

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»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Тула 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: **Маслова Анна Александровна,**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Лачугин Владимир Федорович,**
доктор технических наук,
Акционерное общество «Россети Научно-технический центр», ведущий научный сотрудник, г. Москва

Сацук Евгений Иванович,
доктор технических наук,
Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»), начальник Службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва)

Защита состоится 10 июня 2025 г. в 14.00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» <https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-03>

Автореферат разослан «11» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маслова
Анна Александровна

Общая характеристика работы

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 научная 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).

б. 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 точностных 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», ООО «СервисСофт Инжиниринг», ООО «СпецПриборКомплектация», 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, необходимость 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 и формирования рекомендаций для принятия управленческих решений. Обобщенная структура ИИС для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач представлена на рисунке 1.

ИИС для диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных 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 акселерометрами по трем осям относительно опоры, блоки фиксации предельного наклона опоры, первичной фильтрации ускорений, форсирующие блоки, делители ускорений, перестраиваемые полосовые фильтры, блоки фиксации удара.

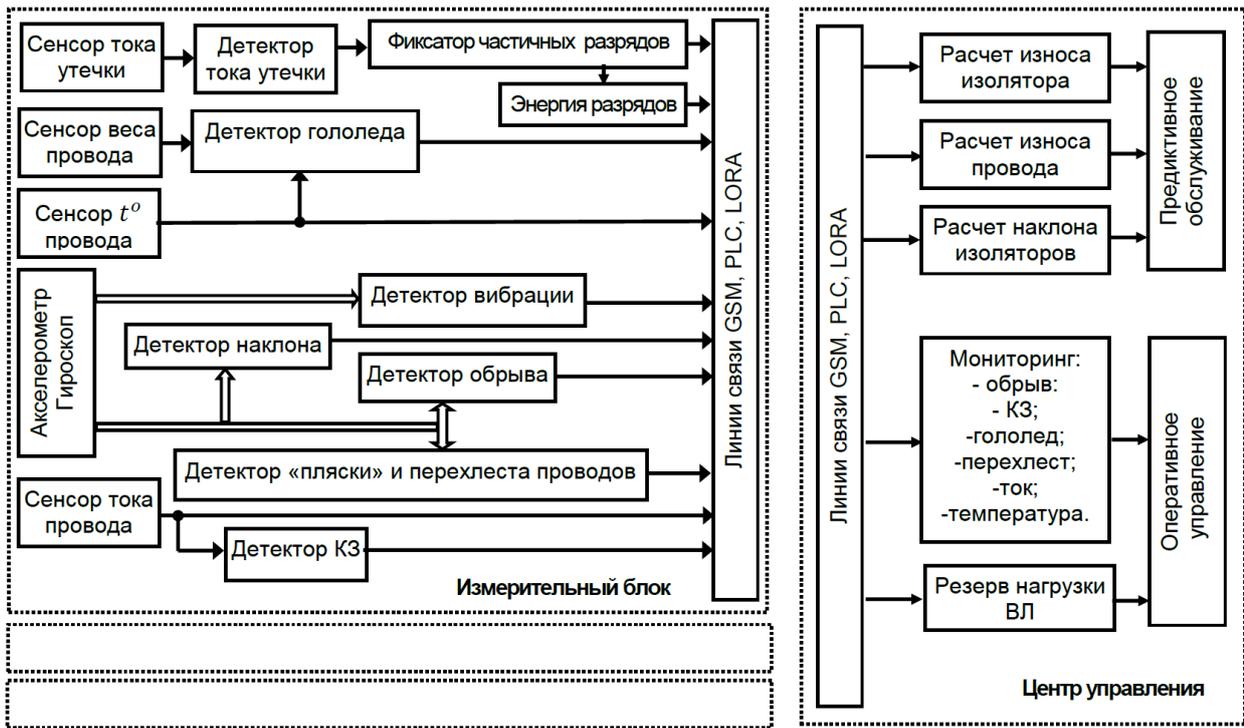


Рисунок 1 – Обобщенная структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач

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 энерго-снабжающей организации (ЦУ ЭО).

Ток измеряется трансформатором тока, ток утечки и частичные разряды – специализированным трансформатором на гирлянде изоляторов, механическая нагрузка – тензодатчиками.

Территориально распределенные информационно-измерительные блоки инициируют обмен информацией в случае выхода за допустимые пределы параметров обслуживаемых технологических процессов 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-измерительного блока и, в меньшей степени, запросами от центра сбора информации. Параметры запросов и обслуживания в этом случае определяются следующими выражениями

$$\lambda = \lambda_{ш}; \mu = \mu_{ш}; \alpha_{ш} = \frac{\lambda_{ш}}{\mu_{ш}}, \quad (1)$$

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 $p_{u.отк.}$ на обслуживание 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

$$\alpha_u = \frac{\sum_{i=1}^I \lambda_{ui}}{\mu_u} ; \quad p_{u.отк.} = \frac{\sum_{i=1}^I \lambda_{ui}}{\mu_u + \sum_{i=1}^I \lambda_{ui}} . \quad (2)$$

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

$$p_{uj} = \frac{\frac{\alpha_u^j}{j!}}{\sum_{j=0}^J \frac{\alpha_u^j}{j!} + \frac{\alpha_u^J}{J!} \sum_{m=1}^M \left(\frac{\alpha_u}{J}\right)^m} , \quad 0 \leq j \leq J ; \quad (3)$$

$$p_{uJ+m} = \frac{\frac{\alpha_u^j}{J!} \left(\frac{\alpha_u}{J}\right)^m}{\sum_{j=0}^J \frac{\alpha_u^j}{j!} + \frac{\alpha_u^J}{J!} \sum_{m=1}^M \left(\frac{\alpha_u}{J}\right)^m} , \quad 1 \leq m \leq M . \quad (4)$$

В режиме «тревога», обмен информацией инициируется при резком возрастании количества запросов при аварийных ситуациях:

$$\lambda = \lambda_m , \quad \mu = \mu_m , \quad \alpha_m = \sum_{i=1}^I \lambda_{mi} / \mu_m . \quad (5)$$

Для сохранения работоспособности каналов ИИС через устройство управления изменяет формат посылок и запрещает передачу повторяющихся посылок множеству информационно управляющих блоков, расположенных на территории, где развивается аварийная ситуация.

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.

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

$$i_{ут}(k), i_{ут}(k-1), i_{ут}(k-2), \dots, i_{ут}(k-N+1), i_{ут}(k-N), \quad (6)$$

где $i_{ут}(k)$ – измеренное текущее значение тока утечки, А; k – порядок отсчета значений переменных при квантовании; N – количество отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени.

Значение N определяется соотношением

$$N = \frac{T_{I_{ут}}}{T_{ут}}, \quad (7)$$

где $T_{ут}$ – период квантования по времени значений с трансформатора тока утечки, с; $T_{I_{ут}}$ – период передачи данных от блока интеллектуальной диагностики (время между соседними посылками при штатных параметрах мониторинга), с.

В результате последовательность (6) формируется непосредственно в блоке дистанционного мониторинга изоляторов.

Данная последовательность представляет собой набор отсчетов тока утечки через установленные интервалы времени, длина последовательности составляет N отсчетов.

Фиксация динамики нарастания тока утечки изоляторов формируется в виде числовой последовательности

$$i_{ут}(0), i_{ут}(1), i_{ут}(2), \dots, i_{ут}(N_{T_{ic}} - 1), i_{ут}(N_{T_{ic}} - 2), i_{ут}(N_{T_{ic}}), \quad (8)$$

где $N_{T_{ic}}$ – количество отсчетов значений тока утечки $i_{ут}$ на периоде сетевого напряжения; причем $i_{ут}(0) = 0$, фиксация перехода синусоидального тока через ноль в положительную область;

$$N_{T_{ic}} = \frac{T_c}{T_{i_{ут}}}, \quad (9)$$

где T_c – период сети переменного тока, с.

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

Проводим сравнение связанных отсчетов тока утечки на соседних периодах сети

$$K_{ут}(k) = \frac{i_{ут}(k)}{i_{ут}(N_{T_{ic}}+k)} \quad \text{для } k \in (1, N_{T_{ic}}), \quad (10)$$

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

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

$$\text{Если } K_{ут}(k) > K_{утф}, \quad (11)$$

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

При соблюдении условия (11) блок интеллектуальной диагностики изоляторов формирует последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов

$$i_{утфн}(0), i_{утфн}(1), i_{утфн}(2), \dots, i_{утфн}(N_{T_{ic}} - 1), i_{утфн}(N_{T_{ic}} - 2), i_{утфн}(N_{T_{ic}}), \quad (12)$$

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

Блок интеллектуальной диагностики изоляторов передает полученную последовательность в ЦУ ЭО с установленным периодом передачи данных.

В ЦУ ЭО формируют общую последовательность значений тока утечки, превышающих величины, установленные коэффициентом фиксации динамики нарастания тока утечки изоляторов, и используют для анализа работы и диагностики изоляторов.

Применяя последовательность (6) получаем модель фиксации разрядов на изоляторах на основе входных данных, представляющих собой последовательность тока утечки на некотором интервале

$$N = \frac{T_{I_{ут}}}{T_{ут}}$$

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:

1. Для фиксации разрядов на изоляторах вводится пороговое значение тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$. Если измеренное значение тока утечки $i_{ут}(k)$, ниже порогового значения тока частичного разряда на изоляторе $i_{утп}$, то принимаем, что частичного разряда на изоляторе не произошло.

2. Условие фиксации разрядов на изоляторах представляется в виде неравенства

$$i_{ут}(k) > i_{утп}, \quad (13)$$

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

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

Параметры частичного разряда на изоляторе фиксируем 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

$$i_{ута}(k) = i_{ут}(k) - i_{утп}, \quad (14)$$

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

$$Ki_{уто}(k) = \frac{i_{ут}(k)}{i_{утп}}, \quad (15)$$

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

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

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 $i_{утп}$

$$i_{ут}(k) > i_{утп} \quad (16)$$

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

$$N_{утп} = N_{утп} + 1 \quad (17)$$

и проверяем

$$i_{ут}(k + 1) > i_{утп}. \quad (18)$$

Затем

$$i_{ут}(k + 2) > i_{утп} \quad (19)$$

и так далее

$$i_{ут}(k + 3) > i_{утп} \quad (20)$$

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

$$i_{ут}(k + N_{утп}) < i_{утп}, \quad (21)$$

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

6. Фиксируется длительность частичного разряда на изоляторе уравнением

$$T_{утп} = N_{утп} * T_{ут} \quad (22)$$

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

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

$$P_{ут} = \sum_{k=1}^{N_{утп}} U_{и} * i_{ут}(k), \quad (23)$$

где $P_{ут}$ – параметр выделяемой мощности каждого частичного разряда, Вт; $U_{и}$ – напряжение, прикладываемое к изолятору (гирлянде изоляторов), В.

В реальном времени передаются в ЦУ ЭО с установленным периодом передачи данных $T_{I_{ут}}$.

Принятые в ЦУ ЭО 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

$$KDi_{уто\ max}(m), KDi_{уто\ max}(m+1), KDi_{уто\ max}(m+2), KDi_{уто\ max}(m+3), \\ KDi_{уто\ max}(m+M), \quad (24)$$

где $KDi_{уто\ max}(m)$ – максимальное значение на интервале наблюдений электросетевой компании для m – принятого отсчета от интеллектуального блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ; M – количество отсчетов (посылок), принятых от интеллектуального блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ на интервале наблюдений электросетевой компании.

Переданные от интеллектуального блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ и принятые в ЦУ ЭО значения длительности частичного разряда на изоляторе $T_{утп}$ суммируются на том же интервале наблюдения T_n .

$$TD_{\text{утп}} = \sum_{m=1}^M T_{\text{утп}}, \quad (25)$$

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

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

$$TD_{\text{утп отн}} = \frac{1}{T_{\text{н}}} \sum_{m=1}^M T_{\text{утп}}. \quad (26)$$

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

$$PD_{\text{ут}} = \frac{1}{T_{\text{н}}} \sum_{m=1}^M P_{\text{ут}}(m), \quad (27)$$

где $PD_{\text{утп}}$ – суммарная мощность частичных разрядов на изоляторе на интервале наблюдения на сервере электросетевой компании, Вт; $P_{\text{ут}}$ – мощность каждого частичного разряда, Вт.

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

$$\begin{aligned} KDi_{\text{уто max}} &< KDi_{\text{уто max доп}}, \\ TD_{\text{утп отн}} &< TD_{\text{утп отн доп}}, \\ PD_{\text{ут}} &< PD_{\text{ут доп}}, \end{aligned} \quad (28)$$

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, с; $PD_{\text{ут доп}}$ – 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.

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.

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

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

$$p_{\text{из}}(k), p_{\text{из}}(k-1), p_{\text{из}}(k-2), \dots, p_{\text{из}}(2), p_{\text{из}}(1), \quad (29)$$

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 данном случае 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

$$p_{\text{из}}(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_{\text{из}}(k), \quad (30)$$

Под интервалом времени замеров понимается период передачи данных от блока дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер ЦУ ЭО.

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

$$N = \frac{T_{\text{изпп}}}{T_{\text{из}}}, \quad (31)$$

Значения $p_{\text{из}}(N)$ передаются от блока дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер ЦУ ЭО.

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

$$p_{\text{из}}(N), \quad p_{\text{из}}(N - 1), \quad p_{\text{из}}(N - 2), \quad p_{\text{из}}(N - 3), \quad p_{\text{из}}(N - Nn), \quad (32)$$

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

$$pD_{\text{из}} = p_{\text{из}}(N) - p_{\text{из}}(N - 1), \quad (33)$$

Величина нарастания механической нагрузки на изолятор $pD_{\text{из}}$ 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

$$KpD_{\text{из}} = \frac{p_{\text{из}}(N)}{p_{\text{из}}(N-1)}, \quad (34)$$

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 блока дистанционного мониторинга изоляторов по каналу измерения механической нагрузки на сервер ЦУ ЭО в методе 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

$$pD_{из}(l), pD_{из}(l-1), pD_{из}(l-2), pD_{из}(l-ln), \quad (35)$$

Фильтрация проводится в соответствии с соотношением

$$pD_{mg}(l) = \frac{1}{T_{mg}} * pD_{mg}(l-1) + \frac{Kmg}{T_{mg}} * pD_{из}(l), \quad (36)$$

Постоянная времени T_{mg} 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

$$\frac{Kmgc}{Tmgc} = \frac{T_{из}}{3 * T_{изпп}}, \quad (37)$$

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

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

$$pD_{mgкг}(l) = pD_{mg}(l)/9,81, \quad (38)$$

Величина веса гололеда на 1 метр провода ВЛ составит

$$pD_{mgкг\text{ метр}}(l) = \frac{pD_{mgкг}(l)}{L_{пр}}, \quad (39)$$

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

$$KpD_{из}(l), KpD_{из}(l-1), KpD_{из}(l-2), KpD_{из}(l-ln), \quad (40)$$

Фильтрация проводится в соответствии с соотношением

$$KpD_{mgc}(l) = \frac{1}{T_{mgc}} * KpD_{mgc}(l-1) + \frac{Kmgc}{T_{mgc}} * KpD_{из}(l) \quad (41)$$

Постоянная времени T_{mgc} и коэффициент передачи $Kmgc$ 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

$$\frac{Kmgc}{Tmgc} = \frac{T_{из}}{3 * T_{изпп}} \quad (42)$$

$$\frac{1}{T_{mgc}} = 1 - \frac{15}{T_{mgc}} K_{mgc},$$

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

$$\begin{aligned} pD_{mgkg}(l) &< pD_{mgkg \text{ доп}} \\ KpD_{mgc}(l) &< KpD_{mgc \text{ доп}} \end{aligned} \quad (43)$$

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 превышению параметров гололедообразования допустимых значений, то сервер электросетевой компании вырабатывает предупреждающие сигналы, по которым оперативная служба принимает соответствующие методы противодействия гололедообразованию.

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 изоляторов ВЛ 6-110 кВ.

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.

Измерение частичных разрядов и тока утечки проводилось с использованием трансформаторного датчика микротоков, использующего передачу данных о величине тока утечки по шине RS485 с применением протокола MODBUS RTU. Результаты измерений обрабатывается микропроцессорным блоком обработки и передачи данных. Также, данные измеренного значения тока утечки можно контролировать при помощи виртуального терминала UART.

Конструктивно измерительный блок дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ представляет собой защитный корпус с платой микроконтроллера, соединенный с чувствительным элементом – датчиком микротока. Защитный корпус промышленного образца измерительного блока дистанционного мониторинга изоляторов ВЛ обеспечивает возможность установки блока 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 осуществляется посредством сигнального провода по интерфейсу RS485.

Графики работы блока дистанционного мониторинга ВЛ и показаны на рисунках 2-3.



Рисунок 2 – Блок дистанционного мониторинга на ВЛ 110 кВ «Звезда – Бегичево» (амплитуда вибрации)

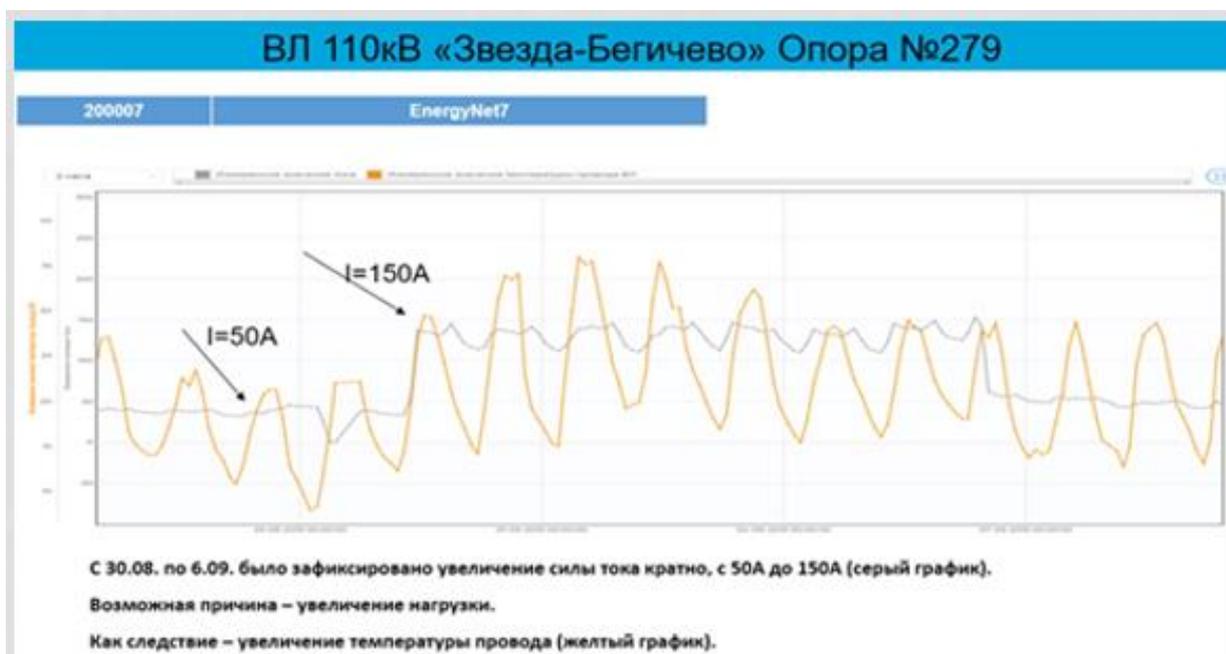


Рисунок 3 – Блок дистанционного мониторинга на ВЛ 110 кВ «Звезда – Бегичево» (фиксация увеличения силы тока)

На рисунке 4 показаны экспериментальная зависимость значений фиксируемого количества частичных разрядов на интервале времени наблюдений и допустимое значение.

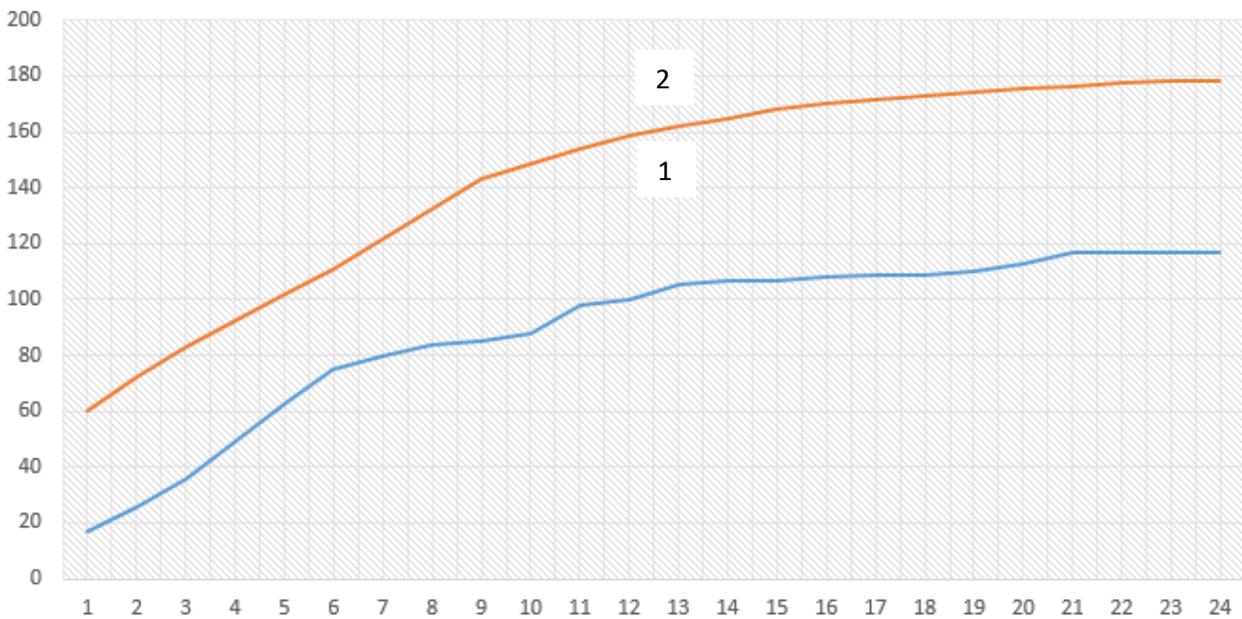


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость фиксируемого количества частичных разрядов (1) на интервале времени наблюдений по месяцам и допустимое значение (2).

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.

Результаты применения на работающих ВЛ подтвердили работоспособность промышленного образца блока дистанционного мониторинга, адекватное описание математической моделью и обеспечение заложенных функций и параметров в требуемых пределах.

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

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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена важная научная 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Непомнящий В.Ю. 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.

2. Непомнящий В.Ю. 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.

3. Непомнящий В.Ю. 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.

4. Непомнящий В.Ю. 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.

5. Непомнящий В.Ю. 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.

6. Непомнящий В.Ю. 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.

7. 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>

Публикации в иных изданиях:

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. Непомнящий В.Ю. Обобщенная структура информационно-измерительной системы диагностики и предиктивного обслуживания высоковольтных линий электропередач// Современные проблемы экологии: доклады XXXI всероссийской науч.-практич. конф.; под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2024. С. 98-101.

Объекты интеллектуальной собственности:

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

Подписано в печать 07.04.2025

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 039к
Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95