements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 772, no. 1. P. 012035. DOI: 10.1088/17426596/772/1/012035
112. Kovalyov S.P. An approach to develop a generative design technology for power systems // *Proc. VI International Workshop «Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security» (IWCI 2019)*. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2019. Vol. 169. P. 79–82. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/iwci-19/125917306>.

113. Lazovskaya T.N., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. Parametric Neural Network Modeling in Engineering // Recent Patents on Engineering. 2017, Vol. 11, no. 1. Pp. 10-15.

114. Lazovskaya T., Tarkhov D. Multilayer neural network models, based on grid methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 158, no. 1. P. 012061.

115. Lazovskaya T., Tarkhov D., Vasilyev A. Multi-Layer Solution of Heat Equation / B. Kryzhanovsky, W. Dunin-Barkowski, V. Redko (Eds.) // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research. Studies in Computational Intelligence. Vol. 736. Springer International Publishing, 2018. Pp. 17–22. DOI: 10.1007/978-3-319-66604-4_3

116. Lê M., Delingett, H., Kalpathy-Cramer J., Gerstner E.R., Batchelor T., Unkelbach J., Ayache N. Bayesian Personalization of Brain Tumor Growth Model / A.F. Frangi, J. Hornegger, N. Navab, W.M. Wells (Eds.) // MICCAI - Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. 2015, Oct 2015, Munich, Germany. Lecture Notes in Computer Science - LNCS. Vol. 9350. Springer, New York, 2015. Pp. 424–432. DOI: 10.1007/9783-319-24571-3_51

117. Le Folgoc L., Delingette H., Criminisi A., Ayache N. Sparse Bayesian registration / P. Golland, N. Hata, C. Barillot, J. Hornegger, R. Howe (Eds.) // MICCAI - Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. Proceedings of the 7th International Conference, Boston, MA, USA, September 14-18, 2014. Part I. Lecture Notes in Computer Science - LNCS. Vol. 8673. Springer, Cham, 2014. Pp. 235-242. DOI: 10.1007/9783-319-10404-1_30

118. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing letters. 2015. T. 3. Pp. 18-23.

119. Lindsey. Overhead Sensors. Traditional Line Post Insulators. <https://lindsey-usa.com/sensors/overhead-sensors/> (дата обращения 06.07.2021)

120. Lindsey. Transmission Line Conductor Monitor. URL: <https://lindsey-usa.com/sensors/transmission-line-monitor/> (дата обращения 06.07.2021)

121. Lindsey. Underground Sensors. URL: <https://lindsey-usa.com/sensors/underground-sensors/> (дата обращения 06.07.2021)
122. Madni A.M., Madni C.C., Lucero S.D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering // *Systems*. 2019. Vol. 7(1). P. 7. <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>.
123. Makoklyev B. I., Antonov A. V., Nabiev R. F. Information structure and software for processing and storing data on operating environment and parameters 5. // *Power Technology and Engineering*. 2004. No 6.
124. Marussig B., Zechner J., Beer G., Fries T.P. Fast isogeometric boundary element method based on independent field approximation // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. Vol. 284. Pp. 458-488.
125. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. 7 p.
126. Ming M., Wang R., Zha Y., Zhang T. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system using an enhanced multi-objective evolutionary algorithm // *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 674. <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/5/674>.
127. Natarajan S., Ooi E.T., Saputra A., Song C. A scaled boundary finite element formulation over arbitrary faceted star convex polyhedral // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2017. Vol. 80. Pp. 218-229. DOI: 10.1016/j.enganabound.2017.03.007
128. Nguyen V.P., Anitescu C., Bordas S.P., Rabczuk T. Isogeometric analysis: an overview and computer implementation aspect // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2015. Vol. 117. Pp. 89-116. DOI: 10.1016/j.matcom.2015.05.008
129. Nguyen V.P., Rabczuk T., Bordas S., Duflo M. Meshless methods: a review and computer implementation aspects // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2008. Vol. 79, issue 3. Pp. 763-813. DOI: 10.1016/j.matcom.2008.01.003

130. Nolan J.S., Pollard B.S., Breiner S., Anand D., Subrahmanian E. Compositional models for power systems // Proc. Applied Category Theory Conf. ACT 2019. NIST, 2019. <https://www.nist.gov/publications/compositional-models-power-systems>.
131. Oden J.T., Lima E.A., Almeida R.C., Feng Y., Rylander M.N., Fuentes D., Faghihi D., Rahman M.M., DeWitt M., Gadde M., Cliff Z.J. Toward predictive multiscale modeling of vascular tumor growth // Archives of Computational Methods in Engineering. 2016. Vol. 23, issue 4. Pp. 735-779.
132. Ooi E., Song C., Natarajan S. A scaled boundary finite element formulation with bubble functions for elasto-static analyses of functionally graded materials // Computational Mechanics. 2017. Vol. 60, issue 6. Pp. 943–967.
133. OTLM Knill Gruppe. OTLM LiMa Software. URL: <https://www.otlm.eu/energy/otlm-center-software/> (дата обращения 06.07.2020)
134. OTLM Knill Gruppe. OTLM Solutions. URL: <https://www.otlm.eu/solutions/> (дата обращения 06.07.2021)
135. OTLM Knill Gruppe/ OTLM Weather Station. URL: <https://www.otlm.eu/energy/otlm-weather-station/> (дата обращения 06.07.2021)
136. Peng X., Atroshchenko E., Kerfriden P., Bordas S. Isogeometric boundary element methods for three dimensional static fracture and fatigue crack growth // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2017. Vol. 316. Pp. 151185.
137. Qia Q., Taof F., Zuoa Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72. Pp. 237–242.
138. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. Pp. 567-572.
139. Saputra A., Talebi H., Tran D., Birk C., Song C. Automatic image-based stress analysis by the scaled boundary finite element method // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2017. Vol. 109, issue 5. Pp. 697-738.

140. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*. 2015, vol. 61, pp. 85–117.
141. Scott M.A., Simpson R.N., Evans J.A., Lipton S., Bordas S.P., Hughes T.J., Sederberg T.W. Isogeometric boundary element analysis using unstructured T-splines // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2013. Vol. 254. Pp. 197-221.
142. Shemyakina T.A., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. Neural Network Technique for Processes Modeling in Porous Catalyst and Chemical Reactor / L. Cheng, Q. Liu, A. Ronzhin (Eds.) // *Advances in Neural Networks – ISNN 2016*. ISNN 2016. Lecture Notes in Computer Science - LNCS. Vol. 9719. Springer, Cham, 2016. Pp. 547-554.
143. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // *CIRP Annals*. 2017. T. 66. №. 1. Pp. 137-140.
144. Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework // *International Journal of Production Research*. 2018. Pp. 1-19.
145. TLSM Security Monitor. Real Time Transmission Tower Security Monitor. URL: <http://lindsey-usa.com/wp-content/uploads/2017/12/11F-004-TLSM-A4-V3-August-2017-full.pdf> (дата обращения 06.07.2021)
146. Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Gartner, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/doc/3891569?srcId=1-3931087981> (дата обращения: 20.06.2021).
147. Uhlemann T.H.-J., Steinhilper C.L.R., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 // *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. Part of special issue: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Ed. by S. Takata, Y. Umeda, S. Kondoh. Pp. 335-340.
148. Uhlemann T.H.-J., Schock C., Lehmann C., Freiberger S., Steinhilper R. The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems // *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 9. Pp. 113-120.

149. Vasilyev A., Tarkhov D. Mathematical Models of Complex Systems on the Basis of Artificial Neural Networks // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2014. Vol. 17, issue 3. Pp. 327-335.

150. Vasilyev A.N., Tarkhov D.A., Tereshin V.A., Berminova M.S., Gal'yautdinova A.R. Semi-empirical Neural Network Model of Real Thread Sagging / B. Kryzhanovsky, W. Dunin-Barkowski, V. Redko (Eds.) // *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 736. Springer International Publishing, 2018. Pp. 138–146.

151. Zulkarnay I.U., Kaverzneva T.T., Tarkhov D.A., Tereshin V.A., Vinokhodov T.V., Kapitsin D.R. A Two-layer Semi-Empirical Model of Nonlinear Bending of the Cantilevered Beam // *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1044, conference 1. P. 012005.

**ПРОГРАММА-МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ЛАБОРАТОРНОГО
ОБРАЗЦА БЛОКА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
ИЗОЛЯТОРОВ ВЛ**

ООО «СервисСофт»

**Программа-методика проведения испытаний
лабораторного образца изделия**

**Автономный модуль измерения токов утечки изоляторов
Версия 1.0**

г. Тула

Содержание

1. Общие положения.....	3
2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний.....	3
3. Требования безопасности.....	5
4. Определяемые показатели (характеристики) и точность их измерения.....	5
5. Режимы испытаний изделия.....	7
6. Методы испытаний.....	7
7. Проведение испытаний.....	7
8. Отчётность.....	8

1. Общие положения

1.1 Наименование и обозначение изделия Наименование изделия: «Автономный модуль измерения токов утечки изоляторов» Сокращенное название – АМИТ (далее, также – АМИТ, модуль, изделие) разработан согласно техническому заданию.

1.2 Цель испытаний.

Целью испытаний АМИТ являются проверки:

- соответствия чертежам, техническим требованиям;
- оценка соответствия требованиям ТЗ;
- соответствия требованиям технической безопасности.

1.3 Виды испытаний, которым подвергается изделие.

1.3.1 Прием-сдаточным испытанием подвергается каждое изделие, периодическим – подвергается одно изделие прошедшее прием-сдаточные испытания. Квалификационные испытания в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54024-2010.

1.3.2 Каждое изделие, изготовлено по одной и той же конструкторской и технологической документации и предъявляемое на контроль по одному сопроводительному документу, должно подвергаться прием-сдаточному контролю отдела технического контроля (ОТК), и периодическим испытаниям в оговоренном порядке.

1.3.3 Система подвергается контролю ОТК в полном объеме.

2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

2.1 Требования к месту проведения испытаний

2.1.1 Испытания проводятся на базе предприятия или в аккредитованных испытательных центрах, укомплектованным персоналом и оборудованием в соответствии с данной программой-методикой.

2.2 Требования к средствам проведения испытаний

Приборы, применяемые при испытаниях, должны быть поверены в соответствии с нормативной документацией на методы и средства поверки и должны соответствовать ГОСТ Р 51837. Погрешность параметров измерения не должна превышать:

- температуры: 2.5%;
- времени: 3%;
- линейных размеров: ± 10 мм;
- массы $\pm 1\%$;
- электрических параметров: 0.5 – 2%.

2.2.1 Средства измерений, используемые при испытаниях, могут быть заменены другими, обеспечивающими требуемую точность измерений.

2.2.2 Все средства испытаний должны соответствовать ПР 50.2.006 и ПР 50.2.009.

2.2.3 Все используемое при проведении испытаний испытательное оборудование и средства измерений должны быть аттестованы и проверены.

2.2.4 Порядок поверки и аттестации должен соответствовать требованиям, установленным в действующих нормативных документах, быть документирован (в том числе и в виде графиков поверок и аттестации).

2.2.5 Все оборудование и средства измерений должны содержаться в условиях, обеспечивающих их сохранность и защиту от повреждений и преждевременного износа.

2.3 Требования к условиям проведения испытаний

2.3.1 Все испытания, за исключением особо оговариваемых, проводятся в нормальных условиях окружающей среды по ГОСТ 15150, температура окружающей среды, °С:

– нормальная: 20,

– минимальная: 5,

– максимальная: 40;

– относительная влажность: от 20 до 75 %;

атмосферное давление от 84 до 106,7 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.).

2.3.2 В месте проведения испытаний должен быть обеспечен достаточный уровень сигнала GSM сети. Для обеспечения достаточного уровня приёма сети GSM может использоваться ретранслятор или усилитель сигнала.

2.4 Требования к подготовке изделия к испытаниям

2.4.1 Система должна быть полностью подготовлена к испытанию и проверена в соответствии с требованиями конструкторской документации, требованиями стандартов безопасности труда, а также требованиям стандартов и других документов.

2.5 Требования к порядку работы на изделии по завершении испытаний

2.5.1 После завершения испытаний проводятся работы по обслуживанию изделия, предусмотренные технологической документацией.

2.6 Требования к персоналу, осуществляющему подготовку к испытанию и испытание.

2.6.1 К проведению испытаний допускается персонал, прошедший обучение и (при необходимости) аттестацию, изучивший технологическую документацию и эксплуатационную документацию на устройство и имеющий степень аттестации по электробезопасности не ниже третьей группы.

2.6.2 При проведении работ при проверке и испытаниях персонал обязан соблюдать правила техники безопасности согласно "Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей" и "Правилам техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей".

3 Требования безопасности

3.1 Требования безопасности при подготовке изделия к испытаниям

3.1.1 Персонал, проводящий испытания системы, должен знать:

- устройство и принцип работы системы и его составных частей;
- технику безопасности, согласно утвержденных документов;
- настоящую программу-методику испытаний.

3.1.2 К проведению испытаний допускается персонал, знающий правила и прошедший инструктаж по технике безопасности.

3.2 Требования безопасности при проведении испытаний

3.2.1 Требования безопасности при проведении испытаний по ГОСТ 12.2.003, ГОСТ МЭК 60950-1, ГОСТ 12.2.007.0, ПУЭ, ПОТУЭ, требованиям нормативных документов предприятия, на котором проводятся испытания, и требованиям, изложенным в руководстве по эксплуатации, прилагаемой к Изделию.

3.2.2 Присутствие посторонних лиц во время проведения испытаний не допускается.

4 Определяемые показатели (характеристики) и точность их измерения

4.1 Номинальные значения показателей (характеристик)

Основные технические характеристики и параметры при температуре $25 \pm 3^\circ \text{C}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технические параметры

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение питания, В	5
Используемые каналы связи при передачи данных	GSM, радиоканал 868 МГц
Масса изделия кг.	≤ 5
Потребляемая мощность, Вт	2
Срок службы изделия, лет	10
Ток утечки через гирлянду изоляторов, мА	1-10
Динамика нарастания тока утечки	мА/мин
Единичные всплески тока (случайные разряды)	-

4.1.1 Перечень оборудования, материалов и реактивов (стенды, приборы, приспособления, оснастка, инструмент и др.) для определения каждого показателя приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Перечень оборудования, материалов и реактивов

Наименование оборудования	Класс точности	Обозначение стандарта, технических условий	Примечание
Комплект измерительный К505, предел измерения: тока 600А, напряжения 600В, мощности 360кВт	1,0	ГОСТ 8711	
Штангенциркуль ШЦ-Ш-315-0.1, предел измерения 300мм		ГОСТ 166	
Линейка измерительная металлическая, предел измерения 500мм	1%	ГОСТ 427	цена деления 1 мм
Весы, предел взвешивания 10 кг	.	ГОСТ Р 53228	
Рулетки измерительные металлические, предел измерения 3м		ГОСТ 7502	
ЛАТР Suntek L3000, предел выдаваемого тока 12А, напряжения – 300В			
Барометр БАММ-1, предел измерения 106 кПа (800 мм рт.ст.)		ТУ 25-11.1513-79	
Психрометр аспирационный МВ-4М, предел измерения относительной влажности 100%		ТУ 25-16.07.054-85	
Лупа Ли-3-10		ГОСТ 25706	
Вольтметр Ц33, предел измерения напряжения 500В	2,5	ТУ 25-04-3718-79	
Амперметр Ц33, предел измерения тока 10А	2,5	ТУ 25-04-3718-79	
Вольтметр Э365-1, предел измерения 600В	1,5	ТУ 25-04-3720-79	
Источник постоянного тока и тока произвольной формы 6221	0,05		
Испытательные стенды			
Примечание – Допускается применение других приборов и программ, удовлетворяющих указанным требованиям с классом точности не ниже приведённого в данном перечне.			

5 Режимы испытаний изделия

5.1 Температурный режим во время испытаний должен отвечать режиму, приведенному в эксплуатационной документации, если вид испытаний не подразумевает иного.

6 Методы испытаний

6.1 Внешний осмотр, проверку правильности изготовления и монтажа. При внешнем осмотре проверяют соответствие изделия на комплектность и упаковки конструкторской документации:

- внешний вид, комплектность, размеры и массу, отсутствие повреждений, марку и сечение проводов, качество монтажа (подергиванием проводников);
- маркировку;
- качество крепления измерительного и питающего трансформаторов. Изделие считается выдержавшей испытания, если в процессе проверки не выявлены отличия внешнего вида от конструкторской документации.

Маркировка должна соответствовать конструкторской документации и образцам эталонам, утвержденным в установленном порядке.

6.2 Проверка работоспособности.

6.2.1 Первое включение

Смонтировать изделие на подвесе при помощи стандартных крепёжных изделий. Для включения устройства подключить источник питания напряжением 5 вольт и током не менее 200 мА к временным клеммам питания, обозначенным «+» и «-» в соответствии с обозначением. Подать питающее напряжение. При правильном подключении загорится красный светодиод «Питание ОК».

7. Проведение испытаний.

7.1 В случае успешного включения изделия, необходимо проверить корректность измерения утечки тока. Необходимо собрать испытательную схему согласно рис. 1. Подключиться к серверу приёма данных с ПК или смартфона и ожидать появления нулевых значений в графах «Ток утечки» и «Максимальный ток утечки». Подать на испытательные клеммы устройства переменный ток 1 мА. Проконтролировать значение тока по мультиметру. По истечении 1 минуты после подачи измеряемого тока должны обновиться данные на сайте мониторинга. При успешном выполнении этого условия выполнить повышение измеряемого тока с шагом 1 мА до 10 мА включительно. Устройство считается пригодным при разнице значений тока на сайте мониторинга и мультиметре не более 20 % для каждого шага измерений.

7.2 Для проверки фиксации единичных разрядов подать на испытательные клеммы устройства импульс переменного тока 5 мА и длительностью 10 мс. В случае отображения на сайте мониторинга сигнала «Обнаружены единичные разряды!» испытание считать успешным.

8. Отчетность

8.1 Результаты измерений и испытаний оформляются протоколом испытаний.

**ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И СВИДЕТЕЛЬСТВА
НА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2756296

**ИЗОЛЯТОР С МОДУЛЕМ ДИСТАНЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Патентообладатель: *Публичное акционерное общество "МРСК
Центра и Приволжья" (RU)*

Авторы: *Акуличев Виталий Олегович (RU), Непомнящий
Валерий Юрьевич (RU), Висич Сергей Геннадьевич (RU),
Панарин Михаил Владимирович (RU), Говорухин Юрий
Алексеевич (RU)*

Заявка № 2021102313

Приоритет изобретения 01 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 сентября 2021 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 февраля 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2756975

**УСТРОЙСТВО МОДУЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Патентообладатель: *Публичное акционерное общество "МРСК
Центра и Приволжья" (RU)*

Авторы: *Акуличев Виталий Олегович (RU), Дудин Андрей
Дмитриевич (RU), Непомнящий Валерий Юрьевич (RU),
Висич Сергей Геннадьевич (RU), Панарин Михаил
Владимирович (RU), Говорухин Юрий Алексеевич (RU)*

Заявка № 2020142833

Приоритет изобретения **23 декабря 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **07 октября 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **23 декабря 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2762065

**УСТРОЙСТВО МОДУЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО
МОНИТОРИНГА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Патентообладатель: *Публичное акционерное общество "МРСК
Центра и Приволжья" (RU)*

Авторы: *Акуличев Виталий Олегович (RU), Непомнящий
Валерий Юрьевич (RU), Висич Сергей Геннадьевич (RU),
Панарин Михаил Владимирович (RU)*

Заявка № 2021107948

Приоритет изобретения 24 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 декабря 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 24 марта 2041 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021610037

**Программа устройства дистанционного мониторинга
проводов воздушных линий электропередач**

Правообладатель: *Публичное акционерное общество
«Межрегиональная распределительная сетевая компания
Центра и Приволжья» (RU)*

Авторы: *Акуличев Виталий Олегович (RU), Дудин Андрей Дмитриевич
(RU), Непомнящий Валерий Юрьевич (RU), Висич Сергей Геннадьевич
(RU), Панарин Михаил Владимирович (RU), Говорухин Юрий
Алексеевич (RU)*

Заявка № 2020667323

Дата поступления 22 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 января 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021612213

**Программа устройства дистанционного мониторинга
изоляторов воздушных линий электропередач**

Правообладатель: *Публичное акционерное общество
«Межрегиональная распределительная сетевая
компания Центра и Приволжья» (RU)*

Авторы: *Акуличев Виталий Олегович (RU), Непомнящий
Валерий Юрьевич (RU), Висич Сергей Геннадьевич (RU),
Панарин Михаил Владимирович (RU), Говорухин Юрий
Алексеевич (RU)*

Заявка № 2021610926

Дата поступления 01 февраля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 февраля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иванев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021614931

**Программа цифрового модуля дистанционного
мониторинга опор воздушных линий электропередач**

Правообладатель: *Публичное акционерное общество «МРСК
Центра и Приволжья» (RU)*

Авторы: *Акуличев Виталий Олегович (RU), Непомнящий
Валерий Юрьевич (RU), Висич Сергей Геннадьевич (RU),
Панарин Михаил Владимирович (RU)*

Заявка № 2021613910

Дата поступления 24 марта 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 31 марта 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



Общество с ограниченной ответственностью
«СервисСофт Инжиниринг»
 Инновационно-промышленная группа

194044, Санкт-Петербург г, Большой Сампсониевский пр-кт, дом № 60, литер А помещение 2-Н пом. 127
 тел./факс: 8-800-250-01-04 e-mail: info@ssoft24.ru internet: <http://www.ssoft24.com/>

№ _____

На № _____

Для представления
 в ученый совет

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что Непомнящим Валерием Юрьевичем в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований создана информационно-измерительная система дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач, позволяющая осуществлять непрерывный сбор информации с изоляторов ВЛ, запись и хранение информации, преобразование информации в вид, наиболее удобный для анализа формирование рекомендаций для принятия управленческих решений, которая в настоящее время применяется в деятельности ООО «СервисСофт Инжиниринг», а именно используются рекомендации и программы при создании элементов систем мониторинга технического состояния изоляторов ВЛ.

Директор



Тюрин Н.Н.



Общество ограниченной ответственностью
Научно-производственное объединение

ЭнергоСистемы

300034, г. Тула, ул. Революции, д. 35-А

Для представления
в ученый совет

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим удостоверяется, что рекомендации, содержащиеся в диссертационном исследовании Непомнящего Валерия Юрьевича, в части распределения вычислительной реализации цифровых математических моделей по каналу измерения тока утечки (частичные разряды) и по каналу измерения механической нагрузки на изолятор на микропроцессоре модуля дистанционного мониторинга изоляторов, а также на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании, использовались в ООО НПО «ЭнергоСистемы» при применении информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.

Разработанное Непомнящим В.Ю. конструктивное исполнение и лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенного датчиком тока, позволяет проводить моделирование взаимодействия модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ с цифровой математической моделью цифрового двойника, а также исследование динамических, статических и точностных характеристик лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ.

Генеральный директор



Сергеечев В.В.



СпецПриборКомплектация

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

Россия, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1. Тел. (495) 532-58-57. E-mail: sales@spcomplekt.ru

*Для представления
в ученый совет*

АКТ

о внедрении программного продукта

Настоящий акт о внедрении свидетельствует, что программные продукты, разработанные Непомнящим Валерием Юрьевичем, имеющие следующие свидетельства на программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610037. Программа устройства дистанционного мониторинга проводов воздушных линий электропередач// Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU). - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2021 г.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612213. Программа устройства дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач// Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU). - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.02.2021 г.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614931. Программа цифрового модуля дистанционного мониторинга опор воздушных линий электропередач // Публичное акционерное общество "МРСК Центра и Приволжья" (RU). - зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.03.2021 г.

используются в качестве ключевых программных решений для проработки проектов в сфере энергетики с ключевыми Заказчиками ООО «СпецПриборКомплектация».

В ходе эксплуатации программных продуктов было подтверждено, что они обладают всеми заявленными возможностями.

С уважением,
Генеральный директор
Макаров Сергей Витальевич





УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

В.В. Котов

2023 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования Непомнящего В.Ю. на тему «Информационно-измерительная система дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.11 «Информационно-измерительные и управляющие системы».

В период с 2020 по 2023 год Непомнящим В.Ю. проводились исследования в области современных систем дистанционного мониторинга воздушных линий электропередач как элемента цифровой трансформации в электроэнергетике, в том числе по разработке информационно-измерительной системы дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач.

В рамках работ была создана и внедрена в учебный процесс по направлению «Техносферная безопасность» информационно-измерительная система дистанционного мониторинга изоляторов воздушных линий электропередач, реализующая:

- цифровую математическую модель модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ по каналу измерения тока утечки;
- цифровую математическую модель модуля дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на изолятор.

Кроме того, в учебном процессе используется лабораторный образец модуля дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ, оснащенного датчиком тока, и модуль измерения частичных разрядов на проводе ВЛ.

На основе результатов диссертационного исследования опубликована монография «Современные системы дистанционного мониторинга воздушных линий электропередач как элемент цифровой трансформации в электроэнергетике», которая также используется как один из источников литературы в учебном процессе.

На основе этого, были разработаны методические указания к практической работе «Оценка состояния изоляторов воздушных линий электропередач на основе дистанционного мониторинга» по дисциплине «Компьютерные и информационные технологии в сфере безопасности» у магистров направления 20.04.01 «Техносферная безопасность». Данная практическая работа позволяет студентам приобрести умения и навыки по оценке безопасности и технического состояния изоляторов ВЛ на основе современных технологий.

Зав. каф. ОТиОС,
д.т.н., проф.

В.М. Панарин