

Некоммерческое акционерное общество
«Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

УДК 621.315

На правах рукописи

АБИШЕВА ДИНАРА КАИРЖАНОВНА

**Создание методов контроля токов частичных разрядов подвесных
изоляторов высоковольтных линий электропередач**

8D07103 – Электроэнергетика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
кандидат технических наук
доцент
В. В. Каверин

Зарубежный научный консультант
кандидат технических наук,
доцент
К. С. Горшков

Республика Казахстан
Караганда
2026

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ.....	8
1.1 Анализ факторов снижающих надежность подвесных изоляторов	8
1.2 Негативные факторы влияния токов частичных разрядов на надежность и ресурс подвесных изоляторов ЛЭП.....	15
1.3 Существующие методы учета и контроля потерь ЛЭП.....	21
1.4 Анализ технических средств реализации контроля тока частичных разрядов	28
1.5 Постановка задач исследования.....	34
1.6 Выводы.....	35
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ	36
2.1 Электромагнитные процессы на поверхности подвесных изоляторов в изоляции	36
2.2 Разработка схемы замещения подвесных изоляторов и выбор параметров.....	37
2.3 Моделирование частичных разрядов и анализ переходных процессов.....	39
2.4 Выводы	43
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ	44
3.1 Разработка программы экспериментальных исследований	44
3.2 Разработка и изготовление лабораторного стенда	45
3.3 Результаты экспериментальных исследований	47
3.4 Выводы	63
4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ С КОНТРОЛЬНО–ИНДИКАЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ.....	64
4.1 Основные этапы проектирования радиоэлектронного оборудования	64
4.2 Методы проектирования радиоэлектронного оборудования.....	66
4.3 Структурная схема датчика тока утечки подвесных изоляторов	68
4.4 Выводы	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	75
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на полезную модель	86
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения в производство.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ В Комплект эскизной конструкторской документации комбинированного датчика тока утечки подвесного изолятора	89

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ТЧР	– ток частичных разрядов
ЧР	– частичные разряды
ПРТЧР	– плотность распределения токов частичных разрядов
СЗА	– степень загрязненности атмосферы
ЦСОИ	– центр сбора и обработки, сохранения и визуализации информации

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и проблематика научной работы.

На современном этапе развития электроэнергетики при передаче электрической энергии по высоковольтным линиям электропередач (ЛЭП) существенную роль в формировании экономических показателей функционирования энергосистем играют активные потери электроэнергии.

В соответствии с положениями, приведёнными в [1], технические потери электроэнергии классифицируются на условно-постоянные и нагрузочные. Условно-постоянные потери характеризуются независимостью от величины передаваемой мощности и определяются, в основном, конструктивными и эксплуатационными параметрами оборудования. К их числу относятся потери холостого хода силовых трансформаторов, потери, обусловленные коронными разрядами на линиях высокого напряжения, потери на токи утечки, а также потери в оборудовании подстанций, включая компенсирующие устройства и системы учета электрической энергии.

Нагрузочные (переменные) потери оказывают существенное влияние на передаваемую по ЛЭП электроэнергию. К переменным потерям следует отнести токи утечки подвесных изоляторов. На величину токов утечки подвесных изоляторов существенное влияние оказывает процесс увлажнения загрязненной части изолятора, который приводит к образованию проводящей среды (электролита). Такие потери в основном имеют место во время влажной и сырой погоды.

Существенное влияние на величину активных потерь, при транспортировке электроэнергии средствами воздушных линий электропередач, оказывают климатические условия, природные и геологические особенности местоположения воздушных ЛЭП, влияние аномальных режимов работы линий. Наиболее сильное влияние на активные потери оказывают: величина влажности и температура воздуха, солнечная радиация, скорость и направление ветра относительно направления ЛЭП.

Увлажнение поверхности изолятора вызывает рост токов утечки. Ток утечки имеет две составляющие: фоновый ток и ток частичных разрядов. Фоновый ток имеет частоту, напряжения токоведущих проводов. Энергия фонового тока в основном расходуется на нагрев подвесных изоляторов [2].

Частичные разряды (ЧР), имеющие электродуговой характер на поверхности изолятора, снижают его изолирующие свойства. Дополнительно частичные разряды ионизируют воздух в непосредственной близости от поверхности изолятора. Повышение концентрации ионов воздуха приводит к увеличению активных потерь электроэнергии. Вследствие ионизации воздуха может возникнуть электродуговое перекрытие изолятора или всей гирлянды изоляторов. В свою очередь перекрытие изоляторов приводит к отключению участка линии электропередач. К числу последствий негативного влияния частичных разрядов можно отнести тепловой нагрев и механическое разрушение стеклянных изоляторов, образование микротрещин в стекле из-за

резких перепадов температуры, в которых обычно накапливается пыль и грязь.

Таким образом, контроль токов частичных разрядов является актуальной задачей энергосбережения и снижения числа аварийных ситуаций.

Согласно [3] одним из основных показателей качества передачи электроэнергии является контроль ЧР.

Важной составляющей технико-экономических показателей высоковольтных ЛЭП является минимизация активных потерь при передаче электроэнергии, поэтому исследование токов частичных разрядов, и разработка методов их контроля является актуальным и требует оптимального решения для реализации своевременной и бесперебойной транспортировки электроэнергии и энергосбережения.

На сегодняшний день введение новых методов контроля состояния изоляторов с мониторингом токов ЧР имеет важное практическое значение и представляет собой одну из актуальных проблем при транспортировке электроэнергии.

Цель работы – разработка методов контроля и технических средств, обеспечивающих текущую оценку интенсивности разрушения изолятора для предупреждения его электродугового перекрытия.

Объект исследования – подвесной изолятор ПС-120Б высоковольтных воздушных линий электропередачи 110 кВ – 500 кВ переменного тока.

Идея работы – заключается в определении интегрального показателя характеристик частичных разрядов в режиме реального времени на основе комплекса научно-технических решений.

Задачи работы, решаемые для достижения поставленной цели:

- анализ и обоснование актуальности исследования токов частичных разрядов;
- теоретические исследования токов частичных разрядов;
- экспериментальные исследования токов частичных разрядов;
- теоретические исследования распределения ЧР в функции напряжения токоведущих проводов;
- спектральных характеристик импульсной последовательности частичных разрядов.

Научная новизна заключается в:

- разработке схемы замещения электромагнитных процессов протекающих на поверхности подвесного изолятора;
- разработке математической и имитационной моделей электродинамических процессов ТЧР;
- определении ошибки плотности распределения ТЧР в соответствии с количеством выборок для положительной и отрицательной полуволн напряжения на изоляторе.
- определении спектральных характеристик тока частичных разрядов для различных значений частот следования ТЧР.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- теоретическая и экспериментальная обработка импульсов ТЧР относительно диаграммы периода напряжения на изоляторе (осциллограммы

напряжения и тока, графические формы распределения импульсов ТЧР);

- математическое и имитационное моделирование процесса возникновения ТЧР (схема замещения подвесного изолятора, имитационная модель в MATLAB);

- проведение спектрального анализа ТЧР для определения рекомендуемого рабочего диапазона частот.

Методы исследования. Определились характером каждой из поставленных задач и опирались на положения теории развития разряда в воздухе вдоль увлажненной и загрязненной поверхности, теорию электрических цепей и электротехники, вероятности и планирования эксперимента. В процессе исследования были использованы методы постановки и планирования эксперимента, цифровой и статистической обработки данных. Для построения графических зависимостей и диаграмм были использованы пакеты прикладных программ MathCAD, MS Excel, Paint Brush, сертифицированное программное обеспечение FLUKE. Имитационные моделирования и результаты были выполнены и получены в пакете прикладных программ MATLAB.

Экспериментальные данные получены в лаборатории кафедры «Автоматизация производственных процессов» НАО «Карагандинского технического университета им. А. Сагинова» в г. Караганда путем регистрации тока утечки при подаче на изолятор среднеквадратичного значения напряжения 15 кВ.

Эта работа была частично поддержана грантовым фондом научных и (или) научно-технических проектов на уровне Министерства образования и науки Республики Казахстана № IRN AR08856344 по теме «Разработка комплекса дистанционного контроля состояния элементов конструкций высоковольтных воздушных линий электропередач во время работы линии на основе интеллектуальных помехозащищенных системы телеметрии».

Практическая значимость полученных результатов:

- полученные спектральные характеристики ТЧР могут использоваться для определения технических характеристик первичного преобразователя;

- разработана методика проведения экспериментальных исследований токов частичных разрядов;

- разработано техническое решение по контролю и мониторингу токов частичных разрядов.

Обоснование и достоверность результатов и выводов.

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечена соответствием характеристик используемого испытательного оборудования требованиям нормативных документов по проведению высоковольтных испытаний, апробированных методов теории электрических цепей, теоретических основ электротехники и имитационного моделирования.

Полученные в экспериментах характеристики тока утечки качественно и количественно согласуются с результатами российских и зарубежных авторов, опубликованных ранее. В представленной работе адекватность научных результатов была обоснована путём сопоставления переходных процессов одиночных импульсов, полученных теоретически и экспериментально.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- научно–техническом совете КарТУ;
- научных семинарах кафедры АПП КарТУ;
- международной научной конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 13, РК, г. Караганда, 2021 г.);
- международной научно–практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 15, РК, г. Караганда, 2023 г.);

Основные научные результаты докторской диссертации опубликованы в 8 научных трудах, в том числе, 4 публикации в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, 1 публикация, входящая в информационную базу компаний Scopus, 3 публикации в международных научно–практических конференциях, 1 инновационный патент РК (Пат. РК 9204; № 2024/0378.2; заявл. 12.03.2024; опубл. 14.03.2025, Бюл. №11).

Объем и структура диссертации: диссертация состоит из списка сокращений, введения, основной части из 4 разделов, заключения. Объем диссертации составляет 93 страниц машинописного текста, содержит 22 рисунка, 10 таблиц, список использованных источников, включающий 142 наименования, 3 приложения.

Благодарности. Автор чтит светлую память своего первого научного руководителя, д.т.н., профессора И.В. Брейдо, под руководством которого в 2020–2021 гг. были определены общее направление исследования, исходная проблематика и получены первые научные результаты.

Автор выражает благодарность первому зарубежному научному консультанту, к.т.н., доценту К.С. Горшкову, за научные консультации и ценные рекомендации на начальном этапе выполнения диссертационной работы.

Автор выражает глубокую признательность научному консультанту, к.т.н., доценту В.В. Каверину, за значительный вклад в развитие исследования, последовательное научное сопровождение работы, ценные рекомендации и поддержку на всех этапах выполнения диссертации.

Автор выражает искреннюю благодарность коллективу Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, кафедре Автоматизации производственных процессов за содействие, поддержку и создание благоприятных условий для выполнения диссертационного исследования.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВОЗДУШНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

1.1 Анализ факторов снижающих надежность подвесных изоляторов

На сегодняшний день наиболее распространенной проблемой при передаче электроэнергии от источника к потребителю средствами воздушных ЛЭП являются активные потери электроэнергии и низкая энергоэффективность работы изоляторов.

Согласно [2], технические потери электроэнергии подразделяются на условно-постоянные и нагрузочные потери. На условно-постоянные потери не влияет передаваемая мощность. К таким потерям относят: потери при холостом ходе трансформаторов, потери коронного разряда ВЛЭП, потери на токи утечки, потери в различных устройствах подстанций, компенсирующих устройствах, системе учета электроэнергии и другие (рисунок 1).

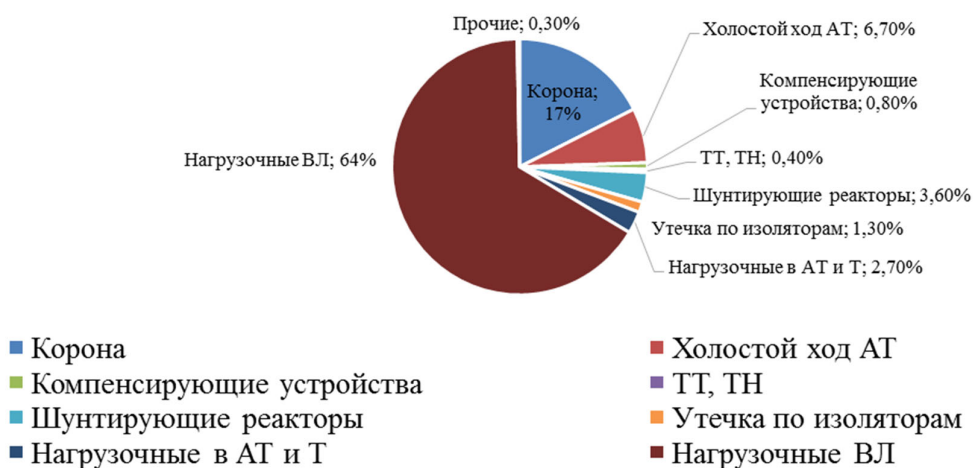


Рисунок 1 – Классификация потерь при передаче электроэнергии по ЛЭП

Величина нагрузочных (переменных) потерь определяются среднеквадратичным током в токоведущих проводах ЛЭП. Энергия нагрузочных потерь в основном расходуется на нагрев токоведущих проводов.

Одним из факторов оценки эффективности работы системы передачи электроэнергии, средствами воздушных ЛЭП является техническое состояние подвесных изоляторов. Удельный вес потерь электроэнергии на изоляторах определяется 15–20 % от общего количества неисправностей технических средств ЛЭП, а это почти треть повреждений линии [4]

В настоящее время снижение потерь на подвесных изоляторах реализуется своевременным контролем технического состояния изоляторов. Текущий контроль технического состояния подвесных изоляторов ЛЭП является одним из основных методов повышения надёжности систем электроснабжения и

электрооборудования нагрузки. Также следует отметить что сокращение активных потерь электроэнергии в ЛЭП приводит к снижению финансовых затрат её эксплуатирующей организации [5–8].

В нормальном эксплуатационном режиме по изоляторам протекает «фоновый» ток утечки [9]. Ток утечки имеет две составляющие: фоновый ток, промышленной частоты 50 Гц и ток частичных разрядов. По оценкам специалистов ОАО «НИИПТ», длительный фоновый ток в условиях увлажнения изоляторов колеблется в диапазоне 0,5–1 мА.

Годовые потери электроэнергии для воздушных линий, расположенных в разных регионах России, приведены в таблице 1 (регион 1 – северо-восток; 2 – север европейской части; 3 – северо-запад; 4 – центральная часть России; 5 – Северный Кавказ; 6 – Южный Урал; 7 – Дальний Восток [10].

Таблица 1– Удельные годовые потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам воздушных линий

№ ре- н а	Удельные потери электроэнергии от токов утечки по изоляторам воздушных линий, тыс. кВт·ч/км в год, при напряжении, кВ											
	6	10	15	20	35	60	110	154	220	330	500	750
1	0,21	0,33	0,48	0,64	0,69	0,86	1,08	1,24	1,35	2,01	3,05	4,58
2	0,22	0,35	0,52	0,68	0,73	0,92	1,15	1,32	1,44	2,15	3,25	4,87
3	0,28	0,45	0,67	0,88	0,95	1,19	1,49	1,71	1,86	2,78	4,20	6,31
4	0,31	0,51	0,75	1,00	1,07	1,34	1,68	1,93	2,10	3,14	4,75	7,13
5	0,27	0,44	0,65	0,87	0,92	1,17	1,46	1,68	1,82	2,72	4,11	6,18
6	0,22	0,35	0,52	0,68	0,73	0,92	1,15	1,32	1,44	2,15	3,25	4,87
7	0,16	0,26	0,39	0,51	0,55	0,69	0,86	0,99	1,08	1,61	2,43	3,66

В соответствии с ПУЭ, минимальная длина пути тока утечки по изоляторам нормируется в зависимости от степени загрязненности атмосферы (СЗА). Установлено семь уровней СЗА.

В таблице 2 приведены результаты измерения потерь мощности на гирлянде изоляторов линии 110 кВ для различных видов погоды и степени загрязненности изоляторов в режиме фонового тока [11].

В процессе работы системы электроснабжения поверхность изоляторов подвержена загрязнению, но частично смывается во время дождливой погоды. Моросящий дождь или роса приводят к уменьшению сопротивления слоя загрязнения, что влечет за собой уменьшение разрядного напряжения по поверхности изолятора.

Процессы выхода из строя изолятора под дождем и при загрязненной увлажненной среде имеют сходный характер. Ток утечки возникает под действием приложенного к изолятору напряжения и вызывает его нагрев. Это происходит неравномерно, поскольку отдельные участки изолятора имеют разную плотность тока утечки в силу неравномерной загрязнённости поверхности изолятора и особенностей его конфигурации [3, с. 33].

Таблица 2 – Потери мощности в гирлянде изоляторов линии 110 кВ

Вид погоды	Потери мощности в гирлянде, Вт					
	Чистые изоляторы		Слабо загрязненные изоляторы		Сильно загрязненные изоляторы	
	Диапазон	Среднее значение	Диапазон	Среднее значение	Диапазон	Среднее значение
Сухая	3–6	4,5	4–7	5,5	4–7	5,5
Слабый дождь	30–50	40	30–70	50	50–100	75
Сильный дождь	20–70	45	40–100	70	50–140	95
Морось	50–90	70	50–140	95	70–200	135
Туман	40–100	70	50–170	110	70–300	185

Согласно [12–15] для участков, где преобладает наибольшая плотность тока, характерным является интенсивное испарение влаги с поверхности изолятора и появление сухих зон участков с увеличенным сопротивлением. В связи с образованием сухих локальных зон с повышенным сопротивлением, напряжение по поверхности изолятора распределяется таким образом, что к области подсушенных участков с высоким активным сопротивлением прикладывается большее напряжение относительно увлажнённых участков, которое оказывает негативное влияние на изоляционные свойства подвесного изолятора в целом. Это приводит к возникновению электродуговых каналов между ближайшими увлажнёнными участками на поверхности изолятора. Электродуговые каналы между ближайшими увлажнёнными участками называют частичными разрядами. Ток утечки возрастает по причине того, что подсушенный участок поверхности изолятора имеет большее сопротивление, чем электродуговой канал. Увеличение количества частичных разрядов приводит к полному перекрытию изолятора или гирлянды подвесных изоляторов. Перекрытие можно отнести к случайному процессу, так как характеристики частичных дуг и их количества имеют случайный характер.

По влиянию на токи утечки климатические условия в непосредственной близости от ЛЭП, могут быть объединены в 3 группы: 1 группа – хорошая погода с влажностью менее 90 %, сухой снег, изморозь, гололед; 2 группа – дождь, мокрый снег, роса и хорошая погода с влажностью 90 % и более; 3 группа – туман. Преобразованные в соответствии с этим данные представлены в таблице 3 [11].

Подсушивание поверхности изолятора имеет медленный темп, поэтому кратковременные перенапряжения могут и не быть, а напряжение перекрытия может быть выше чем при длительном воздействии напряжения. Следовательно, на влагоразрядное напряжение поверхности изолятора оказывают воздействие

параметры слоя загрязнения, его количество и состав, а также вид увлажнения и его интенсивность.

Таблица 3 – Потери мощности в гирлянде изоляторов линии 110кВ, в соответствии с климатическими условиями

Номер группы погоды	Среднее потери мощности в гирлянде, Вт, для сильно загрязненных изоляторов		
	1	2	3
1	4,5	5,5	5,5
2	42	60	85
3	70	102	160

Процесс увлажнения загрязненной части изолятора приводит к образованию проводящей среды (электролита). Такие потери в основном имеют место во время влажной и сырой погоды.

Из вышеприведённого анализа следует, что наибольшее воздействие на отказы изоляторов в воздушных линиях оказывают: метеорологические условия, такие как атмосферные перенапряжения, снегопад, ветер, дождь, гололед; перебои в режимах работы; старение элементов; внешние воздействия, ошибки эксплуатации; недостатки проектирования и монтажа; и другие [16–18].

С целью исследования влияния внешних факторов авторы в статьях [19–20] приводят альтернативный и инновационный метод прогнозирования степени загрязнения высоковольтного изолятора.

В [19] применялся метод с использованием компонента высших гармоник. Ток утечки измерялся с использованием трансформатора тока и шунтирующего резистора. Затем были проведены лабораторные испытания стеклянных и фарфоровых изоляторов в условиях соляного тумана с искусственным загрязнением, которое далее представлено тремя уровнями, а именно легким, средним и высоким.

В работе [20] предлагается усовершенствованный метод оценки состояния наружных изоляторов, основанный на их поверхностном токе утечки, с использованием детрендированного анализа флуктуаций (DFA). Анализ поверхностного тока утечки изолятора, находящегося в эксплуатации, может быть полезен для оценки состояния его поверхности. В предлагаемом методе за основу взят сигнал поверхностного тока утечки, характеризующий уровень загрязнения поверхности изолятора. В процессе экспериментального исследования анализировался поверхностный ток утечки дискового изолятора напряжением 11 кВ (с различной степенью загрязнения) в процессе экспериментальных исследований варьировалась величина прикладываемого напряжения. Предложенный метод позволял определить величину загрязнения путём контроля величины прикладываемого напряжения к изолятору соответствующего заданному току утечки.

Исследователи в [21] отмечают, что безопасность и надежность энерготранспортной системы являются очень важной задачей для стабильного функционирования государства. Регулярное техническое обслуживание

оборудования энергосистемы является одной из важнейших задач, обеспечивая надёжное электроснабжение промышленных предприятий и жилищного массива. Изоляторы линий электропередачи, расположенные в прибрежных районах, часто повреждаются в результате стихийных бедствий (штормовые ветра и циклоны), а также образование солевых отложений на поверхности изолятора. Негативное воздействие соляного тумана на изоляторы ЛЭП приводит к снижению их изоляционных свойств, и как следствие приводит к серьёзным авариям (внезапное возгорание и замыкание токоведущих проводов на землю). Аварийные ситуации приводят к перебоям электроснабжения и снижают надёжность всей энергосистемы. Загрязнённые изоляторы являются одной из наиболее частых и основных причин сбоев в энергосистеме в Восточной Европе [22].

В Атырау РК в 2021г. произошло отключение высоковольтной линии электропередачи напряжением 220 киловольт «Индер — Атырау», «Атырау — Кульсары» с разделением Атырауской и Мангистауской областей на изолированное электроснабжение. Причиной аварии стало снижение изоляционных свойств изоляторов [23].

Текущий контроль изоляционных свойств подвесных изоляторов является важной составляющей, отвечающей за надёжность и стабильность работы энергосистемы как регионального, так и республиканского значения.

Проведение регулярного технического обслуживания различных типов изоляторов с целью определения изношенных, повреждённых или загрязнённых изоляторов для промывки или замены стало основной задачей обслуживающего персонала эксплуатирующих организаций, с учётом климатических особенностей контролируемого участка ЛЭП.

С целью определения степени загрязнения или изношенности изоляторов, обслуживающему персоналу необходимо периодически проверять их состояние на выявление дефектов. В настоящее время эта технологическая операция проводится специалистами визуально с помощью бинокля. Однако основными недостатками этого метода являются низкая эффективность и высокие эксплуатационные расходы, поэтому выбор подходящих изоляторов для промывки или замены становится особенно важным. Состояние изолятора можно определить путем измерения поверхностного тока утечки, что является наиболее эффективным методом.

В статье предлагается система онлайн-мониторинга для обнаружения изношенного изолятора путем прогнозирования тока утечки, которая помогает обслуживающему персоналу определять, нуждаются ли изоляторы в очистке или замене, и повышает эффективность технического обслуживания [24–25].

Рассмотрены вопросы диагностики объёмных токов утечки подвесных изоляторов. В предлагаемой методике реализуется анализ высокочастотной составляющей токов утечки, вызванных дефектами в изоляторе. К недостаткам устройства контроля следует отнести отсутствие контроля токов частичных разрядов. В результате анализа аварийных ситуаций обоснована необходимость текущего контроля параметров климата в непосредственной близости от контролируемого участка ЛЭП.

Для определения взаимосвязи климатических условий с утечкой необходимо реализовать текущий контроль метеорологических данных в непосредственной близости от контролируемого участка ЛЭП, такие как температура, влажность и точка росы, а также изображения явления искрового разряда на поверхности изолятора с целью контроля степени разрушения изолятора. Модель прогнозирования улучшена за счет использования особенностей изображения явления поверхностного искрового разряда. Процент площади искры и изменение яркости интересующей области могут быть использованы в качестве внешних входных данных для прогнозирующей модели [26–27].

В статье [28] предлагается инновационный подход к оценке риска равномерного/неоднородного загрязнения и намокания высоковольтных стеклянных изоляторов. Оценка основана на новом показателе, который рассчитывается на основе 3-й, 5-й и 7-й гармоник тока утечки для двух гирлянд стеклянных изоляторов на напряжение 33 кВ, состоящих из трех блоков с различными профилями. Испытания на критическое напряжение выполнялись на загрязненных изоляторах при различных соотношениях нижней и верхней поверхности и скоростях смачивания.

Авторы в работе [29] отмечают, что полимерные изоляторы в высоковольтных линиях электропередач применяются в регионах с высоким уровнем загрязнения. Ток утечки на поверхности загрязненных изоляторов является существенной причиной снижения изоляционных свойств подвесных изоляторов в высоковольтных линиях электропередачи. Таким образом, техническое обслуживание линий требует периодической очистки изоляторов, что является дорогостоящей и продолжительной во времени операцией. Величина тока утечки на загрязненных изоляторах зависит от степени загрязнения и концентрации соли в водной и грязевой среде на поверхности изолятора. Величина тока утечки и температура изолятора на его поверхности считается критическим параметром для оценки эксплуатационных характеристик подвесных изоляторов. Экспериментальные исследования показывают, что конденсация влаги на поверхности изолятора увеличивает поверхностную электропроводность и приводит к их разрушению. Влага в виде тумана, небольшого дождя или росы, попадающая на поверхность изолятора, смачивает слой загрязнений, растворяя соли и любые растворимые электролиты, образуя тонкий проводящий слой на поверхности изолятора.

В этой статье первоначально был изучен механизм конденсации влаги на поверхности изоляторов из-за радиационного охлаждения. Образцы почвы как источников загрязнения были взяты из пыле-содержащих грунтов с последующим химическим анализом и измерениями электропроводности. Для моделирования и тестирования тока утечки был выбран образец загрязненной почвы. Основываясь на свойствах материала, используемого в изоляторе из силиконовой резины (230 кВ), и загрязнении, вызванном пылью и туманом. С целью оценки адекватности результатов имитационного моделирования выполнено сравнение теоретически полученных результатов с экспериментальными данными. Следует отметить, что в работе отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования по воздействию токов

частичных разрядов на активную составляющую потерь электроэнергии при её транспортировке.

В научном труде [30] представлено применение новой методологии, направленной на оценку изоляционных свойств изоляторов, основанной на измерениях частичных разрядов. Эта методология основана на использовании цифровых технологий регистрации последовательности импульсов частичных разрядов с последующей их классификацией. Предлагаемая методика применялась к измерениям, выполняемым на различных высоковольтных изделиях, таких как кабели, трансформаторы и электродвигатели. Цель данной статьи – показать, что процесс идентификации является надёжным в отношении измерительной схемы и гибким, так что он может стать передовым инструментом для технического обслуживания с учётом Анализ гармонических составляющих условий эксплуатации, который поможет специалистам по техническому обслуживанию принимать решения о состоянии тестируемой системы изоляции. Следует отметить важность классификации исследуемой серии импульсов частичных разрядов с последующей их классификацией и идентификацией.

В работе [31] представлен всесторонний анализ тока утечки изолятора из силиконовой резины в условиях равномерного и неоднородного по длине загрязнения, основанный на большом количестве испытаний. Экспериментальные испытания проводились при различных уровнях влажности для различных по новизне образцов. Полученные результаты показывают, что амплитуды гармоник увеличиваются с увеличением плотности отложений соли, продолжительности эксплуатации и влажности, а уменьшаются с увеличением степени неравномерности загрязнения.

Согласно данным из источника [10] годовые потери в изоляторах воздушных линий составляют 7 млн кВт*ч.

В результате проведения анализа негативных факторов снижающих надёжность подвесных изоляторов выполнены исследования и обоснована зависимость энергетических характеристик в функции влажности и загрязнённости. Имитационное моделирование и экспериментальные результаты показывают, что значение тока утечки возрастает при увеличении проводимости и толщины слоя загрязнения на изоляторе [29].

Разработана методика регистрации последовательности импульсов частичных разрядов с последующей их классификацией. Средства обработки сигналов распознают наличие помех различных классов. С помощью нечетких алгоритмов осуществляется идентификация основных типов источников частичных разрядов [30].

В результате экспериментальных исследований было выявлено, что пробой изолятора может быть обоснован его типом и оценивается в 38% и 24% для изоляторов разных типов. Предложенный обобщённый индекс 3–й, 5–й и 7–й гармоник, характеризующий вероятность пробоя, способен предсказать уровень риска изолятора и вероятность перекрытия изолятора более точно, чем индекс по 5–й и 3–й гармоники, который широко распространён в литературе [28].

Следовательно, мониторинг токов частичных разрядов в подвесных

изоляторах и их своевременный контроль является наукоёмким и актуальным вопросом.

1.2 Негативные факторы влияния токов частичных разрядов на надежность и ресурс подвесных изоляторов ЛЭП

Впервые с разрушительным влиянием ЧР в высоковольтном оборудовании столкнулись в конце 1950–х годов при эксплуатации трансформаторов.

Частичный разряды оказывают существенное влияние на величину активной составляющей потерь и интенсивность разрушения изоляции подвесных изоляторов ЛЭП, опорных изоляторов распределительных подстанций, а также высоковольтного оборудования трансформаторов и реакторов [32].

Более 80% случаев выхода из строя оборудования высокого и среднего напряжений связаны с появлением частичных разрядов. Измерения ЧР рекомендованы как точный метод диагностики состояния изоляции (рисунок 2).

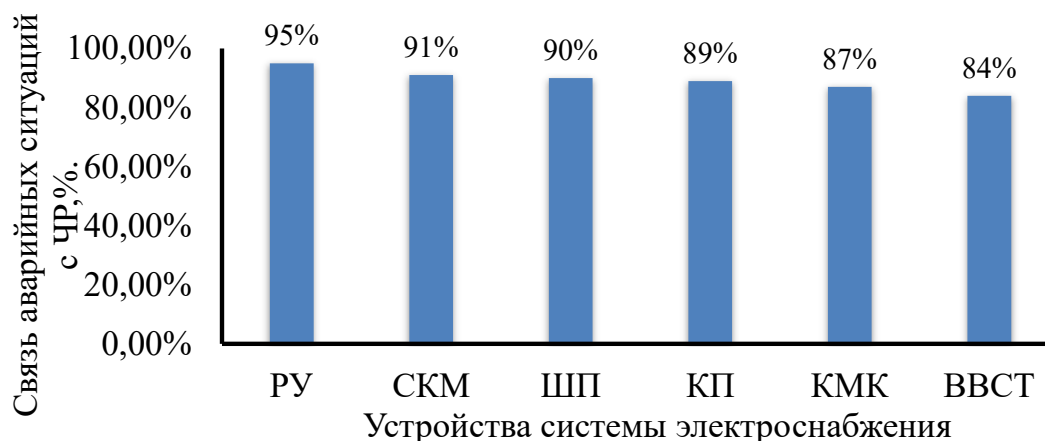


Рисунок 2 – Диаграмма частоты возникновения ЧР на высоковольтном оборудовании

На рисунке 2 РУ – распределительные устройства, СКМ – соединительные кабельные муфты, ШП – шинопроводы, КП – кабельная продукция, КМК – концевые муфты кабеля, ВВСТ – высоковольтные силовые трансформаторы.

Согласно международному стандарту IEC 60270 и ГОСТ 20074–83, частичный разряд определяют как «локальный электрический разряд, шунтирующий часть изоляции в электроизоляционной системе» [32–35].

Частичные разряды появляются в пустотах, трещинах или включениях в твердой изоляции, на границах твердых или жидких диэлектриков, в пузырьках газа внутри жидких диэлектриков или вдоль границы неоднородных образований на поверхности изоляторов различных видов изоляционных материалов высоковольтного оборудования [36–37].

Частичный разряд – это:

- электродуговое перекрытие участка конструкции изолятора;
- показатель диагностики местных дефектов;
- параметр старения диэлектриков;
- быстрый процесс старения;
- одна из опасных причин пробоя.

Часто частичные разряды могут образовываться до пробоя или перекрытия конструкции изолятора. Постоянный мониторинг частичных разрядов позволил бы выявить их на ранних стадиях образования дефекта, предотвратив аварийные ситуации.

В научных работах [3, с.43–45] и [32, 35] описывается механизм возникновения частичных разрядов.

Автор пособия [3, с.43] рассматривает частичные разряды, как пробои газовых включений, которые образуются в местах с пониженной электрической прочностью, где присутствует высокая напряженность электрического поля. На условия их появления влияют характеристики изоляции и конфигурация электрического поля. Частичные разряды служат причиной местного разрушения изоляции и сквозного пробоя, при условии длительного воздействия.

Появление частичных разрядов на поверхности изолятора свидетельствует, что диэлектрик имеет местную неоднородность или дефект на его поверхности. Таким образом, регистрация характеристик частичных разрядов позволяет дать оценку изоляционных свойств конструкции изолятора и обозначить местные дефекты.

Характеристики частичных разрядов дают возможность выявить степень дефектности изоляции. Исследование характеристик частичных разрядов в зависимости от различных условий эксплуатации является актуальным вопросом для изоляторов, кабелей, конденсаторов, трансформаторов и других устройств, где применяется слоистая изоляция [38–39].

По данным статьи [35] частичный разряд – электродуговое образование, локализованное внутри изоляционной среды, которое располагается между двумя рядом расположенными локальными токопроводящими областями.

В качестве физической модели частичного разряда в работах [3, с.43–45] и [32, 35] предложена схема замещения изоляционного промежутка с токопроводящими областями, которая представлена на рисунке 3.

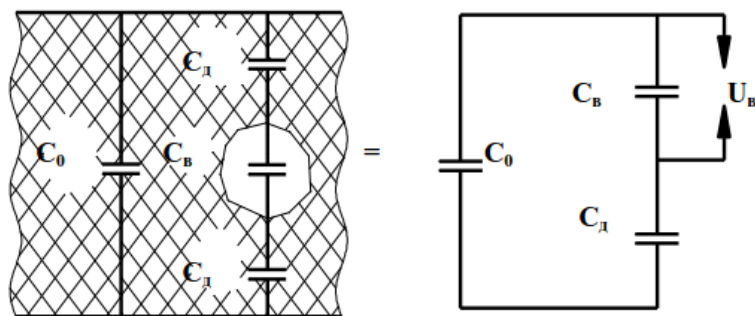


Рисунок 3 – Схема замещения твердого диэлектрика

На схеме замещения рисунка 3 приведены следующие параметры:

C_0 – суммарная емкость бездефектной изоляции;

C_B – емкость участка изолятора с высокими изоляционными характеристиками между локальными рядом расположенными токопроводящими областями;

C_d – емкость с высокими изоляционными характеристиками диэлектрика, расположенная последовательно с C_B ;

U_B – напряжение пробоя воздушного включения

Величина общей емкости C_{Σ} определяется по формуле (1):

$$C_{\Sigma} = C_0 + \frac{C_B \cdot C_d}{C_B + C_d} \quad (1)$$

Частичные разряды возникают тогда, когда амплитудное значение напряжения между локальными рядом расположенными токопроводящими областями достигает пробивного значения $U_{пр}$. Напряженность электрического поля в локальных рядом расположенных токопроводящих областях. E_B связана с напряженностью в остальной части диэлектрика следующим образом по формуле (2):

$$E_B = E_d \cdot \frac{\epsilon_d}{\epsilon_B} \quad (2)$$

где E_d – напряженность электрического поля в диэлектрике;

ϵ_d – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

ϵ_B – относительная диэлектрическая проницаемость локальных, рядом расположенных, токопроводящих областей.

На основании формулы (2) напряженность электрического поля в газовом включении (и в любом другом, где $\epsilon_B < \epsilon_d$) всегда выше, чем в остальном диэлектрике.

Опасность влияния частичных разрядов максимальна на переменном или импульсном напряжении. Такие факторы как тепловое воздействие, воздействие заряженными частицами, воздействие химически активными продуктами (озон, окислы азота). Воздействие электродугового разряда оказывает разрушающее влияние на диэлектрики [3, с.43].

Авторы работ приходят к выводу, что появление частичных разрядов свидетельствует о неоднородности диэлектрического материала. Определение динамических характеристик частичных разрядов упрощает задачу их контроля.

С помощью современных цифровых систем измерения частичных разрядов можно выделить набор характеристик из формы импульса и затем использовать их для классификации (или разделения) и идентификации ЧР. Основная проблема заключается в выборе подходящих характеристик по форме импульсов частичных разрядов. В работах [40–42] пик тока I , заряд Q и энергия E были предложены и протестированы в качестве подходящих параметров кластеризации при условии, что эти параметры коррелируют с физикой разряда

и что они более устойчивы к изменениям параметров сбора данных с цифровой карты записи, используемой для измерений [43]. Такие методы, как кластер спектральной мощности [44], кластер эквивалентного времени и полосы пропускания [45], частотно-энергетические характеристики импульсов с помощью вейвлетов [46], анализ главных компонент и метод t-SNE, а также морфологический градиент кумулятивной энергии [47] широко исследовались для выделения признаков и классификации источников частичных сигналов. Попарное построение этих объектов, при правильном подборе, приводит к получению наборов данных, которые могут быть сгруппированы и, в свою очередь, каждый кластер указывает на источник частичных разрядов. В литературе методы кластеризации обычно подразделяются на пять классов [48–50]: алгоритмы, основанные на распределении, алгоритмы, основанные на иерархии, алгоритмы, основанные на плотности, и алгоритмы, основанные на сетке, причем конкретный выбор того или иного семейства в значительной степени зависит от формы, плотности, аномалий и априорных знаний о наборах данных [51].

Одна из наиболее распространенных форм анализа ЧР основана на частичном разряде с фазовым разрешением (Phase Resolved Partial Discharge) относительно гармонической составляющей переменного напряжения токоведущего провода. Были проведены некоторые исследования структуры различных дефектов для их идентификации [52–54]. Различные стадии электрического старения также могут быть интерпретированы с помощью Phase Resolved Partial Discharge [55]. Активность ЧР в системах изоляции при постоянном напряжении также была исследована для характеристики различных дефектов в системах высоковольтных линий электропередачи постоянного тока [56–61]. Компоненты питания обычно работают под напряжением переменного или постоянного тока. Однако переходные процессы в различные источники, такие как грозовые разряды и срабатывание автоматических выключателей, являются неизбежными явлениями, которые возникают в системах электроснабжения и могут привести к перегрузке их компонентов. Следовательно, перед включением в сеть силовых компонентов проводятся импульсные испытания с целью оценки их способности выдерживать импульсные нагрузки. В процессе работы в конструкции изоляторов обычно могут возникать переходные процессы по напряжению, реакция возмущающих факторов накладываются на рабочие напряжения переменного или постоянного тока. Хотя компоненты питания защищены от переходных процессов, величина которых ограничивается с помощью ограничителей перенапряжений. Коммутационные процессы и грозовые разряды все равно могут вызывать перенапряжения. Влияние высоковольтных импульсов на изоляционные материалы изучалось с разных точек зрения. Связь между уровнем повреждения кабелей из сшитого полиэтилена и их прочностью на импульсную пробой исследована в [62], где представлены результаты, показывающие корреляцию между диэлектрическими потерями и напряжением пробоя. В работе [63] исследовано поведение частичного разряда заполненных воздухом полостей различных размеров в полиэтилене при многократном импульсах и изучается возникновение и затухание ЧР во время импульса.

Свойства частичных и коронных разрядов в воздухе при воздействии грозовых разрядов и коммутации энергопотребителей с большой индуктивностью были описаны в работе [64]. Это показывает, что во время нарастания импульсного напряжения всегда есть вероятность возникновения ЧР, а время задержки может повлиять на их количество во время импульса. Однако поведение ЧР во время импульса имеет стохастическую характеристику. Поведение ЧР полости в полиэтилене из-за импульса, наложенного на напряжение переменного тока, исследовано в [65]. Представленные результаты по приложенным стандартным импульсам разряда, наложенным на разные позиции в цикле переменного тока, показали, что ЧР переменного тока инициируется импульсом и гаснет после нескольких циклов в зависимости от напряжения переменного тока и ситуации старения полиэтилена. В последние годы было проведено много исследований по разработке новых диэлектрических нанокompозитов [66–70] с улучшенными электрическими свойствами, которые могут уменьшить деградацию изоляции и повышать отказоустойчивость. Устойчивость нанокompозитов к ЧР и их влияние на снижение эрозии и старение, вызванных ЧР, были изучены в работах [71–74]. В соответствии с предыдущими достижениями в области нанокompозитов, отдел волокон и полимеров Технологии компании КТН работают над усовершенствованием изоляционных материалов на основе целлюлозы силовых трансформаторов. В рамках их проекта была проведена оценка поверхностных свойств ЧР этих модифицированных материалов под воздействием наложенных импульсов. [75].

Частичные разряды согласно [32–35] имеют основные и дополнительные характеристики, которые позволяют определить степень развития дефекта.

К основным относят: кажущийся заряд q импульса ЧР ($q_{\text{чр}}$), частоту следования импульсов n , средний ток частичных разрядов

К дополнительным характеристикам, оценивающим интенсивность ЧР, относят: квадратичный параметр, мощность ЧР, суммарный заряд за интервал времени.

В последнее время ряд исследователей при анализе ЧР активно использует такие характеристики как фазовый угол или интенсивность ЧР. Следует отметить, что данные характеристики отсутствуют в ГОСТ 20074–83. Наиболее полный перечень характеристик частичных разрядов представлен в работе В.П. Вдовико [32, с. 49–51]

Согласно [3, с.43] в зависимости от величины заряда $q_{\text{чр}}$, измеряемого при частичном разряде, возможна следующая классификация:

1. Если по причине превышения порога напряжения в изоляции, интенсивность имеет значение $q_{\text{чр}} = 10^{-12} \dots 10^{-11}$ Кл, то заряды могут быть допустимы и не сопровождаются быстрым старением изоляции. Их называют начальными.

2. При возрастании интенсивности $q_{\text{чр}}$ до $10^{-10} \dots 10^{-8}$ Кл в процессе возрастания напряжения во время эксплуатации и увеличения размеров включений, образуются критические разряды. Они могут резко сокращать срок службы изоляции и не допускаются.

Благодаря разработанной классификации появилась возможность установить

величину порога энергетических характеристик частичных разрядов.

На постоянном напряжении интервал между частичными разрядами во включении составляет секунды–десятки секунд, что на несколько порядков больше, чем на переменном напряжении промышленной частоты. Это позволяет увеличить рабочие напряженности электроизоляционных конструкций постоянного напряжения по сравнению с переменным [3, с.43].

Частичные разряды (ЧР) считаются одной из главных причин разрушения и пробоя систем изоляции электрического оборудования, наносящих серьезный ущерб и финансовые потери. Следовательно, важное значение имеет проверка состояния подвешенного изолятора на протяжении всего срока службы.

Частичные разряды в газовых включениях являются одной из причин электрического старения и разрушения изоляционных конструкций высоковольтного оборудования. На сегодняшний день общие закономерности протекания частичных разрядов изучены достаточно полно, интерес для исследования представляют механизмы протекания частичных разрядов в различных условиях, в частности, химические процессы в стареющей изоляции. Количественные характеристики частичных разрядов, определенные в ГОСТ 20074–83, позволяют оценить общее состояние изоляционной системы, перспективным является исследование возможностей выявления локальных дефектов, скрытых в изоляции.

Частичные разряды могут возникать в пустых промежутках твердой изоляции, в комплексных системах электродов или проводников, а также вокруг электродов в газе и во многих случаях оказываются воздушными или масляными промежутками в изоляции [76]. Образование активных радикалов, наличие излучения и повышение температуры, вызванное частичным разрядом, негативно сказывается на диэлектрике. Так как частичные разряды обычно имеют место при нарастании синусоидального напряжения в каждом полупериоде, то их деструктивное влияние может увеличиваться и привести к разрушению материала, обуглероживанию и выходу из строя изолятора.

Частичные разряды снижают изолирующие свойства подвесных изоляторов по причине возникновения электродуговых разрядов на поверхности изоляторов, что в итоге приводит к сокращению длины изоляционного промежутка между токоведущими элементами и заземлённой частью конструкции. Дополнительно частичные разряды вызывают ионизацию воздуха в непосредственной близости от поверхности изолятора. Увеличение концентрации ионов в приповерхностной зоне приводит к росту активных потерь электроэнергии, обусловленных протеканием токов утечки и развитием ионизационных процессов. Дальнейшее развитие указанных явлений может привести к возникновению электродугового перекрытия как отдельного изолятора, так и гирлянды изоляторов в целом. Перекрытие изоляции, в свою очередь, вызывает аварийное отключение соответствующего участка линии электропередачи и снижение надёжности электроснабжения. В связи с этим контроль токов частичных разрядов является актуальной научно–технической задачей, направленной на повышение энергоэффективности функционирования электрических сетей и снижение вероятности возникновения аварийных режимов работы.

В процессе исследований была обоснована необходимость разработки схемы замещения электромагнитных процессов частичных разрядов на поверхности изолятора. В ходе работы было выявлено, что неоднородность диэлектрического поля является признаком наличия частичных разрядов. Согласно стандарта [33] одним из основных показателей качества передачи электроэнергии является контроль энергетических характеристик ЧР относительно мгновенного значения напряжения токоведущих элементов конструкции.

С целью упрощения задачи контроля частичных разрядов необходимо определить их динамические характеристики, выполнить классификацию и идентификацию. В работах авторов [46] был выполнен анализ частотно-энергетических характеристик импульсов на принципе вейвлетов. Выполнен анализ ЧР основанный на частичном разряде с фазовой зависимостью относительно гармонической составляющей переменного напряжения токоведущего провода. Частотные характеристики импульсной последовательности частичных разрядов имеют широкий спектр. Частотный диапазон и энергетические характеристики являются одними из главных показателей при разработке датчика тока частичных разрядов. Негативное влияние частичных разрядов на изоляцию может длиться месяцами или годами. Следовательно, мониторинг возникновения частичных разрядов, анализ значения их мощности и режима повторяемости, а также определение места их возникновения, создает возможность вовремя определить дефекты изоляционной конструкции и осуществить мероприятия для сокращения активных потерь электроэнергии. К числу последствий негативного влияния частичных разрядов можно отнести тепловой нагрев и механическое разрушение стеклянных изоляторов, образование микротрещин в стекле из-за резких перепадов температуры, в которых обычно накапливается пыль и грязь. В электроэнергетике в режиме транспортировки электроэнергии по высоковольтным ЛЭП к потребителям важную роль играет надежность работы линий электропередачи и целого комплекса оборудования, работа изоляционных конструкций, оборудования и верный выбор типа изоляторов.

1.3 Существующие методы учета и контроля потерь ЛЭП

Так как разрушающая способность частичных разрядов, приводящая к пробое диэлектрика, определяется множеством факторов, соответственно вид частичных разрядов и отдельные характеристики не являются ключевыми при анализе степени их деструктивного влияния. Оно во многом более зависит от вида, характеристик в целом, локализации места появления, продолжительности воздействия, этапа развития и других внешних факторов.

По данным [77], вопрос исследования частичных разрядов имеет продолжительный период и составляет более 80 лет. На данный момент интерес к этой проблеме возрос, так как важную роль при транспортировке электроэнергии играет состояние изоляции, на которое частичные разряды оказывают свое негативное влияние. Сегодня находят применение и подвержены

испытаниям новые методы и приборы мониторинга, диагностики и контроля.

Высококвалифицированные специалисты полагают, что в сфере анализа результатов наблюдения ЧР до сих пор отсутствует достаточная ясность.

На сегодняшний день разработаны и используются различные методы контроля состояния изоляции, учета потерь и диагностики высоковольтных ЛЭП, рассмотрим один из них, с помощью тепловизора. Данный метод (рисунок 4) дает возможность целостной оценки состояния гирлянды изоляторов.

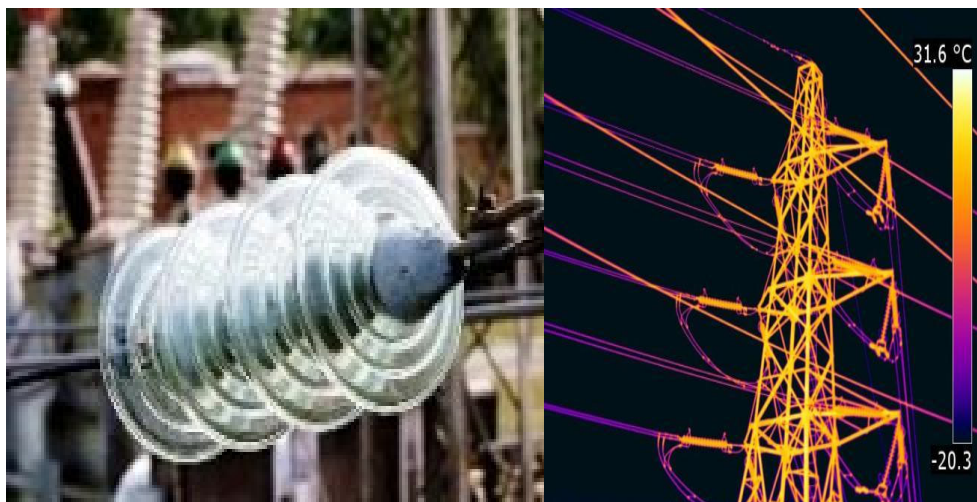


Рисунок 4 – Контроль изоляции с помощью тепловизора

Вследствие дефекта (пробоя) изолятора в «гирлянде» ВЛЭП на других рабочих изоляторах возрастает напряжение и, соответственно, температура приобретает максимальное значение. На вышедшем из строя изоляторе напряжение достигает нуля, соответственно, температура становится равной температуре окружающей среды, и на термограммах такой изолятор можно распознать как темное пятно. Следовательно, по разности температур можно выявить вышедший из эксплуатационного режима изолятор. Если пробитых изоляторов много, то их без проблем можно распознать тепловизором. Непригодный для работы изолятор, напротив, повышает свою температуру, поскольку через него электрический ток большой величины. К главному недостатку опорных изоляторов и шинных мостов относят продольные трещины, возникающие из-за нарушений технологии изготовления, которые приводят к пробоям изолятора, возможности увлажнения армировки изолятора. Это ведет к повышению тока утечки, и армировка нагревается. Неисправный изолятор способен нагреваться на 1–2 градуса по сравнению с окружающей температурой. Повреждение изоляторов обычно происходит в периоды смены сезонов года, так как происходят сильные перепады температуры воздуха окружающей среды [78].

Данный способ имеет свои недостатки: невозможно отловить температурный градус, который дает ток утечки, из-за сильного нагрева изолятора солнечной радиацией, также практически невозможно выловить именно ток утечки, так как

циркуляция наведенных токов достигает на несколько порядков выше, чем ток утечки.

Помимо контроля с помощью тепловизора, согласно [79], широко используются электрический, электромагнитный и акустический методы регистрации импульсов частичных разрядов.

Электрические методы могут выполняться на высоковольтном электрооборудовании, таком как силовые трансформаторы, опорные изоляторы, измерительные трансформаторы, кабели среднего, высокого и сверхвысокого напряжения, высоковольтные вводы и вращающиеся машины [80].

Электрический метод диагностики частичных разрядов характеризуется необходимостью непосредственного электрического контакта измерительной аппаратуры с объектом контроля, что ограничивает удобство его практического применения, особенно в условиях действующих электроустановок.

В то же время данный метод обеспечивает получение наиболее полного набора информативных параметров частичных разрядов, включая их амплитудные, энергетические и временные характеристики. Это позволяет проводить комплексный анализ процессов частичных разрядов и выполнять углублённые диагностические исследования состояния изоляции.

Данный метод чувствительный и требует применения специального оборудования и приборов.

При использовании большинства электрических методов диагностики частичных разрядов отсутствует необходимость подачи на объект напряжения, существенно превышающего его рабочие значения. В связи с этим данные методы относятся к категории щадящих по отношению к изоляции и общему техническому состоянию электрооборудования, что позволяет применять их в условиях эксплуатации без существенного влияния на ресурс изоляционных систем.

В настоящее время на рынке представлен широкий спектр оборудования различных производителей, функционирование которого основано на применении электрических методов регистрации частичных разрядов, что свидетельствует о высокой степени их практической востребованности и эффективности при решении задач диагностики. Например, HVPD, SebaKMT и Teshimp.

Электрические методы делятся на традиционные и нетрадиционные. Традиционные методы ЧР выполняются в соответствии с требованиями стандарта IEC 60270 «Методы тестирования высоким напряжением: методы измерения частичного разряда» [33] с использованием конденсатора связи с центральной частотой измерения до 1 МГц.

Нетрадиционные методы ЧР (или электромагнитные методы [81]) основаны на стандарте IEC 62478 «Методы высоковольтных испытаний – измерение частичного разряда электромагнитными и акустическими методами» [82], в которых используются датчики, работающие на частотах в диапазоне: высокочастотный – (3–30 МГц), очень высокочастотный диапазон (30–300 МГц) и сверхвысокочастотный – (300 МГц–3 ГГц) [83].

В высокочастотном измерении одним из широко используемых датчиков для

измерения ЧР с помощью индуктивной связи электрического тока является высокочастотный трансформатор тока [81].

В электромагнитном (дистанционном) методе частичные разряды обнаруживаются благодаря приемному сверхвысокочастотному антенному устройству, которому не требуется контакт с объектом. Из преимуществ данного метода выделяют применение при любом классе напряжения, а из недостатков – отсутствие возможности определения количественной оценки большинства характеристик частичных разрядов и влияние других приборов на электромагнитное излучение.

С целью выявления частичных разрядов в силовых трансформаторах и элегазовом оборудовании разработан акустический метод диагностики. Данный метод отличается относительной простотой реализации, однако его существенным ограничением является сложность точного определения локализации источника частичных разрядов.

В основе метода лежит регистрация акустических волн, возникающих при протекании частичных разрядов. Для этого применяются высокочувствительные микрофоны, способные фиксировать сигналы в ультразвуковом диапазоне частот, превышающем порог слышимости человека.

Акустический метод относится к числу дистанционных, поскольку позволяет осуществлять установку датчиков и сенсоров на объектах открытого исполнения, таких как шинопроводы и другие элементы электроэнергетического оборудования, без необходимости непосредственного электрического подключения к токоведущим частям.

Среди недостатков данного метода можно назвать низкую реакцию на регистрации малоинтенсивных частичных разрядов.

Помимо вышеперечисленных методов обнаружения ЧР на данный момент ведутся эксперименты различными учеными с целью исследования процесса возникновения ЧР, изучения их характеристик и разработки средства их контроля для количественной и качественной оценки состояния изоляции.

В Universiti Teknologi (Malaysia) проведены исследования возникновения частичных разрядов на поверхности подвесных изоляторов воздушных линий электропередач в зависимости от степени их загрязнения. В работе представлены результаты лабораторных испытаний. Испытания проводились на гирлянде из четырех изоляторов. Установлена зависимость увеличения плотности частичных разрядов в зависимости от увеличения степени загрязнения изоляторов [84].

В работах [85–87] представлены результаты экспериментальных исследований механизма возникновения поверхностных частичных разрядов с учётом физико-химических свойств материала изолятора. Авторами предложена схема лабораторной установки, предназначенной для изучения характеристик частичных разрядов в контролируемых условиях. В ходе экспериментальных исследований осуществлялся контроль частоты следования частичных разрядов, а также их амплитудных характеристик для образцов изоляции с различными типами дефектов. На основании полученных данных разработана методика диагностики дефектов изоляции, основанная на анализе плотности частичных разрядов. Установлены количественные зависимости

между частотой и амплитудой частичных разрядов и типами дефектов изоляции, что позволяет использовать данные параметры в качестве диагностических признаков при оценке технического состояния изоляционных конструкций.

M. Fonseca Badilloa, L. Negrete Navarrete, A. González Paradaa и A. Castañeda Mirandab University of Guanajuato (México) в качестве предмета исследования использовали высоковольтный кабель. В лабораторных испытаниях применялись датчики с емкостной связью, которые устанавливались на концах кабеля. Разработана схема замещения ЧР на поверхности изоляции с учётом особенностей конструкции кабеля. В результате имитационных экспериментов получены спектральные характеристики ЧР. Результаты работы необходимы для определения и понимания процесса снижения изоляционных свойств кабельной изоляции [88].

В [89] представлена методика диагностики и прогнозирования дефектов в подвесных изоляторах. В работе обоснована возможность использования последовательности импульсов частичных разрядов для прогнозирования дефектов в подвесных изоляторах. В предложенном методе не учитываются энергетические характеристики тока частичных разрядов.

В [90] Jonathan Y. представил анализ спектральных характеристик импульсных сигналов с различной скважностью. Даны рекомендации по определению количества гармоник в зависимости от ошибки энергетических характеристик суммы n -го количества первых членов гармоник ряда Фурье относительно исходного импульсного сигнала. Установлена достаточность анализа шести первых гармоник ряда Фурье импульсного сигнала тока частичных разрядов для определения частотных характеристик датчика тока ЧР.

В State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Safety and New Technology (Китай) специалистами Цзягуи Тао, Цзюй Тан, Сяосин Чжан, Мянчжи Ву для распределительного устройства с газовой изоляцией (GIS) 110 kV с использованием теоретических основ метода доверия Dempster–Shafer создана комплексная система идентификации ЧР. Отличительной особенностью данной работы является анализ взаимосвязи между двумя методами фазового и временного разрешения ЧР. Использование этого метода позволит с заданной вероятностью идентифицировать постепенный отказ распределительного устройства [91].

Ye Haifeng, Qian Yong, Si Liangqi, Sheng Gehao, Jiang Xiuchen (Факультет электротехники, Шанхайский университет Цзяо Тонг, Китай) в своей работе сделали классификацию четырёх типов моделей ЧР с характерными повторяющимися признаками. На основе предложенных моделей разработан алгоритм Support Vector Machine (SVM) определения типа дефекта изоляции высоковольтного оборудования [92].

В [93] авторами предлагается метод диагностики аварийных ситуаций в воздушных линиях электропередачи с помощью идентификации частичных разрядов подвесных изоляторов по ультразвуковому шуму. Изоляторы подвержены влиянию негативных факторов окружающей среды. Исследуется возможность использования ensemble models для прогнозирования аварийных ситуаций подвесного изолятора.

В University of Waterloo предлагается использовать для мониторинга изоляторов коммерческий акустический датчик вместе с искусственной нейронной сетью. В лабораторных условиях тестировался предлагаемый метод диагностики. Получена высокая скорость распознавания дефектов [94].

В работах [95–97] проявлен интерес исследования в области устранения неполадок с использованием спектрального анализа гармонических составляющих управляемого сигнала. С этой целью разработана адекватная модель и проведена серия имитационных экспериментов. Исследуются последовательности импульсов ЧР при различных давлениях газа и уровнях напряжения. Моделируются различные типы дефектов. ЧР оценивается с использованием шаблона Node*, который будет характеризовать дефекты в HVDC GIS [98].

В исследованиях работ [99–100], [104] авторы рассмотрели методы и алгоритмы для идентификации ЧР на основе методов машинного и глубокого обучения. Представлены их преимущества и недостатки. Представлены потенциальные решения с использованием методов сбора и хранения данных, механизма радара частичного разряда. Предложены направления дальнейшего развития исследований с использованием вейвлет–пакета преобразований.

Исследователи в работе [101] обосновали связь между активностью ЧР и возникновением отказов и дефектов изоляции высоковольтного оборудования. Авторами предложен микроволновый метод. Датчики сверхвысокой частоты обладают высокой устойчивостью к помехам. Их можно использовать для локализации места возникновения ЧР.

Например, работа [102] представила эксперимент с использованием нейронной сети для анализа информации с датчиков. Метод заключается в сборе данных о количестве ЧР в каждом цикле относительно положительных и отрицательных волн напряжения. Далее собранная информация используется для создания шаблона для распознавания ЧР.

Авторы в [103] исследовали оценку изоляции кабеля исходя из характеристик ЧР. Собрана экспериментальная установка с коаксиальным кабелем под действием сильных электрических полей. Осциллограф принимает данные. Затем применяется метод обработки данных SVM. Разработан классификатор признаков ЧР для распознавания неисправностей.

Методология выделения ЧР из сигналов от нескольких источников была предложена в [105]. Она заключается в анализе линейного прогнозирования с помощью алгоритма forest. Применяются анализ главных компонент и двумерное пространство.

Исследователи в [106] предложили модель сверхточной нейронной сети Mobile Nets. Она состояла из системы распознавания динамических характеристик ЧР. Система классифицирует наборы экспериментально полученных данных. Далее изображение обрабатывается с использованием бинаризации.

Raymond и др. [107] представили обзор, включающий различные методы выделения признаков и методы классификации ЧР, используемые разными авторами. Кроме того, Mas'ud и др. [108] исследовали применение

традиционных искусственных нейронных сетей (ANN) для классификации ЧР на основе обзора литературы. В настоящее время, с развитием вычислений и хранения данных, интерес сосредоточен на автоматизированном извлечении признаков и классификации с помощью алгоритмов глубокого обучения (DL) с использованием глубоких нейронных сетей (DNN), где отпадает необходимость присутствия эксперта.

В работе [109] измеряются частичные разряды в дискообразных полостях в поликарбонате при переменной частоте (0,01–100 Гц) приложенного напряжения. Преимущество измерений ЧР на переменной частоте заключается в том, что можно получить больше информации о системе изоляции, чем при традиционных измерениях ЧР на одной частоте (обычно 50/60 Гц).

Видно, что активность ЧР в резонаторе зависит от применяемой частоты. Кроме того, зависимость частоты ЧР изменяется в зависимости от амплитуды приложенного напряжения, диаметра полости и расположения полости (изолированной или ограниченной электродом). Предполагается, что частотная зависимость ЧР определяется статистическим запаздыванием ЧР во времени и затуханием поверхностного заряда в резонаторе.

Проанализировав существующие методы контроля частичных разрядов и исследования различных авторов в данной области, следует отметить, что помимо таких преимуществ как обнаружение и регистрация ЧР, определение общего состояния изоляции, выявлен ряд недостатков: влияние помех на приборы, необходимость контакта прибора с изолятором, требование наличия специальных приборов или низкая реакция на регистрацию ЧР.

Малая информативность и неэффективность существующих методов, возможность выполнения периодического контроля изоляции или требование использования дорогостоящего оборудования на подвесных изоляторах ЛЭП Казахстана вызывает необходимость текущей диагностики и создания методов непрерывного контроля токов частичных разрядов подвесных изоляторов.

В настоящее время проводятся работы по улучшению работы электромагнитного и акустического методов, в целях их дальнейшего использования в режимах эксплуатации.

К примеру, в работе [110] авторы пришли к выводу, что параметры характеристик ЧР дают возможность получать более обширную информацию о текущем техническом состоянии подвесного изолятора и прогнозировании его дальнейшего остаточного срока службы, в том числе о процессах зарождения и развития дефектов и полагают, что большое количество отказов высоковольтного оборудования происходят по причине дефектов, параметры которых наиболее точно регистрируются с помощью характеристик ЧР.

Дополнительно можно отметить, что методы диагностики частичных разрядов создают возможность оценивать остаточную работоспособность оборудования, не подвергая влиянию состояние самой изоляции.

Следовательно, вопрос исследования токов частичных разрядов и разработка методов их контроля является актуальным.

1.4 Анализ технических средств реализации контроля тока частичных разрядов

Для контроля параметров высоковольтного оборудования систем электроснабжения наибольшее распространение получили два способа: на выведенном из работы участке системы электроснабжения и под рабочим напряжением средствами контрольно–индикационных датчиков. В соответствии с требованиями нормативов безопасности контрольно–индикационные датчики должны быть конструктивно размещены в заземлённой части контролируемого элемента конструкции. В том случае, если контрольно–индикационный датчик, находится под напряжением, требуется обеспечить передачу текущей телеметрической информации, например, по радиоканалу на расстояние регламентированном нормативами техники безопасности и технологическими требованиями. В случае контроля токов частичных разрядов подвесных изоляторов ЛЭП наилучшим конструктивным решением является расположение датчика в заземлённой части подвесного изолятора. Данное техническое решение позволит реализовать текущий контроль токов утечки подвесного изолятора под рабочим напряжением и с соблюдением требований нормативов безопасности [111–112].

Текущий контроль параметров токов утечки подвесных изоляторов под рабочим напряжением, из-за отсутствия технических решений контрольно–индикационных датчиков, в настоящее время практически не реализован.

Для разработки конструкции датчика ТЧР необходимо решить следующие задачи:

- определить спектральные характеристики;
- обосновать и выбрать конструкцию первичного преобразователя с гальванической развязкой;
- разработать структуру аппаратной части комбинированного устройства передачи телеметрической информации о величине ТЧР подвесных изоляторов;
- обосновать и выбрать техническое решение, обеспечивающее устойчивое электропитание электронного оборудования датчика, конструктивно расположенного в верхней части опоры.

На предприятии ЗАО «Завод Микропроцессорной Техники–ЭНЕРГИЯ» (Россия) разработано устройство контроля токов промышленной частоты с использованием неферромагнитного каркаса – «Пояс Роговского». Внешний вид конструкции Пояса Роговского представлен на рисунке 5.

Данная конструкция позволяет контролировать сигнал широкого спектра. Пояс Роговского представляет собой плоскую ленту из изоляционного материала, на который намотана виток к витку однослойная катушка (позиция 1, рисунок 5). Пояс Роговского конструктивно располагается вокруг токоведущей шины (позиция 3, рисунок 5). Отсутствие ферромагнитного магнитопровода в первичном преобразователе позволяет реализовать высокую точность измерения в широком диапазоне температур окружающей среды.

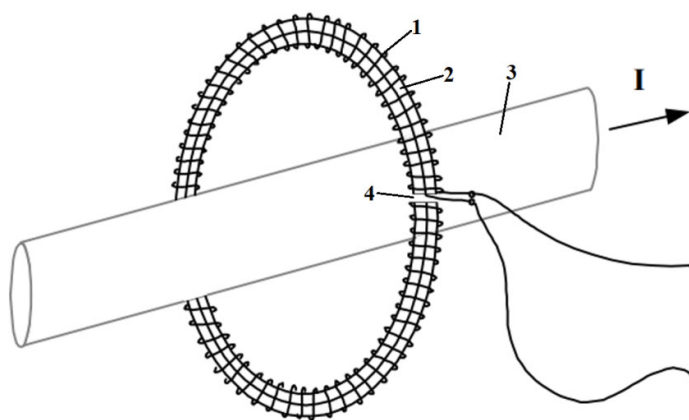


Рисунок 5 – Внешний вид конструкции Пояса Роговского

Технологический разрыв в Поясе Роговского (позиция 4, рисунок 5). не оказывает влияния на его переходные характеристики Конструкция магнитопровода первичного преобразователя, состоящего из плоской ленты, позволяет без дополнительного разрыва сформировать требуемую конструкцию первичного преобразователя с учётом формы токопровода. [113].

Для контроля величины токов частичных разрядов Пояс Роговского предполагается расположить вокруг заземлённой части элемента крепления подвесного изолятора.

Специалистами Хойен Дамин Франк, Бирхёйс, Том Корнел Элисе предложена конструкция датчика тока, конструктивно состоящего из двух частей магнитопровода, устройства усреднения и блока передачи информации средствами GSM. Отличительной особенностью предлагаемого решения является беспроводная передача информации [114].

К ограничительной части предлагаемого устройства следует отнести наличие разрыва магнитопровода первичного преобразователя, что окажет существенное влияние на точность измерения при изменении температуры окружающей среды. Датчик ТЧР предполагается конструктивно размещать в верхней части опоры ЛЭП, в связи с чем он будет подвержен в течение года широкому перепаду температур. Дополнительно участки ЛЭП, на которых необходимо будет реализовать контроль величины ТЧР, проходят по территории, где отсутствует возможность передачи телеметрической информации средствами GSM.

Датчик тока частичных разрядов, разработанный группой специалистов под руководством Аксенова Ю. П. представляет собой конструкцию, состоящую из двух катушек (позиции 2, 3, рисунок 6), конструктивно расположенных на П-образном ферритовом сердечнике (позиции 1, рисунок 6) и размещенных внутри индивидуальных электростатических экранов (позиция 4, 5 рисунок 6). Внешний вид конструктивного расположения элементов датчика ТЧР представлен на рисунке 6. Катушки индуктивности, установленные на параллельно расположенных продольных частях П-образного ферритового сердечника, смещены одна относительно друга по направлению оси

симметрии, обмотки катушек индуктивности соединены последовательно и выведены через разъём позиция 6 [115].

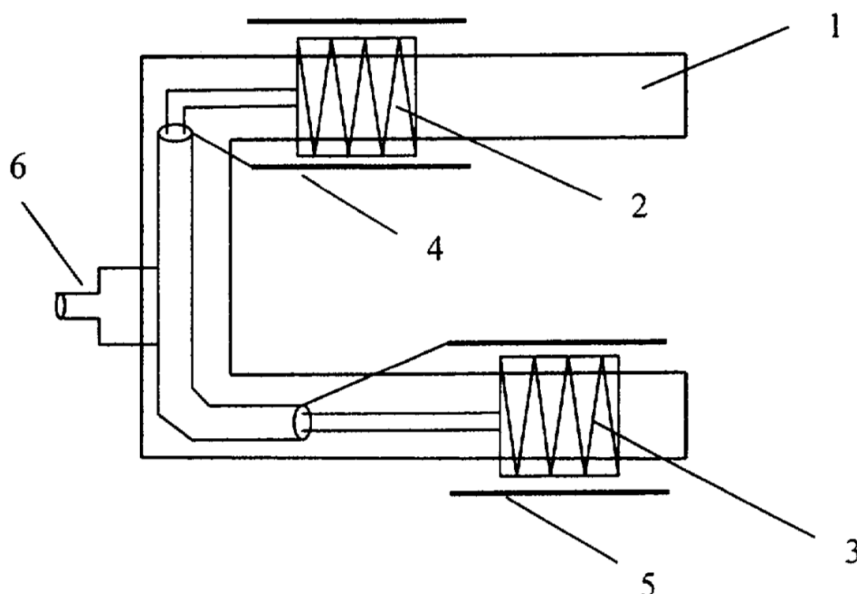


Рисунок 6 – Внешний вид конструктивного расположения элементов датчика ТЧР

К ограничительной части патента на полезную модель следует отнести наличие ферритового магнитопровода, магнитная проницаемость которого, имеет нелинейную зависимость от температуры окружающей среды. Конструкция первичного преобразователя не имеет привязки к конструкции гирлянды подвесного изолятора ЛЭП.

Группой специалистов под руководством Аксенова Ю. П. (Россия) был разработан датчик для регистрации частичных разрядов. Его первичный преобразователь выполнен по емкостному принципу и представляет собой две одинаковые металлические пластины, расположенные с определённым зазором. Пластины закреплены на подложке, изготовленной из магнитного материала, например, магнитной резины.

Принцип работы датчика основан на регистрации электромагнитного излучения, возникающего при частичных разрядах. Такое излучение характеризуется частотным диапазоном от 1 до 100 МГц, при этом наибольшая энергия сосредоточена в интервале 10–20 МГц.

Для обеспечения высокой чувствительности и значительного отношения полезного сигнала к уровню шумов необходимо, чтобы чувствительный элемент имел частотные характеристики, совпадающие с диапазоном измеряемого сигнала. Это достигается за счёт подбора геометрических параметров элемента.

В частности, площадь металлических пластин определяется таким образом, чтобы они выполняли функцию фильтра с характеристиками, соответствующими параметрам регистрируемого сигнала. Благодаря этому

датчик приобретает повышенную помехоустойчивость и обеспечивает максимальную чувствительность [116].

К ограничительной части предлагаемой полезной модели следует отнести необходимость изменения конструкции контролируемого объекта.

Таким образом, за основу технического решения первичного преобразователя, отвечающего требованиям спектральных характеристик контролируемого параметра и конструктивного согласования с креплением заземлённой части гирлянды подвесных изоляторов, принимается Пояс Роговского.

Существенное влияние на надёжность и эксплуатационные характеристики контрольно-индикационного датчика оказывают конструкционные решения и техническая реализация схмотехнических решений.

В настоящее время наблюдается высокая динамика модернизации функционально законченных электронных устройств. На стадии проектирования возникает необходимость разрабатывать структурную схему электронного блока. Использование модульного принципа значительно упрощает и сокращает срок разработки.

В ООО «МикроМаксСистемс» разработан конструктив модульного типа построения электронного оборудования. Модульное электронное устройство содержит корпус с секциями для модулей с одинаковыми гометрическими размерами и теплоотводящие средства. В корпусе предусмотрены силовые каркасные элементы, обеспечивающие механические защитные свойства модулям электронного оборудования. Часть панелей корпуса имеет внешнее ребрение в виде одинаковых по высоте выступов и обеспечивают рассеивание тепла. Внешние стенки каркаса имеют гладкий внешний габарит устройства, обеспечивающий простоту и удобство его установки в месте размещения. В конструктиве предусмотрены секции с наибольшим теплоотводом. Предложенный модульный конструктив имеет упрощенную конструкцию, эффективное отведение тепла от электронных компонентов, высокие эксплуатационные характеристики: производительность, степень пыле- и влагозащиты и широкий рабочий температурный диапазон [117].

К ограничительной части предлагаемого технического решения модульной конструкции следует отнести необходимость использования модулей одинакового геометрического размера.

Группой специалистов под руководством Адамова А.А. предложено техническое решение – унифицированный электронный модуль информационно-вычислительных систем. Предлагаемая конструкция расположена в металлическом корпусе, состоящем из основания и крышки. Внутри корпуса расположены контроллер, источник электропитания, набор разъемов для передачи информационных сигналов между электронными блоками. Отличительной особенностью предлагаемой конструкции является установка внутри корпуса радиатора, передающего тепло от центрального процессора к верхней крышке модуля. Предлагаемое техническое решение обеспечивает работоспособность компонентам модуля в диапазоне температур от – 40 до + 85 °С [118].

При разработке контрольно–индикационного датчика тока частичных разрядов за основу принят модульный принцип проектирования. Основными функциями датчика ТЧР являются: преобразования контролируемого параметра в сигнал напряжения с динамической ошибкой $<10\%$, достаточной для инженерных расчётов; нормирование выходного сигнала с первичного преобразователя; выделение постоянной составляющей информационного сигнала; сохранение текущей информации с заданным шагом дискретизации; передача текущей информации на диспетчерский пункт. Контрольно–индикационный датчик должен обеспечивать устойчивую работоспособность в диапазоне температур окружающей среды $-50\div+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Специалистами ЗАО «Техно–ТМ» разработана конструкция радиоэлектронной аппаратуры с трёхмерным модульным исполнением. Данное решение обеспечивает повышение универсальности, увеличение плотности компоновки и улучшение теплоотвода при сохранении ремонтпригодности за счёт возможности замены отдельных электронных модулей.

Конструкция предусматривает размещение параллельно ориентированных модулей, выполненных на основе печатных коммутационных плат с металлизированными отверстиями. На этих платах устанавливаются как стандартные электронные компоненты, так и микроплаты с бескорпусными активными и пассивными элементами.

Для отвода тепла используется специальная теплоотводящая гребёнка, которая частично охватывает корпус конструкции или основание микроплаты и имеет тепловой контакт с внешней системой охлаждения. Сам корпус выполнен из материала с высокой теплопроводностью.

При выходе модулей из строя их замена осуществляется путём отпайки выводов от контактных площадок печатных плат с одновременным их извлечением из металлизированных отверстий. После этого неисправный компонент или микроплата заменяется новым аналогом, и затем восстанавливаются электрические соединения и элементы системы теплоотвода [119].

К ограничительной части изобретения следует отнести необходимость использования в конструктиве одинаковых по геометрическим размерам модулей.

Основными требованиями к системе передачи телеметрической информации являются: передача информации с опор на диспетчерский пункт должна осуществляться, как в зоне действия сотовой связи, так и при её отсутствии. Контрольно–индикационный датчик конструктивно расположен в верхней части опоры воздушной линии электропередачи. Основным возмущающим фактором при передаче телеметрической информации беспроводным способом в непосредственной близости от токоведущих проводов является электромагнитное поле короны токоведущих проводов ЛЭП.

Группой специалистов под руководством Логгера К. М. разработано устройство для сбора, обработки и передачи телеметрической информации. Основная цель данного решения заключается в обеспечении эффективного сбора данных и увеличении скорости их передачи.

Достижение поставленной задачи обеспечивается за счёт конструктивных и функциональных особенностей устройства. Оно включает корпус с возможностью крепления как на горизонтальных, так и на вертикальных поверхностях, а также печатную плату, на которой размещены основные элементы.

В состав устройства входят блок питания, микроконтроллер с расширенными функциями и большим объёмом постоянной памяти, часы реального времени со встроенной энергонезависимой памятью и резервной литиевой батареей. Кроме того, предусмотрены преобразователи интерфейсов RS-232 и RS-485, обеспечивающие обмен данными.

Отличительной особенностью предлагаемого технического решения является двунаправленная передача информации. В датчике ТЧР необходимо управлять длительностью интервала времени регистрации численного значения его интегральной величины. Для синхронизации момента времени регистрации численного значения ТЧР на датчиках, расположенных на опорах по длине контролируемого участка ЛЭП, каждый датчик должен быть укомплектован часами реального времени со встроенной энергонезависимой памятью [120].

К ограничительной части следует отнести избыточные функциональные узлы (преобразователь интерфейса RS-232, преобразователь сигналов интерфейса RS-485 с блоком гальванической развязки).

Специалистами Кукушкиным С.С. и Кузнецовым В. И. предложен способ передачи телеметрической информации, адаптированный к различным ситуациям, появляющимся при проведении испытаний ракетно-космической техники, и система для его осуществления. Предлагаемый способ обеспечивает адаптацию телеметрической системы, в случае возникновения нештатных ситуаций, требующих повышения помехоустойчивости системы синхронизации, изменения разрядности данных, структур сообщений в групповом сигнале, оказывающие существенное влияние: на точностные характеристики результатов измерений, на спектрально-энергетические показатели каналов связи, время получения и передачи измерительной информации в условиях различного рода помех. Он достигается тем, что реализуют следующие возможности способа: 1) сжатое представление результатов телеизмерений в групповом сигнале; 2) замена несодержательной информации на избыточные символы помехоустойчивых кодов; 3) изменение частот опроса информационно-значимых телеметрируемых параметров. Применительно к системе передачи телеметрической информации ТЧР с опор контролируемого участка ЛЭП на диспетчерский пункт, следует отметить, что в процессе работы возможна следующая нештатная ситуация – смена каналов передачи телеметрической информации с GSM на радиомодемную связь; синхронизация и передача информации по радиоканалу с нескольких датчиков ТЧР; высокая помехонасыщенность окружающего пространства датчика [121].

К ограничительной части предложенного способа следует отнести отсутствие информации о технических решениях приёмо-передающих устройствах. У каждого технического решения передачи телеметрической

информации имеются специфические особенности, оказывающие существенное влияние на достоверность передаваемой информации.

В научно–производственном предприятии геофизической аппаратуры «ЛУЧ» (Россия) коллективом специалистов под руководством Лукьянова Э.Е. разработан способ передачи данных от забойной телеметрической системы, а также устройство для его реализации.

Суть метода заключается в передаче информации с использованием закодированных электрических сигналов, которые принимаются наземным оборудованием с последующим их преобразованием. Передача осуществляется по гальванически связанному каналу, основанному на модуляции электрохимического потенциала верхней части бурильной колонны.

В паузах между сеансами передачи в проводящую шину верхней части колонны периодически подаётся напряжение от источников питания через ограничивающие сопротивления, при этом происходит смена полярности. Устройство включает коммутирующий блок, работающий под управлением кодового сигнала телеметрической системы. Приёмное устройство связано с компьютером для обработки поступающих данных.

Предложенное решение обеспечивает независимость передачи информации от характеристик геологического разреза и позволяет снизить энергозатраты. Дополнительным преимуществом является использование сопутствующих источников электроэнергии для организации передачи телеметрических данных [122].

К ограничительной части способа следует отнести – гальванически связанные информационные каналы имеют высокий коэффициент затухания и не позволяют реализовать передачу телеметрической информации на большие расстояния.

1.5 Постановка задач исследования

Таким образом, в ходе выполнения работы были выявлены проблемы активных потерь электроэнергии и низкой энергоэффективности при передаче ее по высоковольтным ЛЭП потребителю, а также перекрытие гирлянды изоляторов и перебои в электроснабжении, вплоть до разделения энергосистем. Негативное влияние токов частичных разрядов является одной из проблем, которая требует исследования и разработки методов решения с целью контроля состояния изоляторов высоковольтных ЛЭП.

Изоляция является наиболее повреждаемым элементом электрических сетей и любые перебои в электроснабжении по причине неисправности подвесных изоляторов могут принести большие экономические затраты для эксплуатации.

Основные задачи диссертационной работы:

- обосновать актуальность исследования токов частичных разрядов;
- провести теоретические исследования токов частичных разрядов;
- провести экспериментальные исследования токов частичных разрядов;

- разработать схему замещения процессов протекания токов частичных разрядов на поверхности изолятора;
- разработать имитационную модель в пакете прикладных программ MATLAB;
- выполнить спектральный анализ характеристик импульсов частичных разрядов для различных частот.

1.6 Выводы

Активные потери электроэнергии и метеозависимые изоляционные характеристики подвесных изоляторов являются одной из распространённых проблем приводящих к увеличению активных потерь в системе электроснабжения. Проведенный анализ факторов, снижающих надежность подвесных изоляторов, показывает, что более 80% случаев выхода из строя оборудования высокого напряжения связано с увеличением энергетических характеристик частичных разрядов.

Представленные на сегодняшний день методы учета и контроля потерь линий электропередач имеют не только ряд преимуществ, но и недостатки, которые не позволяют эффективно использовать предложенные методы в системе технического обслуживания.

Частотные характеристики импульсной последовательности ЧР имеют широкий спектр. В процессе разработки датчиков тока ЧР очень важно определить частотный диапазон контролируемого параметра.

Контроль токов частичных разрядов является актуальной задачей энергосбережения и снижения числа аварийных ситуаций.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

2.1 Электромагнитные процессы на поверхности подвесных изоляторов в изоляции

Протекающие на поверхности подвесного изолятора электромагнитные процессы в значительной степени определяются его конструктивным исполнением, а также параметрами электрической энергии, передаваемой по токоведущим проводам. Конструкция подвесного изолятора тарельчатого типа, применяемого на воздушных линиях электропередачи, представлена на рисунке 7.

Подвесной изолятор включает в себя заземлённую часть крепления (1), нижнее металлическое крепление (2), находящееся под высоким потенциалом, а также изоляционное тело (3). Указанные элементы формируют электрическую и механическую структуру изолятора, определяющую распределение электрического поля и характер протекания поверхностных токов утечки.

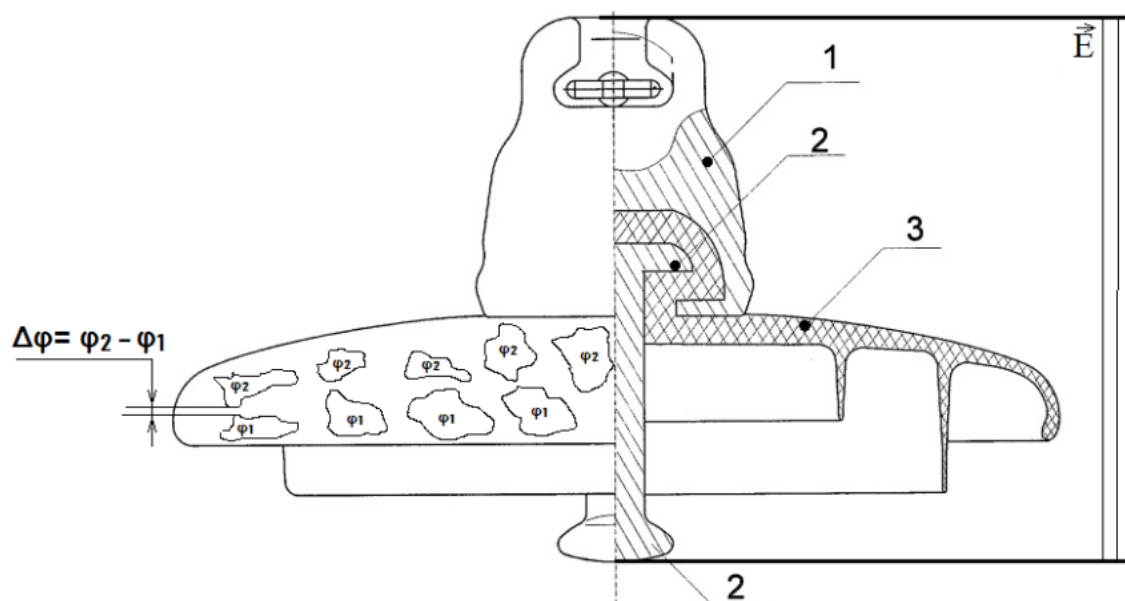


Рисунок 7– Конструкция тарельчатого подвесного изолятора воздушных линий электропередачи

Приложенное к металлическим элементам крепления (2) переменное напряжение формирует в окружающем пространстве подвесного изолятора электрическую составляющую электромагнитного поля (E).

Под действием данного поля, а также вследствие неоднородности структуры материала изолятора, на его поверхности происходит перераспределение электрических зарядов с образованием локальных потенциалов φ_1 и φ_2 . Существенное влияние на формирование зон концентрации потенциалов оказывают эксплуатационные факторы, в частности увлажнение и загрязнение

поверхности изоляционного элемента 3.

При превышении напряжения пробоя между близко расположенными областями с различными потенциалами ϕ_1 и ϕ_2 возникает кратковременный электрический разряд, реализующийся в виде локальной электрической дуги. Указанное явление классифицируется как частичный разряд. Данный физический процесс сопровождается возникновением импульсных токов в цепи гирлянды изоляторов, обладающих широким спектром частотных составляющих.

Проведение анализа электромагнитных процессов, протекающих на поверхности подвесных изоляторов высоковольтных воздушных линий электропередачи, позволяет сформировать адекватную имитационную модель. Разработка такой модели является необходимым этапом для обоснования требований к частотным характеристикам датчиков частичных разрядов и повышения эффективности их применения в системах диагностики [123].

2.2 Разработка схемы замещения подвесных изоляторов и выбор параметров

Динамические свойства токов ЧР обусловлены следующими факторами:

- реактивными и активными составляющими системы электроснабжения;
- емкостной составляющей накопления зарядов между неоднородными областями на поверхности изолятора;
- активным сопротивлением электродугового канала электродугового разряда.

Объектами исследования являются:

- высоковольтный источник электроэнергии;
- электрический контур одной фазы переменного тока с учётом суммарной величины активного и реактивного сопротивления;
- подвесной изолятор цепи одной фазы.

Схема замещения объектов исследования представлена на рисунке 8.

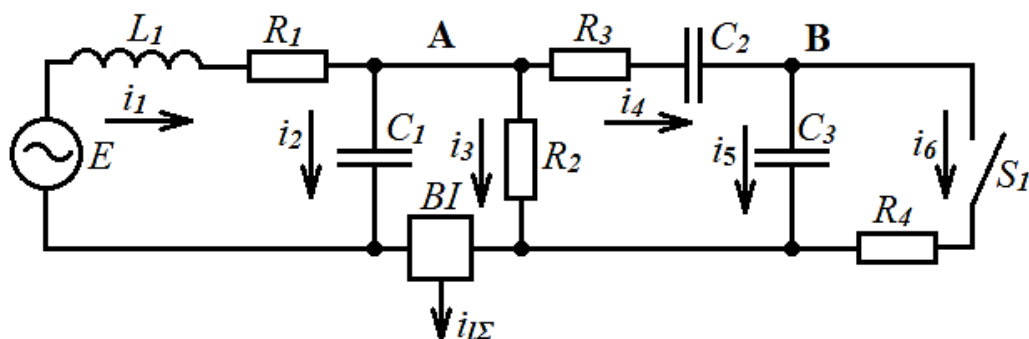


Рисунок 8 – Схема замещения объекта исследования

Фазное напряжение на токоведущем проводе моделируется источником переменного напряжения E . Суммарная индуктивность и активное

сопротивление источника электропитания и токоведущего провода одной фазы на схеме замещения представлены индуктивностью L_1 и сопротивлением R_1 . Электрическая ёмкость токоведущего провода между подстанциями относительно земли моделируется конденсатором C_1 . Величина объемного тока утечки (leakage) подвесного изолятора определяется значением резистора R_2 . Величина активного сопротивления поверхности изолятора от токоведущего провода до места возникновения ЧР моделируется резистором R_3 . Электрическая ёмкость C_2 моделирует накопление зарядов на поверхности изолятора между элементом крепления 2 (рисунок 8) и неоднородной областью изолятора с концентрацией зарядов ϕ_1 . Электрическая ёмкость между неоднородными областями на поверхности изолятора моделируется конденсатором C_3 . Активное сопротивление электродугового канала ЧР моделируется резистором R_4 . Замкнутое состояние нелинейного элемента S_1 моделирует процесс электродугового разряда. Разомкнутое состояние ключа S_1 соответствует отсутствию электродугового разряда между неоднородными областями ϕ_1 и ϕ_2 (рисунок 8). Регистрация тока утечки (leakage) осуществляется посредством устройства контроля ВІ. Напряжение на противоположных элементах крепления изолятора в несколько порядков превышает величину пробивного напряжения ЧР. В этом случае значение переменного напряжения на зажимах изолятора можно считать величиной неизменной. Распределённая в пространстве электрическая ёмкость между токоведущим проводом и землёй моделируется сосредоточенной ёмкостью C_1 . В процессе теоретических исследований не учитываются изменения температуры и влажности подвесного изолятора и окружающей среды.

На поверхности изолятора электромагнитные процессы при наличии электродугового канала на интервале времени $t_5 - t_6$ описываются следующей системой уравнений:

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4 \quad (3)$$

$$i_4 = i_5 + i_6 \quad (4)$$

$$i_{I\Sigma} = i_3 + i_5 + i_6 \quad (5)$$

$$E = L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 + \frac{1}{C_1} \int_{t_5}^{t_6} i_2 dt + i_3 R_2 + i_4 R_3 + \frac{1}{C_2} \int_{t_5}^{t_6} i_4 dt + U_{C_3} \quad (6)$$

$$i_5 = C_3 \frac{dU_{C_3}}{dt} \quad (7)$$

$$i_6 = \frac{U_{C_3}}{R_4} \quad (8)$$

Уравнения (3) и (4) моделируют протекание токов в узлах А и В (рисунок 8) соответственно. Регистрируемый суммарный ток утечки в модели представлен уравнением (5). Уравнения (6)–(8) описывают динамические процессы тока утечки промышленной частоты и тока частичных разрядов.

После погасания электрической дуги на интервале времени $t_6 - t_7$

реализуется рекомбинация зарядов электрических ёмкостей C_2 и C_3 . Процесс рекомбинации зарядов описывается следующей системой уравнений:

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4 \quad (9)$$

$$i_4 = i_5 i_4 \quad (10)$$

$$i_{l\Sigma} = i_3 + i_5 i_4 \quad (11)$$

$$E = L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 + \frac{1}{C_1} \int_{t_6}^{t_7} i_2 dt + i_3 R_2 + i_4 R_3 + \\ + \frac{1}{C_2} \int_{t_6}^{t_7} i_4 dt + \frac{1}{C_3} \int_{t_6}^{t_7} i_5 dt + U_{C_{30}} i_4 \quad (12)$$

Отличительной особенностью уравнения (12) является начальное условие $U_{(C_{30})}$. Наличие этой компоненты обусловлено неполным разрядом энергии неоднородных областей ϕ_1 и ϕ_2 (рисунок 7) в процессе горения электрической дуги на поверхности изолятора.

Разработка схемы замещения подвешенного изолятора позволит собрать имитационную модель в пакете прикладных программ MATLAB. Её параметры выбраны в соответствии с требуемыми элементами цепи и процессами, которые протекают на поверхности подвешенного изолятора в момент образования дугового канала.

2.3 Моделирование частичных разрядов и анализ переходных процессов

С целью определения требований к частотным характеристикам первичного преобразователя датчика ЧР разработана имитационная модель системы «источник электропитания – изолятор» с использованием программы MATLAB. Имитационная модель представлена на рисунке 9.

В имитационной модели блок A1 моделирует протекающие на изоляторе электрические процессы. Блок A2 моделирует источник электроэнергии с активными и реактивными элементами трансформатора и воздушной линии электропередачи. Блоком Pulse Generator реализуется управление частотой и скважностью частичных разрядов. Регистрация переходного процесса тока частичных разрядов осуществлялась посредством Scope. Спектральные характеристики сигнала частичных разрядов были получены с помощью блока Powergui посредством быстрого преобразования Фурье (FFT-анализ).

Для имитационного моделирования использованы технические характеристики участка линии электропередачи протяжённостью 131 км с линейным напряжением 500 кВ.

В модели на рисунке 9 источником переменного напряжения E1 моделируется фазное напряжение токоведущего провода 294 кВ.

Индуктивность токоведущего провода L1 (2,4 мГн) определялась из выражения (13):

$$L \cong \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{d}{r} \quad (13)$$

где: L – индуктивность токоведущего провода; l – длина провода; d – расстояние между проводами; r – радиус провода.

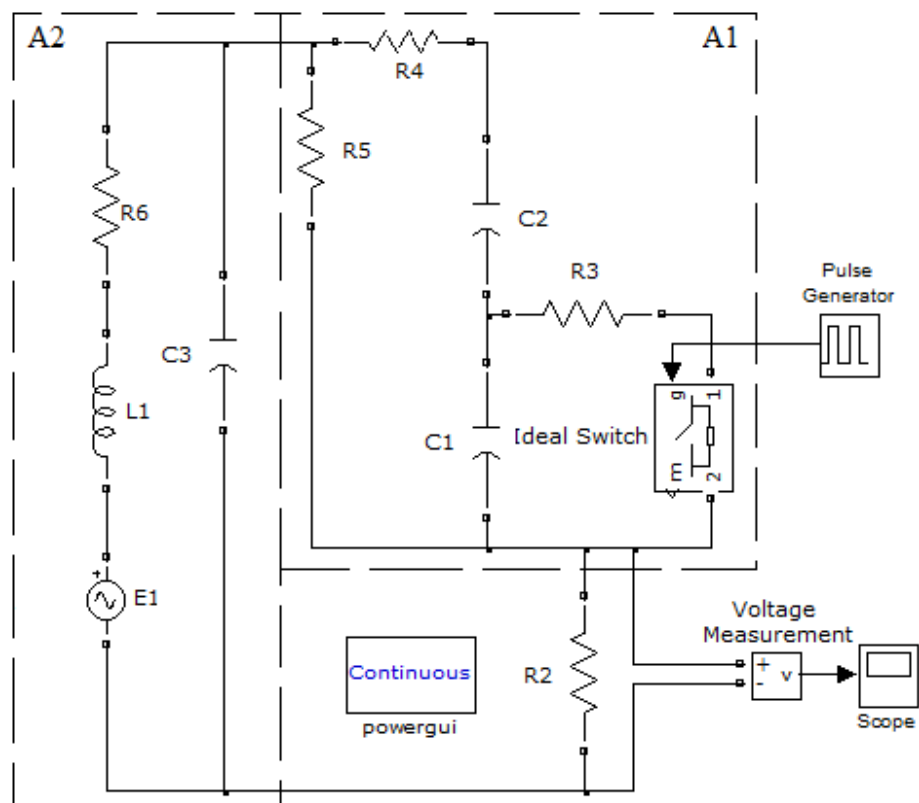


Рисунок 9 – Имитационная модель системы «источник электропитания – изолятор»

Сопротивление R_6 (3,32 Ом) моделирует активные составляющие сопротивления источника электропитания и токоведущего провода одной фазы. Суммарная ёмкость токоведущего провода относительно земли составляет $19,8 \cdot 10^{-9}$ Ф. Активное сопротивление изолятора моделировалось резистором R_5 (350 МОм). Ёмкость C_2 принята равной поверхностной ёмкости C_3 между неоднородной областью ϕ_1 и ϕ_2 ($3 \cdot 10^{-12}$ Ф). Активное сопротивление электродугового канала R_3 составляет 10 кОм. Резистор R_4 (150 кОм) определял динамические процессы рекомбинации зарядов на интервале времени Δt_2 (рисунок 8). Резистор R_2 (880 Ом) моделирует токовый шунт.

Для оценки адекватности имитационной модели сопоставлялись теоретически и экспериментально полученные осциллограммы переходного процесса одного импульса тока ЧР. Графики теоретически (зависимость 1) и экспериментально (зависимость 2) полученных переходных процессов представлены на рисунке 10.

Характер переходного процесса на интервале Δt_1 определяется наличием электродугового разряда между областями концентрации электрических зарядов ϕ_1 и ϕ_2 .

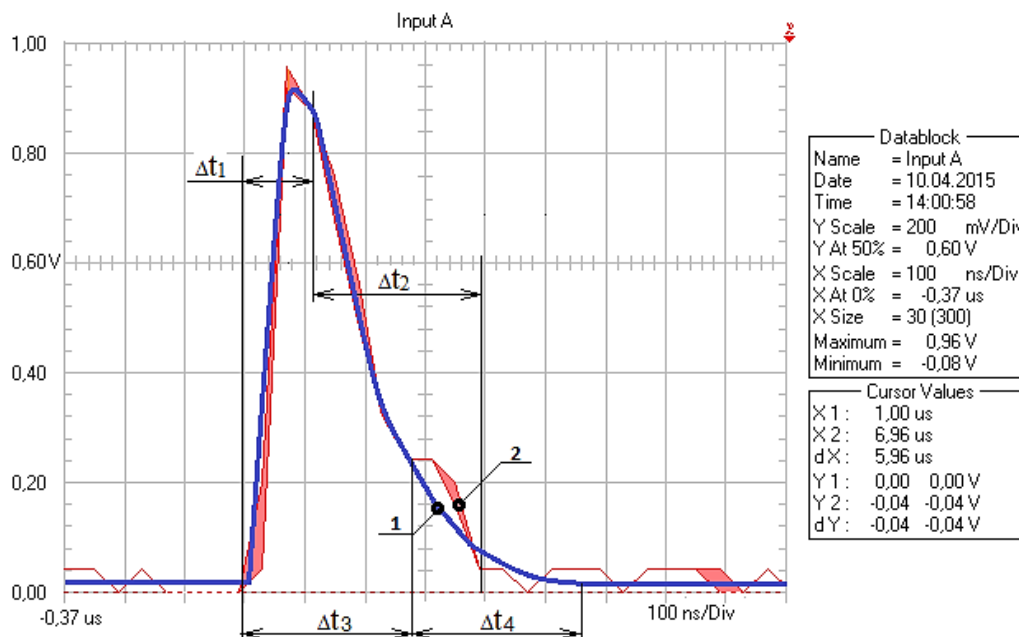


Рисунок 10 – Переходные процессы тока ЧР

На имитационной модели (рисунок 9) динамический процесс в этом временном интервале моделируется замкнутым состоянием ключа Ideal Switch. После прекращения электродугового разряда на интервале Δt_2 динамические характеристики тока ЧР определяются рекомбинацией поверхностных зарядов между металлическим креплением изолятора, областями концентрации электрических зарядов ϕ_1 и ϕ_2 и нижним металлическим креплением изолятора.

В процессе имитационных экспериментов была получена диаграмма одного импульса частичного разряда (рисунок 10, позиция 1) для одних и тех же параметров элементов стенда и напряжения источника электропитания.

Сравнение осциллограмм показало максимальную относительную погрешность моделирования на интервале Δt_3 – 4 %, а на интервале Δt_4 – 7 % относительно максимального значения тока ЧР.

Имитационная модель для инженерных расчётов обладает достаточной точностью.

Для определения требований к частотным характеристикам первичного преобразователя датчика определены спектральные характеристики тока частичных разрядов в диапазоне частот 348 ÷ 7092 Hz посредством блока Powergui (рисунок 9).

В процессе определения спектральных характеристик в качестве базовой частоты принята частота напряжения источника электроэнергии (50 Hz). Амплитуда гармоники этой частоты была принята равной 100 %. Частота Pulse Generator соответствовала частоте следования импульсов ЧР. Она выбиралась с

равномерным распределением в диапазоне от $F_{\min}=348$ Hz до $F_{\max}=7092$ Hz. В процессе выбора частоты учитывалось условие её кратности величине первой гармоники 50 Hz.

Численные значения частот и амплитуд каждой гармоники с учётом частоты следования импульсов тока ЧР представлены в таблице 4.

Таблица 4 – FFT анализ токов частичных разрядов

Период следования ЧР, S	Контролируемые параметры каждой гармоники	№ гармоники					
		1	2	3	4	5	6
0,0001409	Частота, Hz	6950	13950	20950	27950	34950	41950
	Амплитуда, %	3,29	3,46	3,49	3,5	3,51	3,51
0,0006897	Частота, Hz	1400	2850	4300	5750	7200	8650
	Амплитуда, %	0,35	0,55	0,64	0,68	0,71	0,72
0,00125	Частота, Hz	750	1550	2350	3150	3950	4750
	Амплитуда, %	0,12	0,22	0,29	0,364	0,37	0,38
0,001818	Частота, Hz	500	1050	1600	2150	2700	3250
	Амплитуда, %	0,05	0,11	0,15	0,18	0,21	0,23
0,002222	Частота, Hz	400	850	1300	1750	2200	2650
	Амплитуда, %	0,04	0,07	0,11	0,13	0,15	0,16
0,002857	Частота, Hz	300	650	1000	1350	1700	2050
	Амплитуда, %	0,02	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12

В выделенном секторе таблицы 4 представлены наиболее значимые энергетические и частотные характеристики спектральных составляющих для соответствующих периодов следования частичных разрядов. Жирным шрифтом выделены максимальное и минимальное значения частоты гармонической составляющей тока ЧР.

В рамках одной группы определены максимальное и минимальное значения временных интервалов между рядом расположенными импульсами ЧР (2,87 и 0,141 ms). Численные значения минимального и максимального значений частоты следования ЧР в рамках одной группы соответствуют значениям 348 и 7092 Hz. В заданном диапазоне частот определены кратные 50 Hz с равными интервалами шесть значений частот следования импульсов ЧР. Ток частичных разрядов имеет импульсную форму. Импульсные функции с большой скважностью имеют широкий спектр гармонических составляющих. Девяносто процентов энергии импульсной функции представлены первыми шестью гармониками относительно частоты следования импульсной функции.

Основным фактором для определения динамических характеристик датчика тока ЧР будут являться амплитудные и частотные характеристики со второй по шестую гармоники в диапазоне частот от $F_{\min}=348$ Hz до $F_{\max}=7092$ Hz следования ЧР в рамках одной группы.

Анализ частотных характеристик гармонических составляющих для ЧР выполнен относительно второй гармоники. В выделенных ячейках таблицы 4 амплитуда соответствующих гармоник почти в 20 раз меньше амплитуды второй гармоники. Это даёт относительную ошибку менее 5 %. Минимальная частота

гармонической составляющей соответствует величине 1400 Hz, а максимальная частота будет определяться величиной 41950 Hz [124].

Имитационное моделирование позволило определить частотные характеристики информационного канала требования датчика тока ЧР. Полученный результат моделирования сопоставлялся с экспериментально полученными данными лабораторного стенда. Была проведена оценка адекватности имитационной модели полученных переходных процессов. Максимальная относительная погрешность моделирования не превысила достаточных для инженерных расчётов 7 %.

2.4 Выводы

При исследовании явления возникновения частичных разрядов помимо изучения характеристик и физических законов их появления в изоляции, стараются провести теоретические исследования в различных программных средствах моделирования для анализа результатов и предоставить гипотезы закономерностей и условий возникновения ЧР, поскольку следующим этапом будет проверка экспериментальным методом в высоковольтной лаборатории.

В результате теоретических исследований были рассмотрены электромагнитные процессы протекания тока частичных разрядов на поверхности изолятора, которые позволили разработать схему замещения и выбрать ее параметры. Для полученной схемы замещения были разработаны математическая и имитационная модели.

В итоге были определены граничные значения необходимого рабочего частотного диапазона информационного канала датчика тока ЧР.

В процессе определения спектральных характеристик в качестве базовой частоты принята частота напряжения источника электроэнергии (50 Hz). Амплитуда гармоники этой частоты была принята равной 100 %. Частота Pulse Generator соответствовала частоте следования импульсов ЧР. Она выбиралась с равномерным распределением в диапазоне от $F_{min}=348$ Hz до $F_{max}=7092$ Hz. В процессе выбора частоты учитывалось условие её кратности величине первой гармоники 50 Hz.

В рамках одной группы определены максимальное и минимальное значения временных интервалов между рядом расположенными импульсами ЧР (2,87 и 0,141 ms). Численные значения минимального и максимального значений частоты следования ЧР в рамках одной группы соответствуют значениям 348 и 7092 Hz. Минимальная частота гармонической составляющей соответствует величине 1400 Hz, а максимальная частота будет определяться величиной 41950 Hz.

Особое внимание было уделено оценке адекватности модели путём сопоставления теоретически и экспериментально полученных результатов исследований.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

3.1 Разработка программы экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования датчика тока представляет собой научно поставленный опыт с целью:

- определения статических и динамических характеристик ЧР;
- оценки устойчивости работы датчика ЧР;
- определение повторяемости результатов в рабочем диапазоне контролируемого параметра.

В процессе проведения лабораторных исследований, в соответствии с настоящей программой, будут решены следующие задачи:

- планирование и проведение лабораторных исследований;
- выбор испытательного оборудования;
- разработка и изготовление лабораторного стенда;
- разработка алгоритма обработки экспериментально полученных результатов в процессе лабораторных испытаний;

Программа экспериментальных исследований предназначена для проведения лабораторных исследований с целью проверки работоспособности датчика ЧР и определения следующих характеристик:

- исследование динамических характеристик тока утечки;
- определение частотного диапазона первичного преобразователя датчика тока;
- разработка структуры аппаратной части датчика;
- разработка принципиальной схемы датчика;
- определение переходной характеристики датчика тока утечки;
- определение динамических характеристик первичного преобразователя датчика.

На период проведения исследований представляются:

- программа лабораторных исследований токов утечки подвесных изоляторов высоковольтных ЛЭП;
- лабораторный стенд для проведения лабораторных исследований;
- макет датчика для проведения лабораторных исследований;
- измерительные приборы необходимые для проведения лабораторных исследований;
- персональный компьютер с программным обеспечением Microsoft office.

Лабораторные исследования проводятся на стенде в научно – исследовательской лаборатории кафедры.

Лабораторные исследования контрольно – индикационного датчика токов утечки подвесных изоляторов ВЛЭП, проводятся в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5 – Алгоритм выполнения экспериментальных исследований

Наименование работ	Вид
Монтаж лабораторного стенда для проведения научно – исследовательских работ тока частичных разрядов.	Набор монтажных инструментов, осциллограф, мультиметр, двухполярный регулируемый источник питания.
Определение динамических характеристик ЧР подвесных изоляторов высоковольтных ЛЭП	Макет стенда, осциллограф, компьютер с программным обеспечением Microsoft office
Оформление полученных в лаборатории результатов	Материалы эксперимента

3.2 Разработка и изготовление лабораторного стенда

С целью проведения экспериментальных исследований был разработан лабораторный стенд подвесного изолятора (рисунок 11), структурная схема которого представлена на рисунке 12. В процессе лабораторных исследований должны быть соблюдены правила безопасности технической эксплуатации электроустановок и безопасность приборов и электрооборудования, входящих в комплект испытательного оборудования, должна отвечать требованиям правил. С целью определения диапазона временных интервалов между ЧР проведены экспериментальные исследования на лабораторном стенде. Принципиальная схема и внешний вид лабораторного стенда представлены на рисунке 11.

Регулирование напряжения на изоляторе F1 осуществлялось посредством автотрансформатора T1 с напряжением питания 220 В и мощностью 200 Вт. Повышение напряжение до 10 кВ на изоляторе F1 осуществлялось с помощью трансформатора T2 мощностью 200 Вт при напряжении на первичной обмотке 220 В. Делитель напряжения состоял из резисторов R1.1 и R1.2 сопротивлением 18,6 мОм и 1 кОм соответственно. Сопротивление резистивного датчика тока R2 составляет 880 Ом. На рисунке 10 соответствующие элементы стенда имеют аналогичные обозначения. Регистрация переходных процессов напряжения вторичной обмотки T2 и тока через изолятор F1 осуществлялась посредством осциллографа Fluke ScopeMeter и a laptop со специализированным программным обеспечением.

Лабораторный стенд состоит из лабораторного автотрансформатора T1 – марки ЛАТР 1М, посредством которого осуществляется регулирование напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора T2. Технические характеристики трансформатора T1 представлены в таблице 5.

В процессе экспериментальных исследований осциллографировались следующие параметры:

- напряжение на выходных зажимах трансформатора T2, посредством резистивного делителя R1.1 и R1.2 (рисунок 12), зависимость напряжения в функции времени на осциллограмме (рисунок 13) представлена, синим цветом;

– ток, протекаемый через изолятор при действующем значении напряжении на зажимах вторичной обмотки 15 кВ.

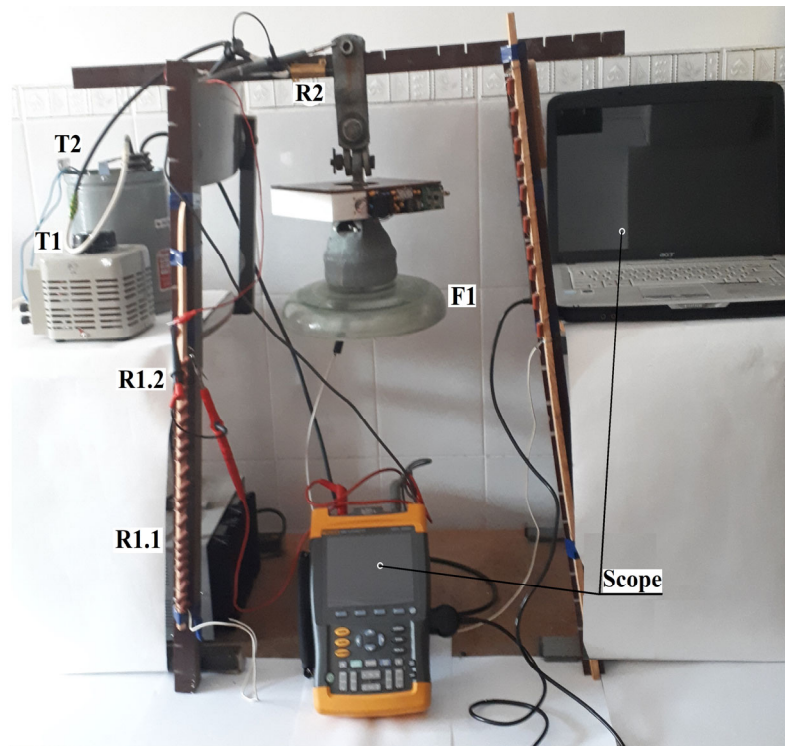


Рисунок 11 – Внешний вид лабораторного стенда

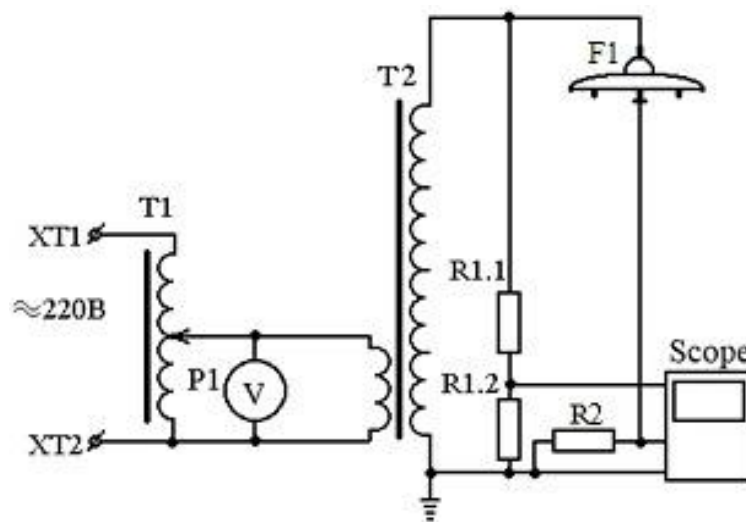


Рисунок 12 – Структурная схема стенда для определения характеристик тока утечки изоляторов, где: T1 – лабораторный автотрансформатор; P1 – вольтметр; T2 – повышающий трансформатор; F1 – изолятор; Scope – цифровой осциллограф; R1.1, R1.2 – резистивный делитель датчика напряжения сопротивлением R2 – измерительный шунт сопротивлением 880 Ом

Таблица 6 – Технические характеристики трансформатора Т1

Параметр, ед. измерения	Величина
Номинальная мощность, Вт	1000
Номинальное напряжение питания, В	220
Диапазон регулирования выходного напряжения, В	0 ÷ 250
Номинальный ток нагрузки, А	5
Частота напряжения питания, Гц	50

К выходу лабораторного автотрансформатора Т1 подключается первичная обмотка повышающего трансформатора Т2 Технические характеристики трансформатора Т2 представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики трансформатора Т2

Номинальная мощность, Вт	250
Номинальное напряжение первичной обмотки, В	220
Номинальный ток первичной обмотки, А	1,25
Номинальное напряжение вторичной обмотки, В	15000
Номинальный ток вторичной обмотки, мА	25
Частота напряжения питания, Гц	50

3.3 Результаты экспериментальных исследований

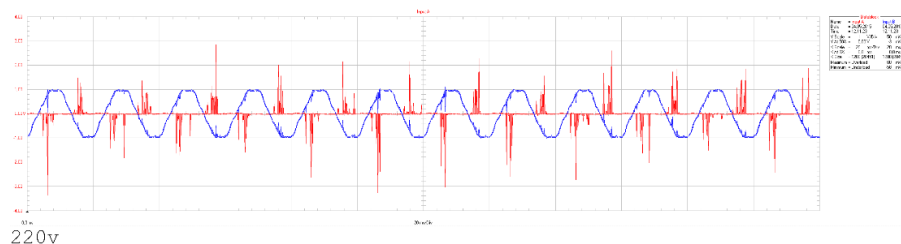
В соответствии с программой экспериментальных исследований на стенде были получены диаграммы напряжения прикладываемого к изолятору и тока протекаемого через него.

Диаграмма тока на осциллограмме (рисунок 13) представлена красным цветом, а диаграмма напряжения синим цветом.

Диапазоны временных интервалов и номера анализируемых осциллограмм представлены в таблице 7.

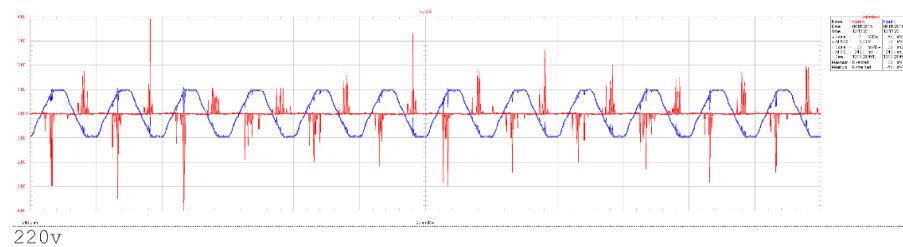
Таблица 7 – Временные характеристики осциллограмм

№ осциллограммы	1	2	3	4	5	6	7
Временной интервал, мс	0÷ 240	240÷ 480	480÷ 720	720÷ 960	960÷ 1200	1200÷ 1440	1440÷ 1680

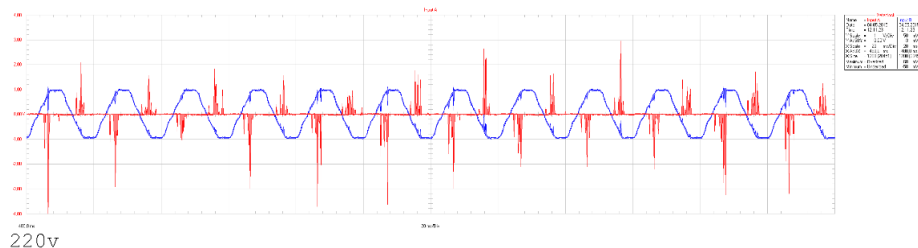


а)

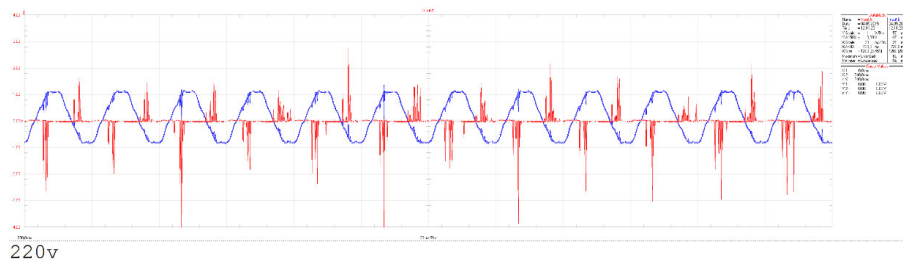
Рисунок 13 – Диаграммы напряжения и тока (начало)



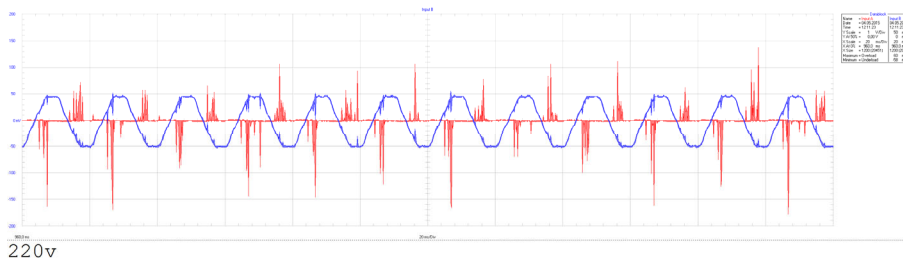
б)



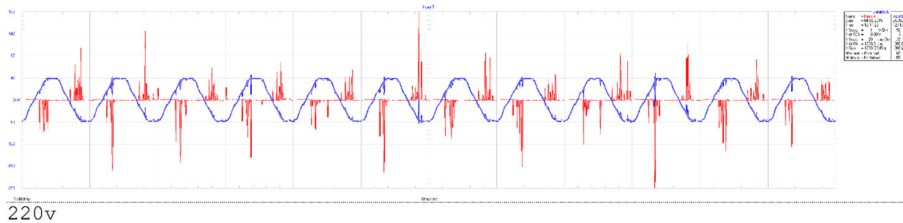
в)



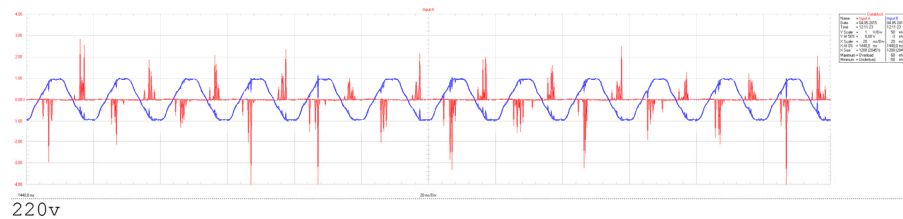
г)



д)

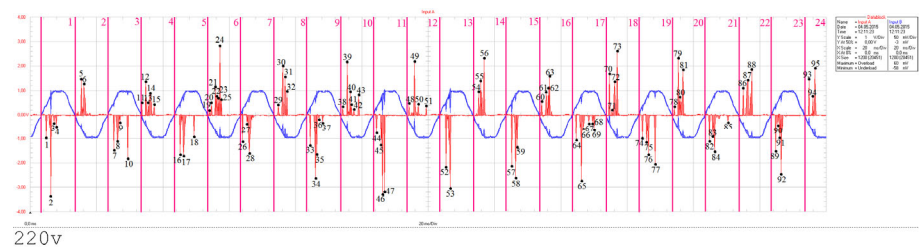


е)

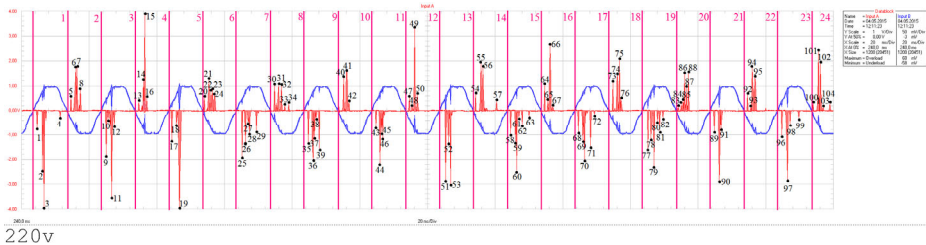


ж)

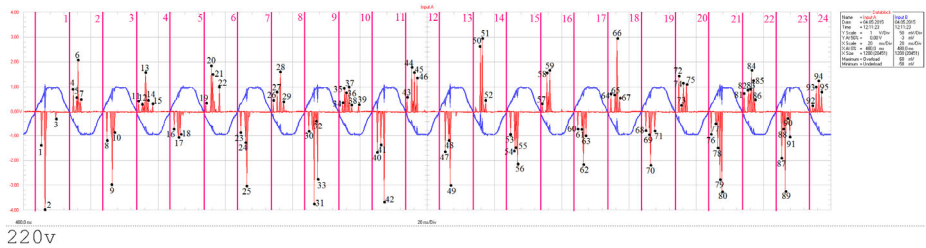
Рисунок 13 – Диаграммы напряжения и тока (продолжение)



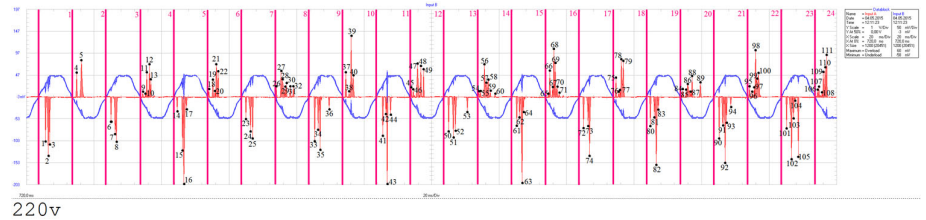
а)



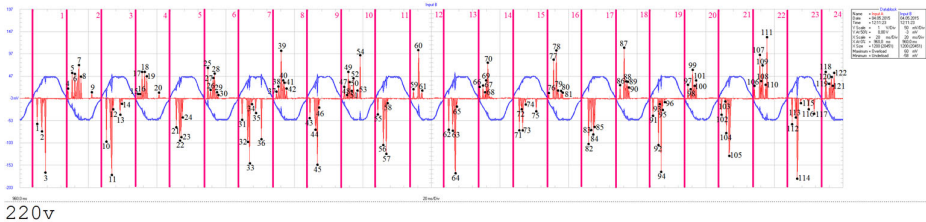
б)



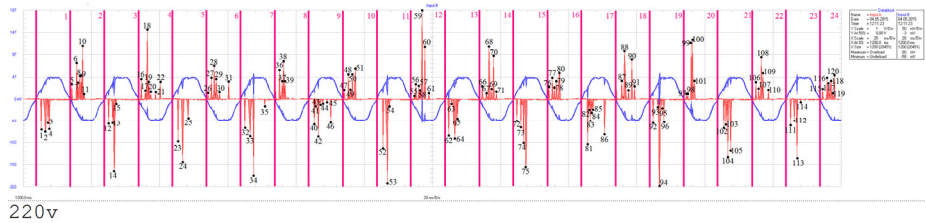
в)



г)

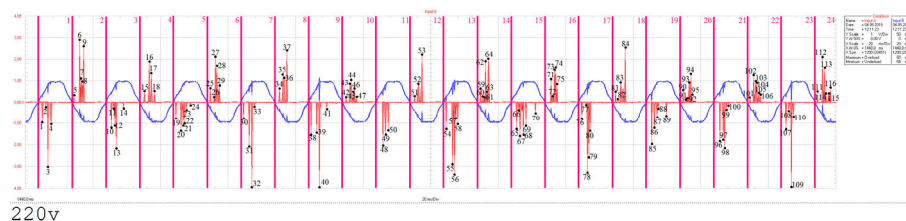


д)



е)

Рисунок 13 – Диаграммы напряжения и тока (продолжение)



ж)

Рисунок 13 – Диаграммы напряжения и тока (окончание)

С целью формирования пакета рекомендаций для разработки датчика тока частичных разрядов выполнены следующие экспериментальные исследования с последующей графо – аналитической обработкой полученных экспериментальных результатов:

- на лабораторном стенде получены осциллограммы тока протекающего через изолятор и напряжения на нём;
- средствами графического редактора и программного приложения к осциллографу фирмы FLUKE определены временные и амплитудные параметры выборок;
- средствами табличного редактора Excel созданы массивы для каждой выборки, где учитывались амплитудные и временные параметры ЧР в рамках каждого интервала для всей выборки;
- с использованием численных методов, а также табличных и графических редакторов созданы зависимости плотности распределения энергетических характеристик ЧР.

Определение плотности распределения ЧР относительно одного периода напряжения на изоляторе реализовывалось следующим образом (рисунок 14): параметры выборок представлены в таблице 8.

Целью анализа выборок является определения необходимого и достаточного количества секторов для построения зависимости плотности распределения ЧР.

Выборки можно условно разделить на большие и малые, так как в математической статистике используются различные подходы в зависимости от объёма выборки. Считается, что выборки объёма больше 30 можно отнести к большим. В связи с тем, что в каждой из анализируемых выборок не меньше 95 импульсов ЧР все выборки можно отнести к классу больших.

Целью анализа выборок является определения необходимого и достаточного количества секторов для построения зависимости плотности распределения ЧР.

Выборки можно условно разделить на большие и малые, так как в математической статистике используются различные подходы в зависимости от объёма выборки. Считается, что выборки объёма больше 30 можно отнести к большим. В связи с тем, что в каждой из анализируемых выборок не меньше 95 импульсов ЧР все выборки можно отнести к классу больших.

Формирование выборок соответствует районированному типу. В случае неоднородной генеральной совокупности, прежде, чем использовать вероятностную выборку с любой техникой отбора, рекомендуется разделить

генеральную совокупность на однородные части, такая выборка называется районированной.

Таблица 8 – Характеристики выборок

№ выборки	1	2	3	4	5	6	7
Временной интервал выборки, мс	0–240	240–480	480–720	720–960	960–1200	1200–1440	1440–1680
Количество секторов	23	23	23	23	23	23	23
Количество импульсов в выборке	95	104	95	111	122	120	116

Группами районирования могут выступать как естественные образования (например, диаграммы ограниченные возможностями индикационной техники), так и любой признак, заложенный в основу исследования. Признак, на основе которого осуществляется разделение, называется признаком расслоения и районирования. Также при формировании выборок использовался стратометрический отбор – с выделением секторов заданным временным интервалом. При данном способе формирования выборки генеральная совокупность делится на выборки, обладающие определёнными характеристиками (диапазон анализируемой амплитуды, временные интервалы), и отбираются ЧР с соответствующими характеристиками.

1. Форматирование осциллограмм осуществлялось по следующему алгоритму:

- разделение осциллограмм по секторам (каждый сектор соответствует одному полупериоду напряжения промышленной частоты с последующей их нумерацией) причём нечётные нумерация секторов соответствуют положительным полуволнам переменного напряжения промышленной частоты, а чётная – отрицательным.

- последовательная слева направо сквозная, в рамках одной осциллограммы, нумерация анализируемых импульсов ЧР. Анализировались осциллограммы амплитудой 1:10 относительно максимальной амплитуды ЧР.

2. Определение достаточности количества обрабатываемых осциллограмм одинаковой продолжительностью (Программное обеспечение осциллографа FLUKE позволяет формировать осциллограммы максимальной продолжительностью 240 мс (при масштабе по времени 20 мс/кл), что соответствует 12 периодам напряжения частотой 50 Гц) с последующим графоаналитическим обобщением частичных разрядов в рамках одного периода напряжения.

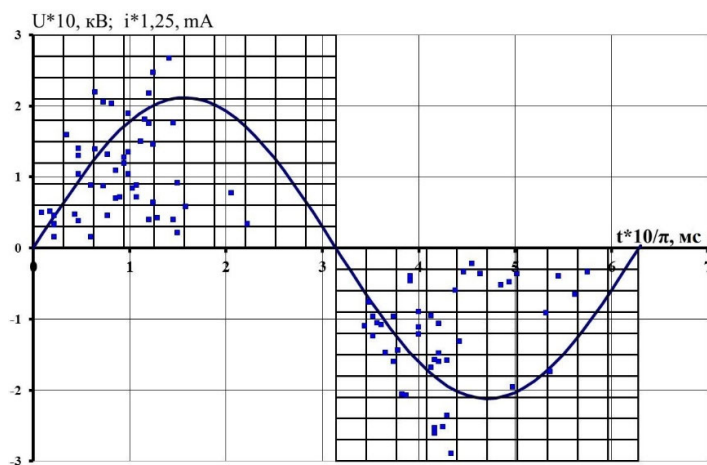
Получая графически представленные зависимости распределения в рамках одного периода напряжения для одной осциллограммы для двух осциллограмм и т. д. с последующим сравнением нормированных и приведённых зависимостей.

В том случае когда закон распределения последующей выборки осциллограмм относительно предыдущей будет отличаться менее чем на 10% тогда можно считать количество обрабатываемых осциллограмм достаточным.

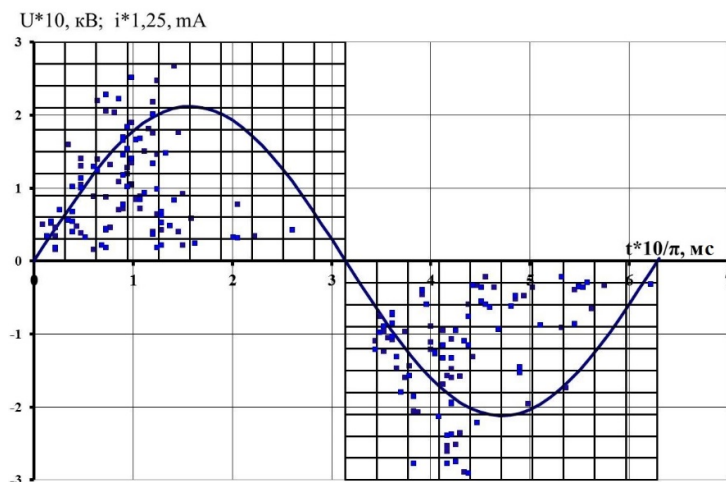
Следующим этапом все пронумерованные импульсы ЧР, в рамках одной осциллограммы, сконфигурированы относительно одного полного периода напряжения на изоляторе. Результаты для семи осциллограмм представлены на рисунке 14.

Исследование вероятностных характеристик ЧР относительно диаграммы напряжения на изоляторе осуществлялось по следующему алгоритму:

1. Определены временные интервалы появления импульсов ЧР относительно каждой полуволны диаграммы напряжения на изоляторе.
2. Определена максимальная амплитуда импульсов ЧР, анализируемых осциллограмм.

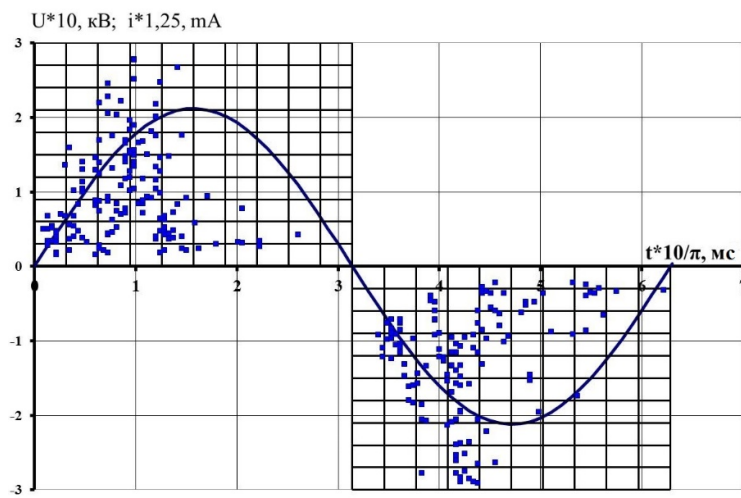


а) Осциллограмма для одного периода напряжения

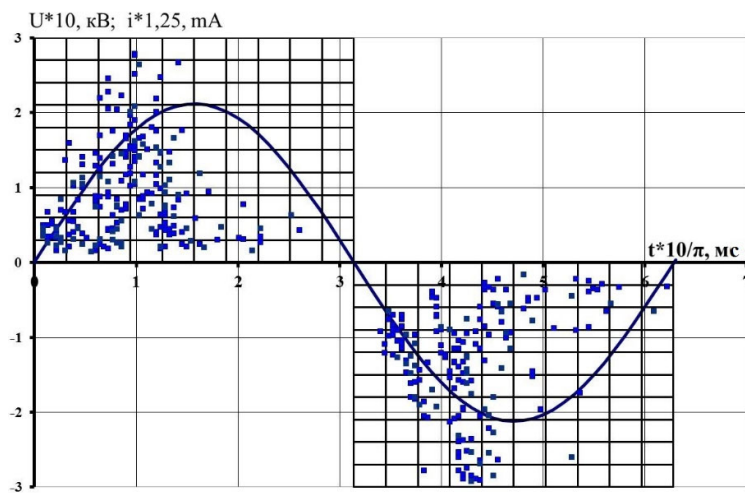


б) Осциллограммы для двух периодов напряжения

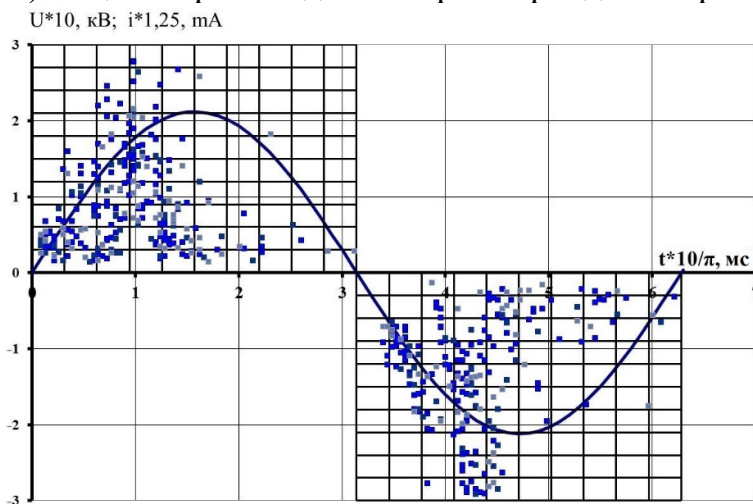
Рисунок 14 – Распределение импульсов ЧР относительно напряжения на изоляторе (начало)



в) Осциллограммы для трех периодов напряжения

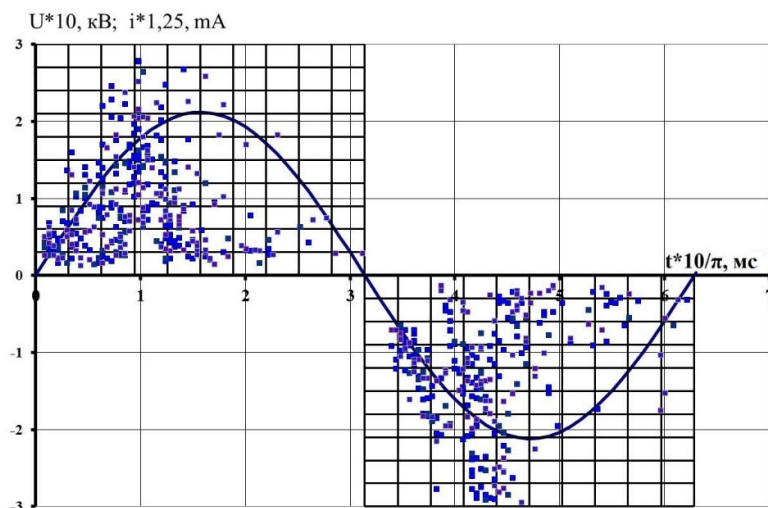


г) Осциллограммы для четырех периодов напряжения

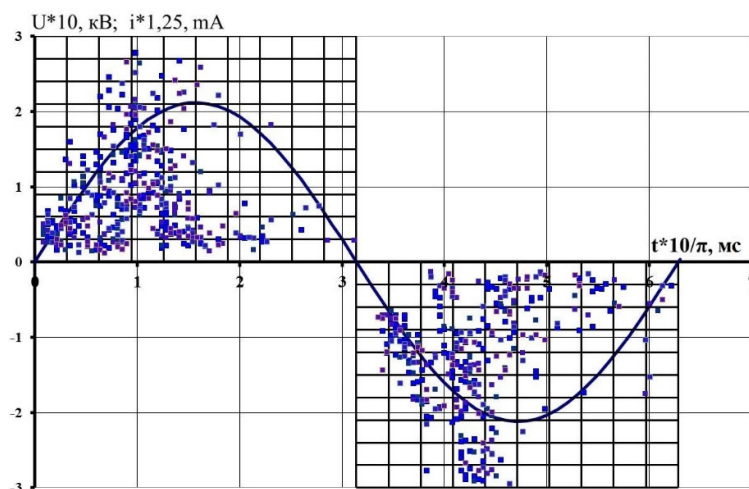


д) Осциллограммы для пяти периодов напряжения

Рисунок 14 – Распределение импульсов ЧР относительно напряжения на изоляторе (продолжение)



е) Осциллограммы для шести периодов напряжения



ж) Осциллограммы для семи периодов напряжения

Рисунок 14 – Распределение импульсов ЧР относительно напряжения на изоляторе (окончание)

3. Определены граничные значения, анализируемого пространства прямоугольной формы, для каждой полувольты напряжения на изоляторе (по вертикали граничное значение определяется величиной максимального значения по модулю амплитуды ЧР, а по горизонтали – интервалом временем каждой полувольты напряжения на изоляторе).

4. Анализируемое пространство по вертикали и горизонтали разбиты на десять одинаковых интервалов (количество интервалов по горизонтали и вертикали определяется 10%-ой ошибкой, величина которой была выбрана из соображений качественной оценки результатов экспериментальных исследований).

5. Составляется матрица десять на десять секторов анализируемого пространства для положительной и отрицательной полувольты напряжения на изоляторе. Каждый член матрицы характеризуется суммарным значением количества импульсов ЧР, амплитудные значения которых и временные

характеристики соответствуют i, j сектору.

6. Суммарная токовая характеристика каждого сектора, определяются из выражения

$$I_{ij\Sigma} = \sum_1^n I_{An}, \quad (14)$$

где: $I_{ij\Sigma}$ – суммарное значение тока каждого сектора; n – количество импульсных разрядов, соответствующих ij сектору; I_{An} – амплитудное значение тока частичного разряда.

7. Численное значение суммарной токовой характеристики i –го столбца, анализируемого пространства, определяется из выражения

$$I_{i\Sigma} = \sum_1^i I_{Aj}, \quad (15)$$

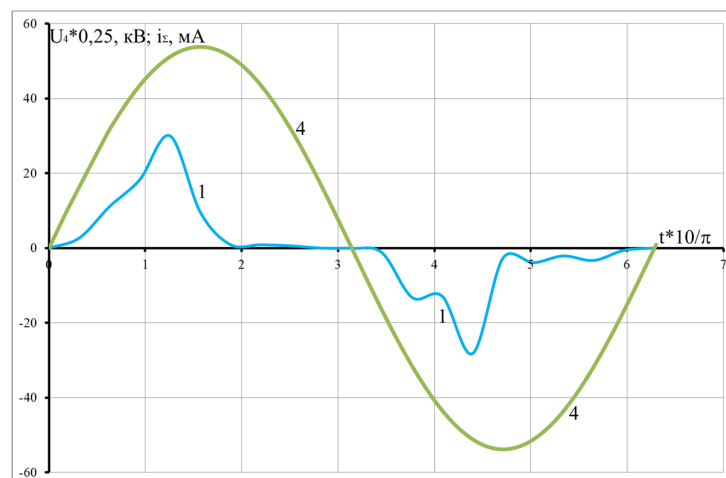
где: $I_{i\Sigma}$ – суммарное значение тока каждого i –го столбца; i – количество столбцов в анализируемом пространстве; I_{Aj} – амплитудное значение тока частичного разряда j –го сектора в i – том столбце.

В результате определения суммарных значений ЧР каждого столбца (пункты 6, 7), формируется в табличной форме зависимость, характеризующая плотность распределения импульсов ЧР в функции времени для каждой полуволны напряжения на изоляторе.

8. Выполняется построение последовательности выборок, начиная с одной осциллограммы №1; во второй выборки осуществляется сложение амплитудно временных характеристик ЧР осциллограмм №1 и №2 и т. д. Последняя выборка №7 представляет собой сумму амплитудно временных характеристик ЧР осциллограмм №1 ÷ №7.

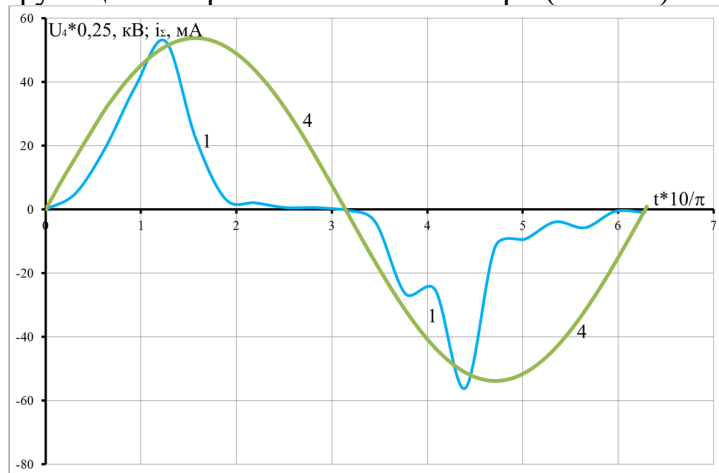
9. Определяется достаточность количества обрабатываемых осциллограмм длительностью 240 мС путём определения относительной ошибки таблично заданной зависимости плотности распределения импульсов ЧР по отношению к выборке состоящей из 7 осциллограмм (рисунок 15).

Зависимости распределения суммарного значения ЧР ($I_{i\Sigma}$) в функции времени относительно диаграммы напряжения прикладываемого к изолятору были построены с использованием табличного редактора Excel и представлены на рисунке 15.

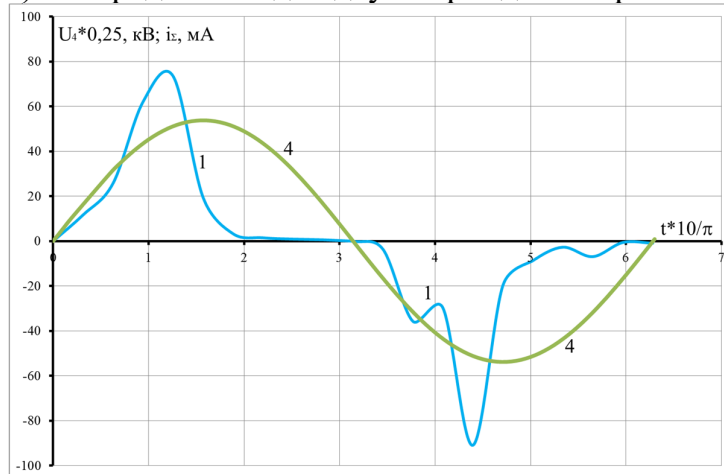


а) Распределение для одного периода напряжения

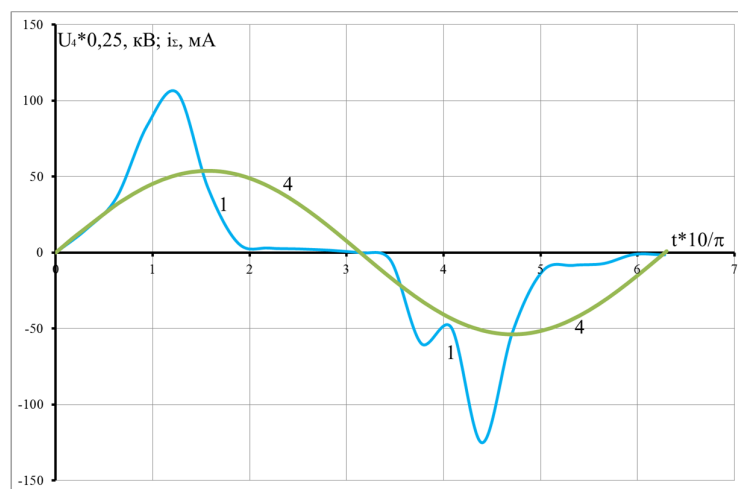
Рисунок 15 – Зависимость плотности распределения токов ЧР (ПРТЧР) в функции напряжения на изоляторе (начало)



б) Распределение для двух периодов напряжения

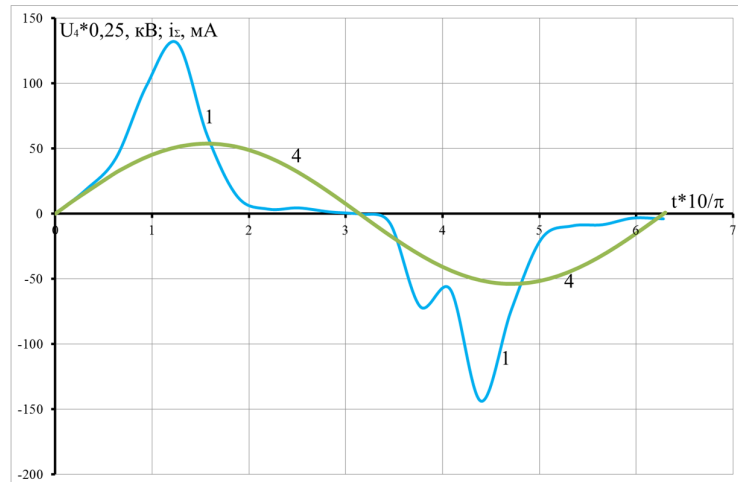


в) Распределение для трех периодов напряжения

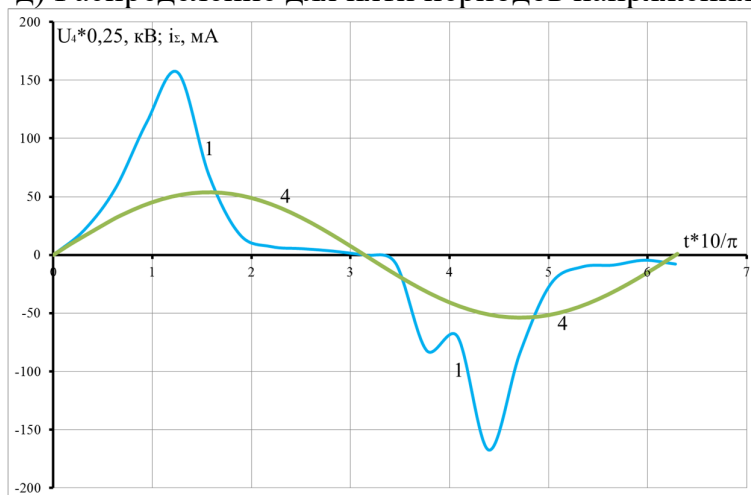


г) Распределение для четырех периодов напряжения

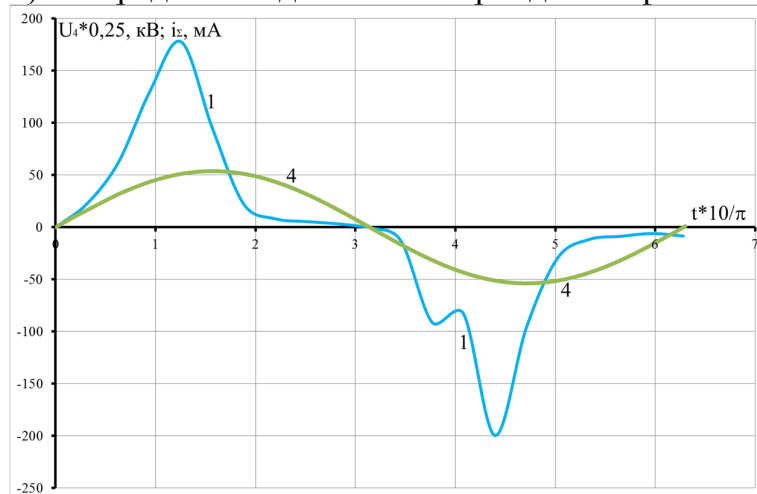
Рисунок 15 – Зависимость плотности распределения токов ЧР (ПРТЧР) в функции напряжения на изоляторе (продолжение)



д) Распределение для пяти периодов напряжения



е) Распределение для шести периодов напряжения



ж) Распределение для семи периодов напряжения

Рисунок 15 – Зависимость плотности распределения токов ЧР (ПРТЧР) в функции напряжения на изоляторе (окончание)

Максимальное значение плотности распределения импульсов ЧР определяемое из выражения 14 с увеличением количества осциллограмм возрастает. Этот факт объясняется увеличением количества учитываемых ЧР в i – том столбце. Максимальное значение ПРТЧР, соответствующее отрицательной полуволне напряжения, на 10% больше чем максимальное значение ПРТЧР, соответствующее положительной полуволне напряжения. Зависимость ПРТЧР, соответствующее положительной полуволне напряжения имеет один экстремум, а зависимость ПРТЧР, соответствующее отрицательной полуволне напряжения имеет два экстремума.

С целью оценки достаточности обрабатываемых осциллограмм, необходимо выполнить приведение функции $i_{i\Sigma}$ ПРТЧР для зависимостей (рисунок 15 – а÷е), соответствующее положительной полуволне напряжения, к максимальному значению зависимости семи осциллограмм (рисунок 15 – ж). Для отрицательной полуволны приведение текущего значения ПРТЧР для зависимостей выполняется относительно максимального значения зависимости семи осциллограмм (рисунок 15 – ж) соответствующее отрицательной полуволне.

$$\begin{aligned} i_{i\Sigma}^{*+} &= i_{i\Sigma}^{+} * K_{\Sigma}^{+}, \\ K_{\Sigma}^{+} &= \frac{i_{n,max}^{+}}{i_{7,max}^{+}}, \\ i_{i\Sigma}^{*-} &= i_{i\Sigma}^{-} * K_{\Sigma}^{-}, \\ K_{\Sigma}^{-} &= \frac{i_{n,max}^{-}}{i_{7,max}^{-}}. \end{aligned} \quad (16)$$

где: $i_{i\Sigma}^{*+}$, $i_{i\Sigma}^{*-}$ – нормированные суммарные значения ЧР для положительной и отрицательной полуволн напряжения прикладываемых к изолятору соответственно; $i_{i\Sigma}^{+}$, $i_{i\Sigma}^{-}$ – суммарное значение тока для положительной и отрицательной полуволн напряжения соответственно; $i_{n,max}^{+}$, $i_{n,max}^{-}$ – максимальные значения ЧР для n – обработанных осциллограмм ($n = 1 \div 6$); $i_{7,max}^{+}$, $i_{7,max}^{-}$ максимальные значения ЧР для семи обработанных осциллограмм.

Численные значения коэффициентов нормирования для положительной и отрицательной полуволн напряжения на изоляторе представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Коэффициенты нормирования

№ осциллограммы	полупериод	1/7	2/7	3/7	4/7	5/7	6/7	7/7
Значение коэффициента приведения *	положительный	5,92	3,36	2,42	1,69	1,35	1,13	1
	отрицательный	7,07	3,56	2,19	1,59	1,38	1,19	1

* Максимальные значения $i_{i\Sigma}$ ПРТЧР (рисунок 15 – ж).
– 177,6 (положительный полупериод)

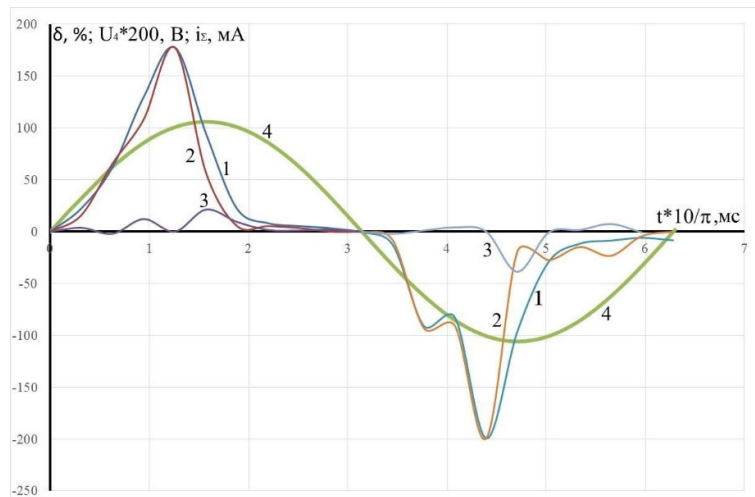
–199,5 (отрицательный полупериод)

Относительная ошибка вычислялась из выражений

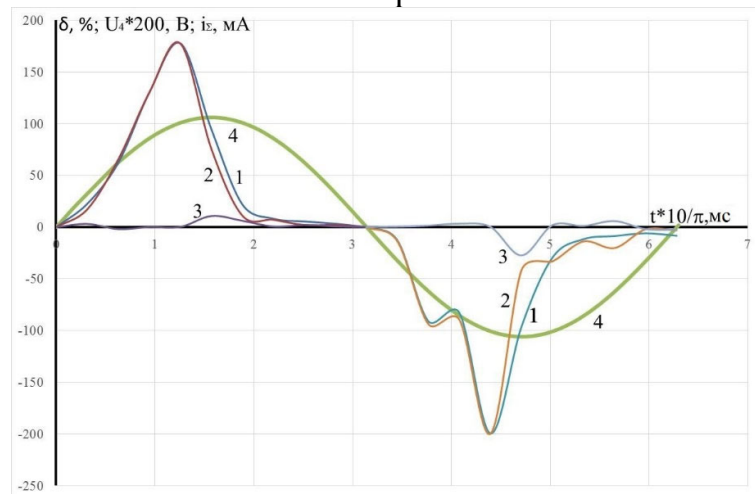
$$\delta = \frac{i_{i\Sigma}^{*+} - i_{7,max}^{+}}{i_{7,max}^{+}} * 100\%;$$

$$\delta = \frac{i_{i\Sigma}^{*-} - i_{7,max}^{-}}{i_{7,max}^{-}} * 100\%;$$
(17)

Зависимости ПРТЧР для оценки достаточности количества обрабатываемых осциллограмм и текущее значение ошибки представлены на рисунке 16.

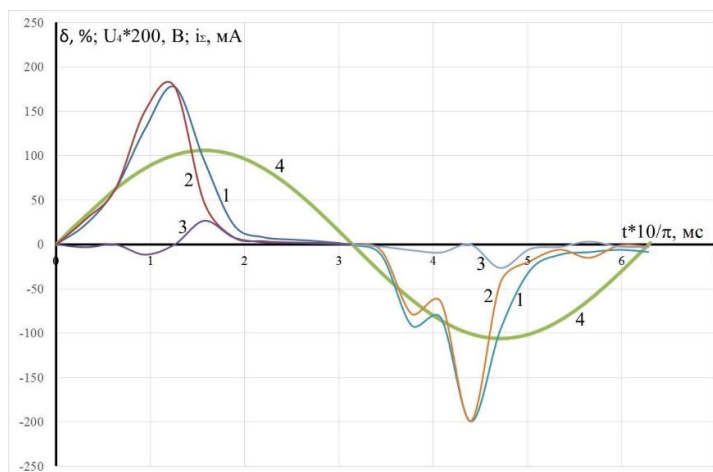


а) выборка распределения плотности ЧР для одного периода напряжения

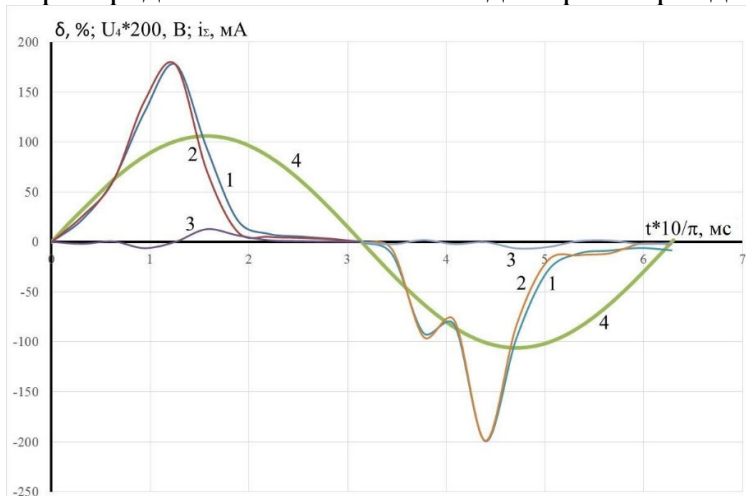


б) выборка распределения плотности ЧР для двух периодов напряжения

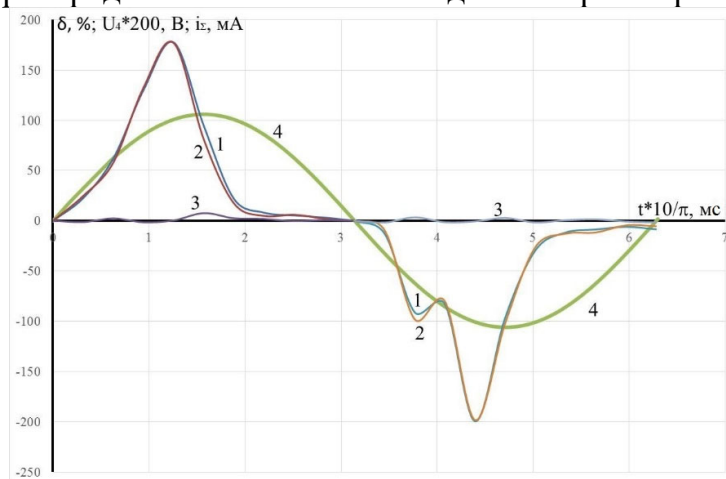
Рисунок 16 – Приведённые зависимости плотности распределения ЧР, где:
 1 – выборка распределения плотности ЧР для семи осциллограмм, 2 – выборка распределения плотности ЧР для шести осциллограмм, 3 – зависимость относительной ошибки в функции времени, 4 – диаграмма напряжения прикладываемого к изолятору (начало)



в) выборка распределения плотности ЧР для трех периодов напряжения



г) выборка распределения плотности ЧР для четырех периодов напряжения



д) выборка распределения плотности ЧР для пяти периодов напряжения

Рисунок 16 – Приведённые зависимости плотности распределения ЧР, где:
 1 – выборка распределения плотности ЧР для семи осциллограмм, 2– выборка
 распределения плотности ЧР для шести осциллограмм, 3 – зависимость
 относительной ошибки в функции времени, 4 – диаграмма напряжения
 прикладываемого к изолятору (продолжение)

экспериментальных исследований предложены следующие рекомендации:

Определение интегральной величины токов частичных разрядов подвесных изоляторов должно осуществляться с использованием информации токов частичных разрядов из временной области, соответствующей отрицательной полуволне напряжения, что позволит снизить ошибку, расширить диапазон индикации параметра и сократить время установления показания выходного параметра [125].

Таблица 10 – Максимальное значение ошибки зависимостей плотности распределения ЧР

Приведение зависимостей	1/7	2/7	3/7	4/7	5/7	6/7
	Ошибка в процентах					
Положительная полуволна напряжения	21,27	10,7	26,7	12,7	7,66	9,56
Отрицательная полуволна напряжения	7,33	5,81	3,21	1,87	2,78	2,01

В графической форме зависимость ошибки представлена на рисунке 17.

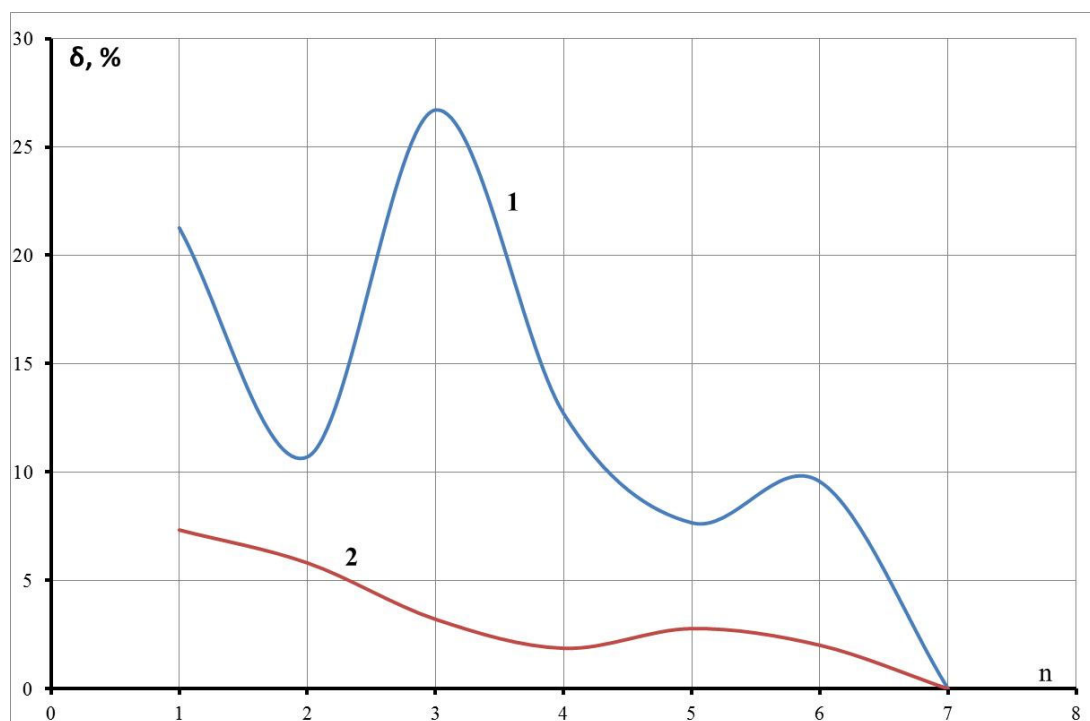


Рисунок 17 – Относительная ошибка для положительной и отрицательной полуволны напряжения на изоляторе, где 1–ошибка соответствующая, положительной полуволне напряжения; 2– ошибка соответствующая, отрицательной полуволне напряжения

3.4 Выводы

В ходе экспериментальных исследований был разработан лабораторный стенд подвесного изолятора, сняты осциллограммы напряжения и тока утечки с дальнейшей обработкой в графическом редакторе Paint Brush, проведен их анализ в табличном редакторе MS Excel, который позволил создать базы данных динамических характеристик токов частичных разрядов и нормировать графики с расчетом относительной ошибки для положительной и отрицательной полуволн напряжения, благодаря которым были получены рекомендации для аппаратной части датчика тока утечки.

Определение плотности распределения ЧР относительно одного периода напряжения на изоляторе реализовывалось согласно параметрам выборок. Форматирование, определение достаточности количества обрабатываемых осциллограмм и исследование вероятностных характеристик ЧР относительно диаграммы напряжения на изоляторе осуществлялось по предложенным алгоритмам.

Частота следования ЧР имеет вероятностный характер. В результате экспериментальных исследований установлено группирование импульсов ЧР в области первого и третьего квадрантов гармонической составляющей переменного напряжения на зажимах изолятора.

Схожие результаты можно увидеть в работах других исследователей [88, 91].

Установлено, для разработки конструкции датчика токов утечки следует учитывать, что определение интегральной величины токов частичных разрядов подвесных изоляторов должно осуществляться с использованием информации токов частичных разрядов из временной области, соответствующей отрицательной полуволне напряжения, что позволит снизить ошибку, расширить диапазон индикации параметра и сократить время установления показания выходного параметра.

4 ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ С КОНТРОЛЬНО-ИНДИКАЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

4.1 Основные этапы проектирования радиоэлектронного оборудования

Разработка и запуск в производство нового изделия должны начинаться с анализа потребностей общества, а также оценки имеющихся технико-экономических возможностей. Создаваемая продукция по своему техническому уровню и качеству обязана соответствовать лучшим отечественным и мировым достижениям либо превосходить их. Это позволяет обеспечить конкурентоспособность как на внутреннем, так и на внешнем рынках, а также добиться экономической эффективности.

Проектирование начинается с определения основного научно-технического направления и составления плана работ в соответствии с ГОСТ 2.103–68. Общая структура и взаимосвязь этапов проектирования представлены на рисунке 18.

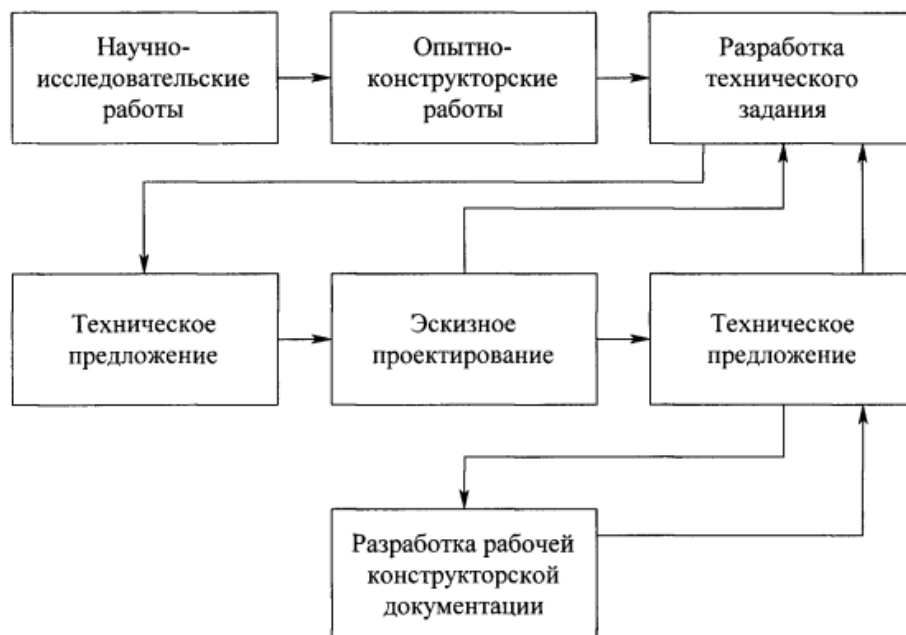


Рисунок 18 – Последовательность проведения проектно-конструкторских работ

Первым этапом создания новых образцов радиоэлектронной техники являются научно-исследовательские работы (НИР). Их основная цель — установить принципиальную возможность разработки изделия с заданными характеристиками и оценить его экономическую целесообразность. В ходе НИР формируются научно обоснованные данные для составления технического задания, проводится предварительная теоретическая и эксплуатационная проработка алгоритмов функционирования изделия и принципов его построения.

НИР включает несколько этапов: разработку технического задания, выбор направления исследований, проведение теоретических и экспериментальных работ, а также анализ и оценку полученных результатов. Итоги НИР должны обеспечивать возможность создания изделий высокого технического уровня с учетом перспектив развития, рационального использования ресурсов и энергетической эффективности.

Для выбора наиболее эффективных решений по результатам НИР могут выполняться опытно–конструкторские работы (ОКР), представляющие собой переход от теоретических результатов к их инженерной реализации. Цель ОКР — проверить возможность практического внедрения разработанных решений с использованием существующих технологий и оценить их эффективность.

Техническое задание формируется на основе проведенных исследований и должно содержать полный набор требований к будущему изделию, не ограничивая при этом инициативу разработчика. В нем указываются назначение изделия, условия его эксплуатации, хранения и транспортировки, основные технические и конструктивные характеристики, требования к надежности, стоимости, элементной базе, а также к условиям внешней среды и источникам питания.

Техническое предложение представляет собой комплект конструкторских документов, содержащих обоснование целесообразности разработки изделия на основе анализа требований заказчика и возможных вариантов решений. Его целью является проверка реализуемости основных положений технического задания как теоретически, так и экспериментально.

На данном этапе выполняются дополнительные расчеты и исследования, позволяющие оценить техническую и экономическую эффективность разработки. Эти работы могут проводиться как силами самой организации, так и с привлечением сторонних специалистов и профильных предприятий. Результатом являются документы, перечень которых определяется техническим заданием.

Эскизный проект включает в себя конструкторские документы, отражающие основные конструктивные решения, принцип работы изделия, его назначение, параметры и габариты. Основная цель этого этапа — подтвердить работоспособность заложенной идеи и проверить ключевые конструктивные и технологические решения.

В процессе эскизного проектирования формируются структурная и функциональная схемы, разрабатывается первоначальный вариант принципиальной электрической схемы, определяется элементная база и конструкция печатных плат. На основе схемы создается лабораторный макет изделия, при этом используются уже имеющиеся элементы и узлы.

Макет может выполняться как с корпусом, так и без него. Его основное назначение — проверка компоновочных решений и работоспособности изделия. На этом этапе уточняются габариты, масса и варианты размещения изделия. Также разрабатываются чертежи общего вида, габаритные схемы и схемы монтажа.

На стадии технического проектирования окончательно формируется

принципиальная электрическая схема и разрабатывается полная конструкция изделия. На основе конструкторской документации изготавливаются опытные образцы и создаются технологические процессы производства с учетом его типа.

Особое внимание уделяется технологичности конструкции, вопросам стандартизации, унификации, надежности, ремонтпригодности и возможности восстановления изделия. Конструкция также адаптируется под предполагаемый тип производства, так как требования к массовому и мелкосерийному производству существенно различаются.

Изготовленные макеты проходят полный цикл заводских испытаний. В процессе их изготовления и тестирования выявляются и устраняются ошибки конструкторской документации, а также выполняются необходимые доработки.

4.2 Методы проектирования радиоэлектронного оборудования

Проектирование радиоэлектронного оборудования (РЭО) представляет собой совокупность инженерных решений, направленных на создание устройства, удовлетворяющего заданным техническим, эксплуатационным, экономическим и конструктивным требованиям.

К основным требованиям, предъявляемым к РЭО, относятся: соответствие техническому заданию; обеспечение надёжности и долговечности; технологичность изготовления; ремонтпригодность; электромагнитная совместимость (ЭМС); минимальные габариты и масса; экономическая эффективность.

Выбор метода проектирования оказывает существенное влияние на конструкцию изделия, его стоимость, удобство эксплуатации и модернизации.

Методы проектирования оборудования: блочный, модульный, функционально–узловой, интегральный (микросхемный) и системный (комплексный).

Блочный метод основан на разделении аппаратуры на функционально законченные блоки, каждый из которых выполняет самостоятельную функцию и конструктивно оформляется как отдельный узел.

Типовая структура данного метода включает: блок питания; усилительный блок; блок обработки сигнала; блок управления; блок индикации и контроля.

Связь между блоками осуществляется посредством кабельных соединений и разъёмов.

К преимуществам блочного метода относят: упрощение разработки и наладки; удобство локализации неисправностей; возможность замены блока без разборки всего устройства; параллельная разработка отдельных частей.

К недостаткам относят: увеличение габаритов и массы; наличие большого количества межблочных соединений; снижение общей плотности монтажа; увеличение себестоимости.

Блочный метод широко применяется в промышленной и военной аппаратуре, измерительных приборах и радиостанциях.

Модульный метод предусматривает построение аппаратуры из

унифицированных стандартных модулей, выполненных по единым конструктивным и электрическим требованиям.

Модули обладают взаимозаменяемостью и могут использоваться в различных изделиях.

Основные принципы этого метода: стандартизация габаритов; унификация интерфейсов; типизация схемных решений; повторяемость конструкции.

Преимущества метода: сокращение сроков проектирования; снижение затрат при серийном производстве; упрощение модернизации; повышение технологичности.

Недостатки метода: возможная функциональная избыточность; ограниченная оптимизация под конкретную задачу; зависимость от принятых стандартов.

Данный метод применяется в автоматизированных системах управления, вычислительной технике и телекоммуникационном оборудовании.

Функционально–узловой метод предполагает разделение устройства на функциональные узлы без обязательной унификации и стандартизации. Каждый узел разрабатывается индивидуально в соответствии с требованиями конкретного проекта.

Преимущества данного метода: высокая гибкость проектирования; возможность оптимизации параметров; уменьшение габаритов по сравнению с блочным методом.

Недостатки данного метода: усложнение ремонта; снижение взаимозаменяемости; повышенные требования к производству.

Используется при разработке специализированной аппаратуры, научных приборов и опытных образцов.

Сущность метода интегральный метод предусматривает максимальную степень интеграции элементов с использованием: интегральных микросхем; микромодулей; систем на кристалле. Функциональные элементы объединяются в пределах одного полупроводникового кристалла.

Преимущества данного метода: минимальные габариты и масса; высокая надёжность; снижение энергопотребления; высокая плотность монтажа.

К недостаткам относят: высокая стоимость разработки; сложность ремонта; ограниченные возможности модернизации.

Интегральный метод применяется в мобильной, бортовой и бытовой электронике, а также в радиочастотных устройствах.

Системный метод основан на комплексном подходе к проектированию с учётом: тепловых режимов; механических нагрузок; электромагнитной совместимости; надёжности; условий эксплуатации. Применяются методы математического моделирования и автоматизированного проектирования.

Преимущества системного метода являются: оптимизация параметров изделия; повышение надёжности; соответствие нормативной документации; повышение эффективности работы системы в целом.

Недостатки: высокая трудоёмкость, значительные временные затраты, необходимость высокой квалификации специалистов.

Системный метод используется при разработке сложных радиоэлектронных

комплексов, авиационной и космической техники.

Анализ показывает, что выбор метода проектирования определяется назначением изделия, требованиями к габаритам, надёжности, стоимости и условиям эксплуатации. Блочный и модульный методы обеспечивают высокую ремонтпригодность. Интегральный метод позволяет минимизировать размеры устройства. Функционально–узловой метод обеспечивает гибкость разработки. Системный метод является наиболее современным и применяется при создании сложных комплексов.

4.3 Структурная схема датчика тока утечки подвесных изоляторов

Разработка технических требований к локальной системе конструктивно расположенной в рамках одной опоры высоковольтных воздушных линий электропередач с напряжением 500 кВ.

Технические требования к локальной системе:

Электронные части подсистем сбора обработки и передачи телеметрической информации, блок питания локальной системы, подсистемы контроля токов утечки подвесных изоляторов токоведущих проводов ЛЭП – должны быть конструктивно расположены и закреплены в области верхней части опор высоковольтных линий электропередач и обеспечивать устойчивую работу в полевых условиях. Информация с исследуемых опор должна поступать в центр сбора и обработки сохранения и визуализации информации (ЦСОИ). Передача телеметрической информации с исследуемых опор ЛЭП на ЦСОИ должна передаваться с использованием каналов сотовой связи.

Локальная система, размещаемая в верхней части опоры, должна обеспечивать: текущий контроль токов частичных разрядов и объёмных токов подвесных изоляторов трёх фаз в рамках одной опоры; передачу информации с каждой опоры на диспетчерский пункт средствами комбинированных каналов связи (связь по радиоканалу, сотовая связь и интернет технологии). Локальная система должна быть укомплектована блоком питания, который получает наведённую энергию в грозотросе.

К первичному преобразователю комбинированного датчика токов утечки подвесных изоляторов ЛЭП предъявляются следующие требования:

- чувствительный элемент датчика тока частичных разрядов должен иметь гальваническую развязку с элементами конструкции высоковольтных ЛЭП и монтироваться на опоре без демонтажа чувствительного элемента;
- параметры выходного сигнала датчика тока должны быть согласованы с параметрами входных цепей подсистемы телеметрии.

Требования к конструкции макета комбинированного датчика тока подвесных изоляторов, обеспечивающих крепление токоведущих проводов ЛЭП.

Подсистема визуализация контролируемых параметров располагается в помещении диспетчерской службы и должна состоять из персонального компьютера (HP TouchSmart 600–1420 ru).

Проектные работы, а также разработка комплекса в целом и его составных частей должны выполняться в соответствии с требованиями стандартов и другими источниками научно–технической информации [126 –139].

Иерархически комплекс сбора обработки и передачи информации с опор на диспетчерский пункт состоит из 4–х уровней.

Самый нижний, нулевой уровень комплекса позволяет с помощью датчиков контролировать параметры: токи утечки подвесных изоляторов, амплитуду вибраций опоры, а также диагностировать работоспособность датчиков.

На первом уровне в рамках каждой опоры осуществляется обработка и передача телеметрической информации с датчиков на локальную подсистему сбора и первичной обработки на опорах для последующей передачи её на диспетчерский пункт. Согласование параметров наведённой энергии в грозотросе с техническими характеристиками блока питания локальной системы.

На втором уровне комплекса решаются следующие задачи: передача информации с опор на диспетчерский пункт; систематическая диагностика телеметрического канала передачи информации; управление информационным потоком путём периодического опроса локальной подсистемы каждой опоры; в случае нарушения работы телеметрического канала осуществляется реализация повторной связи.

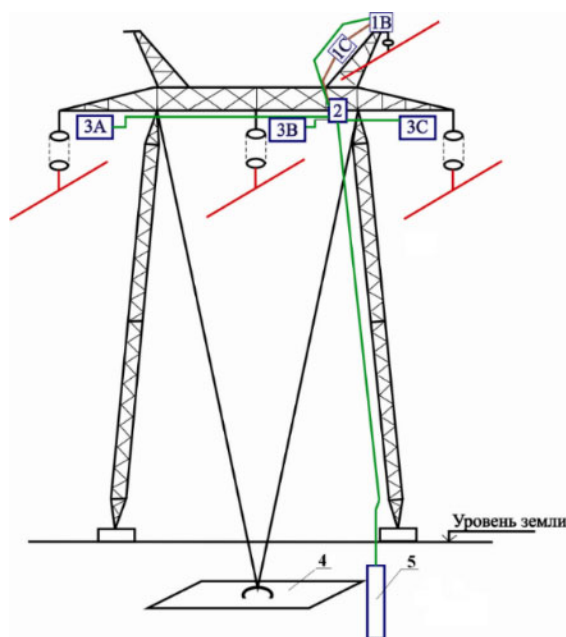
На верхнем, третьем уровне функционирования комплекса решается ряд ключевых задач. К ним относятся проверка достоверности поступающей информации, восстановление утраченных или искажённых данных, а также построение аппроксимирующих зависимостей развития аварийных ситуаций и формирование прогнозных моделей. Кроме того, осуществляется диагностика и локализация возникших аварий, а также своевременное оповещение дежурного диспетчера.

Помимо этого, на данном уровне ведётся журнал текущих данных, обеспечивается визуализация поступающей информации, её архивирование и хранение. Также разрабатываются алгоритмы и математические модели управления информационными потоками с учётом состояния контролируемого участка линии электропередачи.

Компоновка оборудования 0–го и 1–го уровней на опоре должно соответствовать структурной схеме, представленной на рисунке 19.

По устойчивости к воздействию температуры и влажности окружающей среды, атмосферного давления, синусоидальных вибраций, составные части комплекса, расположенные на опоре, должны соответствовать в части, относящейся к конструкции комплекса: ГОСТ 15150–69; ГОСТ 12997–84; ГОСТ 12997–84. Составные части первого и второго уровней комплекса должны соответствовать классу УХЛ 5. Исполнение по степени защиты от воздействия пыли и воды элементов конструкции комплекса, расположенных на опоре высоковольтных ЛЭП, должны иметь исполнение не хуже IP52 по ГОСТ 14254–96.

Конструктивно датчики фоновго тока и тока частичных разрядов объединены в одном корпусе комбинированного датчика тока.



1С – фильтр электропитания; 1В – устройство электрического подключения фильтра к грозотросу; 2 – блок электронный; 3А,3В,3С – датчики тока утечки штыревых изоляторов; 4 – железобетонная плита крепления тросовых оттяжек; 5 – катод

Рисунок 19 – Схема расположения оборудования на опоре

Комбинированный датчик тока утечки подвесного изолятора состоит из двух датчиков – датчик тока промышленной частоты и датчик токов частичных разрядов.

Датчик тока промышленной частоты выполнен по компенсационной схеме с отрицательной обратной связью, охватывающей первичный преобразователь Т1. Первичный преобразователь – трансформатор Т1 выполнен с использованием электротехнической стали, поэтому не пропускает высокочастотных помех. Первичный преобразователь датчика тока частичных разрядов Т2 выполнен на основе тороидального трансформатора без применения магнитного сердечника, что обеспечивает расширенный диапазон его частотной характеристики — от десятков килогерц до нескольких мегагерц. Данное конструктивное решение позволяет эффективно регистрировать высокочастотные составляющие сигналов частичных разрядов.

Выходные каскады датчиков (А6, А12) реализованы по схеме преобразования напряжения в ток, что повышает помехоустойчивость передачи измерительной информации и обеспечивает согласование с входными цепями контроллера А7. Ограничение максимально допустимого уровня сигнала, поступающего на входы контроллера, осуществляется с помощью резисторов R2 и R3.

Контроллер А7 функционирует в режиме периодического опроса датчиков с интервалом один час, что обеспечивает регулярный мониторинг состояния

контролируемых параметров и накопление диагностической информации.

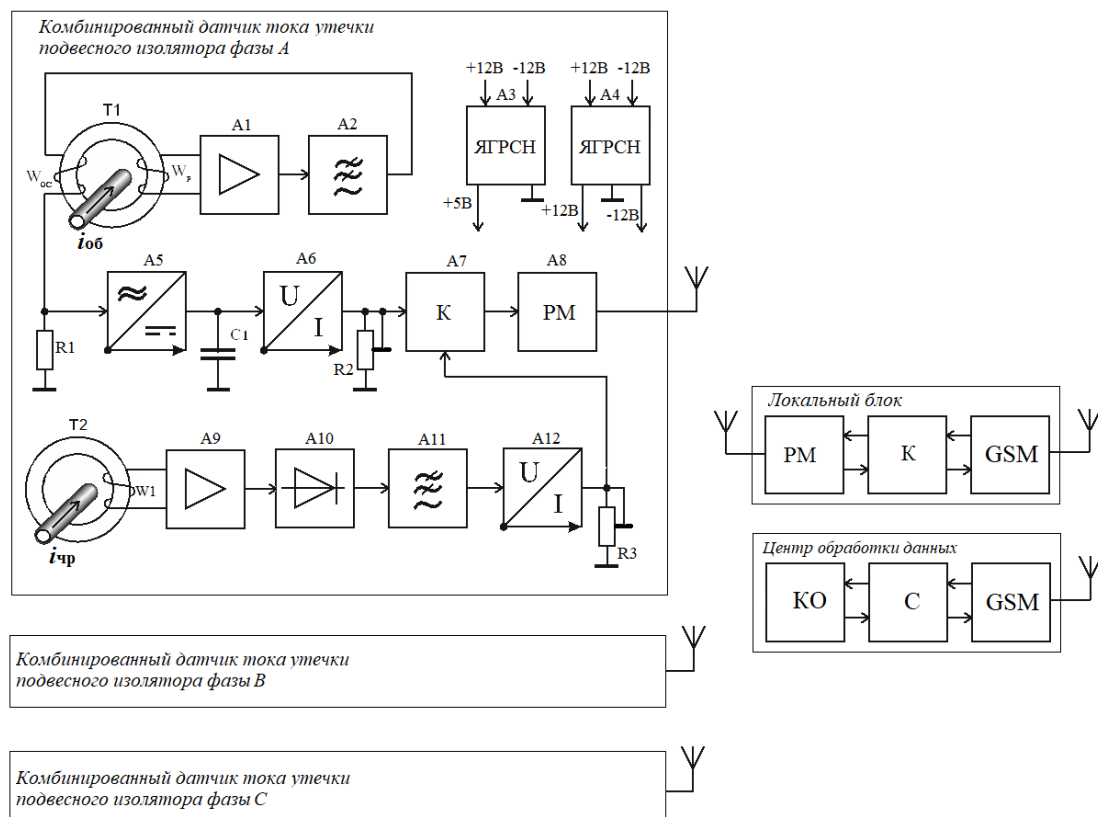


Рисунок 20 – Структурная схема системы диагностики

Информация с выхода контроллера А7 посредством радиомодема А8 передаётся на радиомодем (PM) локального блока. Далее телеметрическая информация с трёх комбинированных датчиков накапливается в контроллере (К) и один раз в сутки передаётся по GPS информационному каналу на сервер (С) центра обработки данных. На сервере выполняется подготовка данных для визуализации технических характеристик контролируемых элементов высоковольтных ЛЭП средствами компьютера оператора (КО).

Структурная схема датчика фонового тока промышленной частоты представлена на рисунке 21 [140].

Ток утечки подвесного изолятора I_p через обмотку W_p трансформатора Т1 поступает на вход усилителя А1 с дифференциальным входом, что позволяет минимизировать влияние электромагнитных полей токоведущих проводов высоковольтных ЛЭП. Основная гармоника промышленной частоты с выхода усилителя А1 поступает на вход фильтра нижних частот А2. Сигнал с выхода фильтра А2 через компенсационную обмотку W_{oc} поступает на резистор R1.

Гармонический сигнал с резистора R1 поступает на вход однополупериодного прецизионного выпрямителя А3. Сигнал с выхода блока А3 поступает на вход устройства «выборки – хранения» V1 – C1. Это обеспечивает преобразование сигнала с выхода однополупериодного выпрямителя в

аналоговый сигнал, пропорциональный амплитудному значению тока утечки. Для снижения влияния электромагнитных помех на выходной аналоговый сигнал он преобразуется в токовую форму в блоке А4.

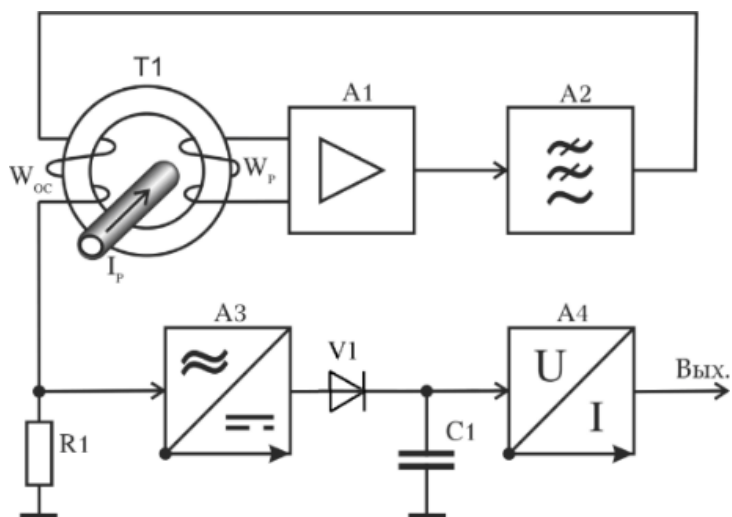


Рисунок 21 – Структурная схема датчика фоновых тока

Структурная схема датчика частичных разрядов представлена на рисунке 22.

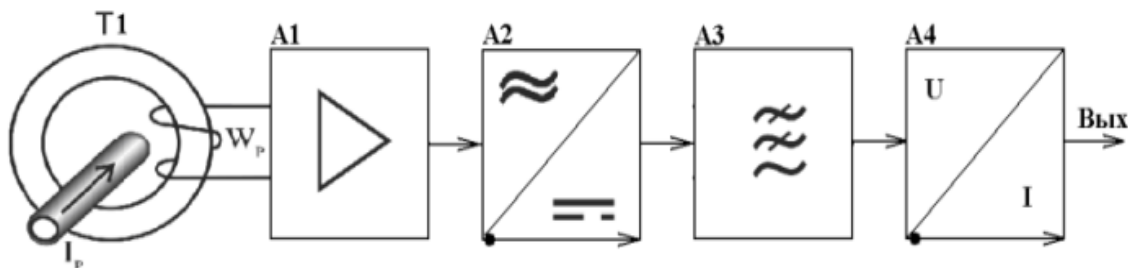


Рисунок 22 – Структурная схема датчика частичных разрядов

Первичный преобразователь Т1 выполнен на базе трансформатора с воздушным магнитопроводом. Блок А1 выполняет функции масштабирующего усилителя. Блок А2 выделяет положительную составляющую высокочастотного сигнала с выхода блока А1. В блоке А3 выделяется постоянная составляющая информационного сигнала. Оконечный каскад датчика блок А4 – аналоговый преобразователь напряжения в ток [141–142].

В соответствии со структурными схемами датчика фоновых тока и датчика частичных разрядов (рисунки 21 и 22) и с учётом эксплуатационных технологических требований разработаны принципиальные схемы.

Эскизный комплект конструкторской документации комбинированного датчика тока утечки подвесного изолятора представлен в приложении Б диссертационной работы

Таким образом, в рамках выполненного исследования сформированы научно обоснованные концептуальные положения, определяющие принципы

построения, архитектуру и состав технических решений комплекса удалённого мониторинга состояния элементов конструкций воздушных линий электропередач в процессе их эксплуатации. Разработанный комплекс базируется на применении интеллектуальных помехоустойчивых телеметрических систем, обеспечивающих диагностику и контроль токов утечки гирлянд высоковольтных изоляторов.

В ходе работы обоснованы и сформулированы технические требования к указанному комплексу, а также разработаны комплекты эскизной конструкторской документации на макетные образцы, что подтверждает практическую реализуемость предложенных решений и их направленность на повышение надёжности функционирования ЛЭП.

4.3 Выводы

Датчик предназначен для непрерывного мониторинга тока частичных разрядов подвесных высоковольтных изоляторов.

Техническим результатом является возможность текущего контроля состояния изоляторов с целью прогнозирования остаточного ресурса.

Технический результат достигается тем, что контроль величины тока частичных разрядов осуществляется в блоке, состоящем из первичного преобразователя, выполненного на базе трансформатора с воздушным магнитопроводом (пояс Роговского). Сигнал с обмотки трансформатора усиливается в усилителе с дифференциальным входом. В прецизионном выпрямителе выделяется постоянная составляющая высокочастотного сигнала положительной полярности. Фильтрация информационного сигнала реализуется низкочастотным фильтром второго порядка. В качестве выходного каскада используется преобразователь напряжения в ток. Посредством резистора сигнал масштабируется и согласуется с аналоговым входом контроллера.

Сбор, усреднение, первичная обработка информации, а также контроль работоспособности радиоканала осуществляется контроллером. Передача телеметрической информации осуществляется радиомодемом.

Предлагаемый датчик тока частичных разрядов не требует конструктивных изменений изолятора, технологически прост в изготовлении и позволит вести контроль тока частичных разрядов, даст возможность выявлять неисправные или требующие оперативной заблаговременной замены подвесные изоляторы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию и созданию методов контроля тока частичных разрядов подвесных изоляторов высоковольтных линий электропередач.

Решена актуальная научная проблема по исследованию и созданию системы диагностики бесперебойной работы подвесных изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередач.

Основные результаты диссертационной работы:

- обоснована актуальность исследования токов частичных разрядов;
- проведен обзор существующих методов контроля токов частичных разрядов и исследований в данной области;
- проведены теоретические исследования токов частичных разрядов;
- проведены экспериментальные исследования токов частичных разрядов (изготовлен лабораторный стенд, получены осциллограммы напряжения и тока на изоляторе);
- разработана схема замещения процессов протекания токов частичных разрядов на поверхности изолятора;
- разработана имитационная модель в пакете прикладных программ MATLAB;
- путём сравнения результатов стендовых и имитационных экспериментов выполнена оценка адекватности имитационной модели;
- выполнен спектральный анализ характеристик импульсов частичных разрядов для различных частот, которые дают возможность определить необходимый рабочий диапазон частот датчика тока утечки.

Результаты исследований позволяют разработать датчик токов частичных разрядов с учётом необходимого рабочего частотного диапазона. Применение датчиков токов частичных разрядов позволит решить проблему создания системы диагностики текущего контроля технического состояния подвесных изоляторов. Такая система диагностики значительно повысит надёжность и бесперебойность работы воздушных высоковольтных линий электропередач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кабаков А.А., Попов А.А. Современное состояние проблемы расчёта и анализа потерь электроэнергии // Молодой ученый. – 2017. – № 12. – С. 56–59. – URL: <https://moluch.ru/archive/146/41090/>. 07.03.2023.
2. Abisheva D., Breido I., Kaverin V., Kolychev A. Monitoring leakage currents of suspension insulators of high voltage overhead power lines // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE–2019): E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 140. – Article 05010. – P. 1–5.
3. Балашов О.П. Техника высоких напряжений: учебное пособие для студентов специальности 140400 всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2012. – 70 с.
4. Дуля А.А. Технические средства и технология диагностирования подвесных фарфоровых тарельчатых изоляторов // Теория и практика современной науки. – 2017. – № 6(24). – С. 271–274.
5. Поляков Д.А., Никитин К.И., Терещенко Н.А., Новосёлов А.С., Билевич Я.П. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // Омский научный вестник. – 2020. – № 1(169). – С. 32–38. DOI: 10.25206/1813–8225–2020–169–32–38.
6. Поляков Д.А., Терещенко Н.А., Комаров И.В., Никитин К.И., Полякова У.В. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи // Омский научный вестник. – 2020. – № 6(174). – С. 63–68. DOI: 10.25206/1813–8225–2020–174–63–68.
7. Верзунов С.Н., Бочкарев И.В. Система диагностики возникновения частичного разряда в надземных силовых электросетях на основе интеллектуального анализа данных в HF–диапазоне // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 3(60). – С. 4–14. DOI: 10.18503/2311–8318–2023–3(60)–4–14.
8. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. – С. 3–14.
9. Абишева Д.К., Брейдо И.В., Каверин В.В. Состояние вопроса токов утечки подвесных изоляторов // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: материалы VI Междунар. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых. – 2016. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016. – С. 19–22.
10. Новости электротехники: информационно-справочное издание. <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/10.php>. 14.12.2023
11. Потери от токов утечки по изоляторам воздушных линий. <https://pue8.ru/uchet-elektroenergii/2-3-3-poteri-ot-tokov-utechki-po-izolyatoram-vozdushnyx-linij.html>. 14.12.2023.
12. Абишева Д.К., Каверин В.В. Исследование токов утечки подвесных изоляторов // Молодые лидеры: материалы I международного конкурса выпускных квалификационных и курсовых работ. – Казань, 2016. – С. 219–224.
13. Абишева Д.К. Токи частичных разрядов как фактор активных потерь электроэнергии воздушных линий электропередач. <https://science.kuzstu.ru/wp->

content/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/pages/Articles/2/Abisheva.pdf.
10.09.2026.

14. Абишева Д.К., Брейдо И.В. Анализ проблем при передаче электроэнергии по высоковольтным линиям // Труды Международной научно-практической online конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 13), посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан. – Караганда: КарГТУ, 2021. – С. 557–558.

15. Абишева Д.К., Горшков К.С. Теоретические исследования частичных разрядов подвесных изоляторов // Труды Международной научно-практической online конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения № 13), посвященной 30-летию Независимости Республики Казахстан. – Караганда: КарГТУ, 2021. – С. 559–561.

16. Chandrasekar S., Kalaivanan C. et al. Investigations on leakage current and phase angle characteristics of porcelain and polymeric insulator under contaminated conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2009. – Vol. 16, № 2. – P. 574–583.

17. Ahmadi-Joneidi I., Shayegani-Akmal A.A., Mohseni H. Leakage current analysis of polymeric insulators under uniform and non-uniform pollution conditions // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2017. – Vol. 11, № 11. – P. 2947–2957.

18. Verma A.R., Reddy B.S. Interpretation of surface degradation on polymeric insulators // Engineering Failure Analysis. – 2019. – Vol. 95. – P. 214–225.

19. Salam Z. The leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 92514–92528.

20. Deb S., Das S., Pradhan A.K., Banik A., Chatterjee B., Dalai S. Estimation of contamination level of overhead insulators based on surface leakage current employing detrended fluctuation analysis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – Vol. 67, № 7. – P. 5729–5736.

21. Thanh P.N., Cho M.Y., Da T.N. Insulator leakage current prediction using surface spark discharge data and particle swarm optimization based neural network // Electric Power Systems Research. – 2021. – Vol. 191. – Article 106888.

22. Учёные ищут причины неожиданных аварий на ЛЭП. <https://tvarina.ru/358-uchenye-ischut-prichiny-neozhidannyh-avariy-na-lep.html>. 13.01.2025.

23. КЕГОС: вещество в дожде могло стать причиной отключения электричества в Атырауской области. <https://ru.sputnik.kz/20210120/KEGOC-veschestvo-dozhd-otklyucheniye-elektichestvo-Atyrau-16074459.html>. 14.01.2025.

24. Несенюк Т.А., Сергеев Б.С., Сухогузов А.П. Методика определения состояния изоляторов ВЛ 6–10 кВ // Известия Транссиба. – 2014. – № 4(20). – С. 97–103.

25. Пат. RU 211126 U1. Устройство оперативного онлайн-мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи / Иванов Д.А.,

Горячев М.П., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Галиева Т.Г., Арсланов А.Д.; патентообладатель ООО «Научно-производственная компания «ФАРАДА». – №2021113356; заявл. 11.05.21; опубл. 08.09.21.

26. Применение прибора «Ультраскан-2004» для выявления дефектных изоляторов ВЛ 6–10 кВ и 6–35 кВ. https://isup.ru/upload/pdf-zhurnala/2020/5-89-2020/015_018_Metakon.pdf. 17.01.2025.

27. Гудиев Т.Т., Кабисов А.А., Плиева М.Т. Способы диагностики изоляторов воздушных линий электропередач. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/88223/1/eir_2019_022.pdf. 17.01.2025.

28. Salem A.A., Abd-Rahman R., Al-Gailani S.A., Salam Z., Kamarudin M.S., Zainuddin H., Yousof M.F.M. Risk assessment of polluted glass insulator using leakage current index under different operating conditions // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 175827–175839.

29. Mohammadnabi S., Rahmani K. Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230-kV composite insulator // Electric Power Systems Research. – 2021. – Vol. 194. – P. 107083.

30. Cavallini A., Montanari G.C., Puletti F., Contin A. A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12, № 2. – P. 203 – 215

31. Samakosh J.D., Mirzaie M. Analysis of leakage current characteristics during aging process of SiR insulator under uniform and longitudinal non-uniform pollution conditions // Measurement. – 2019. – Vol. 147. – P. 106862.

32. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.

33. IEC 60270. High-voltage test techniques – Partial discharge measurements techniques. – Technical Report 40. – 2015.

34. ГОСТ 20074–83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов.

35. Кислякова Е.В. Частичные разряды в диагностике изоляционных систем высоковольтного оборудования // Современные тенденции технических наук: материалы II Междунар. науч. конф. (г. Уфа, май 2013 г.). – Уфа, 2013. – С. 36–38.

36. Nascimento D.A., Iano Y., Loschi H.J., Ferreira L.A.S., Rossi J.A.D., Pessoa C.D. Evaluation of partial discharge signatures using inductive coupling at on-site measuring for instrument transformers // International Journal of Emerging Electric Power Systems. – 2018. – Vol. 19, № 1. – P. 1– 19

37. Nascimento D.A., Refaat S.S., Darwish A., Khan Q., Abu-Rub H., Iano Y. Investigation of void size and location on partial discharge activity in high voltage XLPE cable insulation // WCNPS 2019 – Workshop on Communication Networks and Power Systems. – IEEE, 2019. – P. 1–6.

38. Montanari G.C., Cavallini A. Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to smart grid assessment // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – Vol. 29. – P. 8–17.

39. Stone G.C. Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12. – P. 891–904.
40. Rodrigo Mor A., Castro Heredia L.C., Muñoz F.A. New clustering techniques based on current peak value, charge and energy calculations for separation of partial discharge sources // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – Vol. 24, № 1. – P. 340–348.
41. Rodrigo Mor A., Castro Heredia L.C., Muñoz F.A. Estimation of charge, energy and polarity of noisy partial discharge pulses // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – Vol. 24, № 4. – P. 2511–2521.
42. Rodrigo Mor A., Morshuis P.H.F., Smit J.J. Comparison of charge estimation methods in partial discharge cable measurements // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – Vol. 22, № 2. – P. 657–664.
43. Rodrigo Mor A., Castro Heredia L.C., Muñoz F.A. Effect of acquisition parameters on equivalent time and equivalent bandwidth algorithms for partial discharge clustering // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2017. – Vol. 88. – P. 141–149.
44. Ardila-Rey J., Martínez-Tarifa J., Robles G., Rojas-Moreno M. Partial discharge and noise separation by means of spectral-power clustering techniques // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – Vol. 20, № 4. – P. 1436–1443.
45. Montanari G.C., Negri F., Ciani F. Noise rejection and partial discharge identification in HVDC insulation systems // 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). – 2017. – P. 425–428.
46. Ali N.H.N., Goldsmith W., Hunter J.A., Lewin P.L., Rapisarda P. Comparison of clustering techniques of multiple partial discharge sources in high voltage transformer windings // 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). – 2015. – P. 256–259.
47. Zhu M.-X. et al. Partial discharge signals separation using cumulative energy function and mathematical morphology gradient // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – Vol. 23, № 1. – P. 482–493.
48. Xu X., Ding S. DPCG: an efficient density peaks clustering algorithm based on grid // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2016.
49. Peng L., Dong Z., Naijun W., Liu P., Zhou D., Wu N. VDBSCAN: varied density based spatial clustering of applications with noise // 2007 International Conference on Service Systems and Service Management. – 2007. – P. 1–4.
50. Liu W., Hou J. Study on a density peak based clustering algorithm // 2016 7th International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP). – 2016. – P. 60–70.
51. Louhichi S., Gzara M., Ben-Abdallah H. Unsupervised varied density based clustering algorithm using spline // Pattern Recognition Letters. – 2017. – Vol. 93. – P. 48–57.
52. Cavallini A., Montanari G.C., Ciani F. Analysis of partial discharge phenomena in paper-oil insulation systems as a basis for risk assessment evaluation // IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). – 2005. – P. 241–244.

53. Altenburger R., Heitz C., Timmer J. Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2002. – Vol. 35. – P. 1149–1163.
54. Hudon C., Belec M. Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2005. – Vol. 12, № 2. – P. 297–319.
55. Li J., Si W., Yao X., Li Y. Measurement and simulation of partial discharge in oil impregnated pressboard with an electrical aging process // *Measurement Science and Technology*. – 2009. – Vol. 20, № 10.
56. Morshuis P.H.F., Smit J.J. Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2005. – Vol. 12, № 2. – P. 328–340.
57. Bao L., Li J., Zhang J., Jiang T., Li X. Partial discharge process and characteristics of oil-paper insulation under pulsating DC voltage // *Journal of Electrical Engineering and Technology*. – 2016. – Vol. 11, № 2. – P. 436–444.
58. Lindell E. Partial Discharges at Repetitive Rapidly Changing Voltages: doctoral thesis. – Chalmers University of Technology, 2009.
59. Lindell E., Bengtsson T., Blennow J., Gubanski S.M. Measurement of partial discharges at rapidly changing voltages // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2008. – Vol. 15, № 3. – P. 823–831.
60. Hammarström T. Partial Discharges at Fast Rising Voltages: doctoral thesis. – Chalmers University of Technology, 2014.
61. Hammarström T., Bengtsson T., Blennow J., Gubanski S.M. Evidence for changing PD properties at short voltage rise times // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2011. – Vol. 18, № 5. – P. 823–831.
62. Holmgren B. Dielectric response, breakdown strength and water tree content of medium voltage XLPE cables. – Stockholm: KTH Department of Power Engineering, 1997.
63. Densley R.J., Salvage B. Partial discharges in gaseous cavities in solid dielectrics under impulse voltage conditions // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 1971. – Vol. EI-6, № 2. – P. 54–62.
64. Sun Z., Zhao X., Li J., Li Y. Experiment investigation of partial discharges under impulse voltage // *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. – Harbin, China, 2009. – Paper No. E-31.
65. Densley R.J. Partial discharges in electrical insulation under combined alternating and impulse stresses // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 1970. – Vol. 5. – P. 96–103.
66. Roy M., Nelson J.K., MacCrone R.K., Schadler L.S., Reed C.W., Keefe R. Polymer nanocomposite dielectrics – the role of the interface // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2005. – Vol. 12, № 4. – P. 629–643.
67. Lewis T.J. Nanometric dielectrics // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 1994. – Vol. 1, № 5. – P. 812–825.
68. Nelson J.K., Fothergill J.C., Dissado L.A., Peasgood W. Towards an understanding of nanometric dielectrics // *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. – 2002. – P. 295–298.

69. Tanaka T. Dielectric nanocomposites with insulating properties // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12, № 5. – P. 914–928.
70. Tanaka T., Montanari G.C., Mulhaupt R. Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation perspectives for processing technologies, material characterization and future applications // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2004. – Vol. 11, № 5. – P. 763–784.
71. Meichsner C., Clark T., Groeppel P. Protective layer of Al_2O_3 nanocomposites and surface composition after electrical stress // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – Vol. 22, № 5. – P. 2944–2950.
72. Hoffmann C., Jenau F. On surface degradation mechanisms of epoxy filled with silica nanoparticles caused by partial discharges // 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). – Potsdam, Germany, 2010. – P. 1–4.
73. Fabiani D., Cavallini A., Montanari G.C., Testa L. Extraction of aging markers for nanostructured epoxy resin aged under surface discharges // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). – Montreal, Canada, 2009. – P. 387–391.
74. Jin H., Morshuis P., Rodrigo Mor A., Andritsch T. An investigation into dynamics of partial discharge propagation in mineral oil based nanofluids // IEEE International Conference on Liquid Dielectrics. – Slovenia, 2014. – P. 1–4.
75. Nikjoo R. Dielectric Response and Partial Discharge Diagnostics of Insulation Systems by Utilizing High Voltage Impulses: дис. – KTH Royal Institute of Technology, 2016.
76. Montanari G.C., Cavallini A. Insulation condition assessment of power equipments in electrical assets based on on-line monitoring of partial discharges // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. – IEEE, 2007. – P. 7–12.
77. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Концепция оценки частичных разрядов // Электричество. – 2018. – № 2. – С. 27–33
78. Abisheva D. Analysis of Existing Methods for Monitoring the Current of Partial Discharges of Suspended Insulators // Труды университета. – Караганда: КапГТУ, 2024. – № 2(95). – С. 501–504.
79. Частичные разряды. http://wikiorg.ru/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D1%8F%D0%B4%D1%8B. 24.11.2023.
80. Cavallini A., Montanari G.C., Contin A., Puletti F. A new approach to the diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2003. – Vol. 19, № 2. – P. 23–30.
81. Álvarez F., Garnacho F., Ortego J., Sánchez-Urán M.A. Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment // Sensors. – 2015. – Vol. 15, № 4. – P. 7360–7387.
82. IEC TS 62478. High voltage test techniques – Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. – Technical Report. – IEC, 2016.

83. Ohtsuka S., Petzold F., Sanchez-Uran M., Siodla K., Tenbohlen S. Guidelines for partial discharge detection using conventional (IEC 60270) and unconventional methods. – Technical Report 288. – CIGRÉ, 2016.
84. Othman N.A., Piah M.A.M., Adzis Z., Al-Geelani N.A. Partial discharge characterization based on leakage current pulses waveform for contaminated glass insulator string // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 835–843.
85. Abdul Madhar S., Mraz P., Rodrigo Mora A., Ross R. Empirical analysis of partial discharge data and innovative visualization tools for defect identification under DC stress // Electrical Power and Energy Systems. – 2020. – Vol. 123. – P. 1–9.
86. Rodrigo Mor A., Castro Heredia L.C., Harmsen D.A., Muñoz F.A. A new design of a test platform for testing multiple partial discharge sources // Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – Vol. 74. – P. 374–384.
87. Rodrigo Mor A., Muñoz F.A., Wu J., Castro Heredia L.C. Automatic partial discharge recognition using the cross wavelet transform in high voltage cable joint measuring systems using two opposite polarity sensors // Electrical Power and Energy Systems. – 2020. – Vol. 117. – Article 105695. – P. 1–8.
88. Fonseca-Badillo M., Negrete-Navarrete L., González-Parada A., Castañeda-Miranda A. Simulation and analysis of underground power cables faults // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 35. – P. 50–57.
89. Zhang Hao, Duan Yubing, Wang Bin, Liu Hui, Lin Ying, Hu Xiaoli, Liu Rong, Wang Miao. Case analysis on partial discharge signal of XLPE cable T-joint by using high-frequency pulse current method // 4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2017). – Berlin, Germany, 2017. – Vol. 141. – P. 545–550.
90. Stein J.Y. Digital Signal Processing: A Computer Science Perspective. – John Wiley & Sons, Inc., 2000. – P. 71–101.
91. Tao Jiagui, Tang Ju, Zhang Xiaoxing, Wu Mianzhi. Measurement of partial discharge using IEC60270 and ultra high frequency method in GIS // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2013. – Vol. 8, № 1. – P. 456–467.
92. Ye Haifeng, Qian Yong, Si Liangqi, Sheng Gehao, Jiang Xiuchen. UHF partial discharge pattern recognition for GIS with support vector machine // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2013. – Vol. 8, № 1. – P. 491–496.
93. Stefenon S.F., Bruns R., Sartori A., Meyer L.H., Ovejero R.G., Leithardt V.R.Q. Analysis of the ultrasonic signal in polymeric contaminated insulators through ensemble learning methods // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 33980–33991.
94. Polisetty S., El-Hag A., Jayram S. Classification of common discharges in outdoor insulation using acoustic signals and artificial neural network // High Voltage. – 2019. – Vol. 4, № 4. – P. 333–338.
95. Ouidir F., Benouzza N., Gherabi Z. Stator current square analysis to discriminate between eccentricity and demagnetization faults in PMSMs // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2022. – Vol. 17, № 1. – P. 11–19. DOI: 10.15866/iree.v17i1.20950.

96. Gherabi Z., Toumi D., Benouzza N., Denai M. Stator inter-turn short-circuit and eccentricity faults detection in permanent magnets synchronous motors using line current spectrum analysis // *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. – 2020. – Vol. 15, № 1. – P. 54–68. DOI: 10.15866/ire.v15i1.17638.
97. Badrul Sham N., Kamarudin M., Zainuddin H., Abd-Rahman R. Trend of sulfur hexafluoride (SF6) gas mixtures and other alternatives as insulation gas: an overview // *International Review of Electrical Engineering (IREE)*. – 2021. – Vol. 16, № 5. – P. 465–475. DOI: 10.15866/iree.v16i5.18937.
98. Pirker A., Schichler U. Partial discharge measurement at DC voltage – evaluation and characterization by NoDi* pattern // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2018. – Vol. 25. – P. 883–891.
99. Lu S., Chai H., Sahoo A., Phung B.T. Condition monitoring based on partial discharge diagnostics using machine learning methods: a comprehensive state-of-the-art review // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2020. – Vol. 27, № 6. – P. 1861–1888.
100. Barrios S., Buldain D., Comech M.P., Gilbert I., Orue I. Partial discharge classification using deep learning methods – survey of recent progress // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, № 13. – Article 2485.
101. Chai H., Phung B.T., Mitchell S. Application of UHF sensors in power system equipment for partial discharge detection: a review // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, № 5. – Article 1029.
102. Lumba L.S., Khayam U., Maulana R. Design of pattern recognition application of partial discharge signals using artificial neural networks // *International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. – 2019. – P. 239–243.
103. Morette N., Ditchi T., Oussar Y. Feature extraction and ageing state recognition using partial discharges in cables under HVDC // *Electric Power Systems Research*. – 2020. – Vol. 178. – P. 1–8.
104. Iorkyase E.T., Tachtatzis C., Glover I.A., Lazaridis P., Upton D., Saeed B., Atkinson R.C. Improving RF-based partial discharge localization via machine learning ensemble method // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2019. – Vol. 34, № 4. – P. 1478–1489.
105. Wang Y.B., Chang D.G., Qin S.R., Fan Y.H., Mu H.B., Zhang G.J. Separating multi-source partial discharge signals using linear prediction analysis and isolation forest algorithm // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2019. – Vol. 69, № 6. – P. 2734–2742.
106. Wang Y., Yan J., Sun Q., Li J., Yang Z. A MobileNets convolutional neural network for GIS partial discharge pattern recognition in the ubiquitous power internet of things context: optimization, comparison, and application // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 150226–150236.
107. Raymond W.J.K., Illias H.A., Bakar A.H.A., Mokhlis H. Partial discharge classifications: review of recent progress // *Measurement*. – 2015. – Vol. 68. – P. 164–181.
108. Mas'ud A., Albarracín R., Ardila-Rey J., Muhammad-Sukki F., Illias H., Bani N., Munir A. Artificial neural network application for partial discharge recognition: survey and future directions // *Energies*. – 2016. – Vol. 9. – Article 574.

109. Forssén C., Edin H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency. Part 1: measurements // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2008. – Vol. 15, № 6. – P. 1601–1609.
110. Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных линиях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 151–163. DOI: 10.30724/1998–9903–2022–24–1–151–163.
111. Пат. РК 34012, МПК H02J 13/00 (2006.01), G01R 31/08 (2006.01). Способ и система бесконтактного и дистанционного контроля электропрочности гирлянд изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередачи / Брейдо И.В., Жетесова Г.С., Каверин В.В., Сичкаренко А.В., Иванов В.А., Войткевич С.В. – № 2018/0017.1; заявл. 08.01.2018; опубл. 15.11.2019, Бюл. № 46. – 7 с.
112. Брейдо И.В., Каверин В.В., Иванов В.А., Эм Г.А. Датчик токов утечки высоковольтных изоляторов // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии: материалы VI Междунар. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых (Россия, Омск, 17 мая 2016 г.). – Омск. – 2016. – С. 31–36.
113. Пат. RU 2 360 259 C1, МПК G01R 19/00. Пояс Роговского / Ерушин В.П., Ефанов В.Г., Тимофеев И.П.; патентообладатель ЗАО «Завод Микропроцессорной Техники–ЭНЕРГИЯ». – 12.11.2007. – 7 с.
114. Пат. RU 191782 U1, МПК G01R 19/165 (2006.01), G01R 31/08 (2006.01), G08C 17/02 (2006.01). Датчик тока / Хойен Дамин Франк, Бирхёйс Том Корнел Элисе; патентообладатель «АТЛАС КОПКО ЭРПАУЭР, НАМЛОЗЕ ВЕННОТСХАП». – 17.06.2019.
115. Пат. RU 51234 U1, МПК G01R 31/00 (2006.01). Датчик частичных разрядов / Аксенов Ю.П., Прошлецов А.П., Фаробин А.Г., Ляпин А.Г. – 27.01.2006. – 11 с.
116. Пат. RU 69 263 U1. Датчик частичных разрядов / Аксенов Ю.П., Прошлецов А.П., Фаробин А.Г., Ляпин А.Г., Ярошенко И.В. – 10.12.2007.
117. Пат. RU 170544, МПК H05K 7/02. Модульное электронное устройство / Клоков А.В.; правообладатель ООО «МикроМакс Системс». – Россия, 28.04.2017.
118. Пат. RU 157 111 U1, МПК G06F 15/76 (2006.01). Унифицированный электронный модуль информационно-вычислительных систем / Адамов А.А., Словик А.Ю., Шевченко П.А., Янкевич Е.А., Залётов В.Ю., Груздев А.Е., Севрюков В.В. – 20.11.2015. – 2 с.
119. Пат. RU 2176134, МПК H01L 25/10. Трёхмерный электронный модуль и способ его изготовления; правообладатель ЗАО «Техно–ТМ». – 20.11.2001.
120. Пат. RU 2449346 C1, МПК G06F 9/00 (2006.01). Устройство сбора, обработки и передачи телеметрической информации / Логгер К.М., Шехтман И.М. – 27.04.2012. – 8 с.
121. Пат. RU 2 571584 C2, МПК G08C 19/28 (2006.01). Способ передачи телеметрической информации, адаптированный к различным ситуациям,

появляющимся при проведении испытаний ракетно-космической техники, и система для его осуществления / Кукушкин С.С., Кузнецов В.И. – 20.12.2015. – 48 с.

122. Пат. RU 2270919, МПК E21B 47/12. Способ передачи информации от забойной телеметрической системы и устройство для его осуществления / Лукьянов Э.Е., Ерёмин В.Н., Каюров К.Н.; правообладатель ЗАО «Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «ЛУЧ». – 27.02.2006. – 8 с.

123. Абишева Д.К., Эм Г.А., Савченко Н.К., Горшков К.С. Жоғары вольтты электр желілерінің аспалы окшаулағышының конструкциясы // Труды университета. – Караганда: КарГТУ, 2024. – № 1(94). – С. 459–463.

124. Abisheva D., Kaverin V., Em G., Kalinin A., Yugay V. Studying partial discharge currents of high voltage power line suspension insulators // International Journal on Energy Conversion (IRECON). – 2022. – Vol. 10, № 3. – P. 88–96.

125. Abisheva D., Gorshkov K., Abisheva D., Kaverin V., Kalinin A., Em G. Experimental studies of partial discharge currents of suspended insulators of high-voltage power lines // Труды университета. – Караганда: КарГТУ, 2022. – № 3(88). – С. 346–351.

126. ГОСТ Р 51086–97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. Раздел 3. Термины и определения.

127. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

128. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей / Мин. энерг. и электрификации СССР. Госэнергонадзор. – М.: Атомиздат, 1982. – 352 с.

129. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.

130. Орлов П.И. Основы конструирования: справочник: в 3 кн. – М.: Машиностроение, 1977.

131. Анурьев В.И. Справочник машиностроителя-конструктора: в 3 кн. – М.: Машиностроение, 2006.

132. ЕСКД. Основные положения. – М.: Госстандарт, 1985.

133. ЕСКД. Общие правила выполнения чертежей. – М.: Госстандарт, 1984.

134. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980. – 480 с.

135. Варламов Р.Г. Справочник конструктора РЭА: компоненты, механизмы, надежность / под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Радио и связь, 1985. – 382 с.

136. ГОСТ 14254–96. Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP).

137. ГОСТ 15150–69. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

138. ГОСТ 12997. Устойчивость к воздействию атмосферного давления.

139. ГОСТ 2.103–68. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки.
140. Абишева Д.К., Горшков К.С., Каверин В.В., Эм Г.А., Калинин А.А. Структурная схема комбинированного датчика тока утечки подвесного изолятора // Труды Международной научно-практической конференции «XV Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства». – Караганда: КарГТУ, 2021. – Ч. 2. – С. 12–14.
141. Abisheva D., Gorshkov K., Abisheva D., Kaverin V., Kalinin A., Em G. Technical implementation of the combined leakage current sensor of suspended insulators // Труды университета. – Караганда: КарГТУ, 2023. – № 2(91). – С. 347–352.
142. Пат. РК 9204. Устройство контроля тока частичных разрядов подвесных изоляторов линии электропередачи / Абишева Д.К. – № 2024/0378.2; заявл. 12.03.2024; опубл. 14.03.2025, Бюл. № 11.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на полезную модель

КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 9204

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2024/0378.2

(22) 12.03.2024

(45) 14.03.2025

(54) Электр беру желілерінің аспалы оқшаулағыштарының ішінара разрядтарының тоған бақылау құрылғысы
Устройство контроля тока частичных разрядов подвесных изоляторов линии электропередачи
Partial discharge current monitoring device for suspended insulators of transmission lines

(73) Абишева Динара Кайржановна (KZ)
Abisheva Dinara Kairzhanovna (KZ)

(72) Абишева Динара Кайржановна (KZ) Abisheva Dinara Kairzhanovna (KZ)



ЭИК қол қойылды
Подписано ЭИК
Signed with EDS

Е. Оспанов
E. Ospanov
Y. Ospanov

«Ұлттық интеллектуалдық меншік институты» РМК директоры
Директор РМК «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of RSI «National Institute of Intellectual Property»



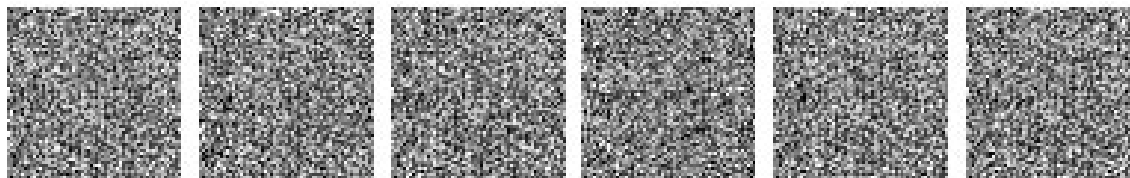
ВЫПИСКА ИЗ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕЕСТРА ПОЛЕЗНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

РГП "НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ"
МИНИСТЕРСТВА ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Статус: Действует

(11) № охранного документа	9204
(13) Охраняемый документ	Патент на Полезную Модель
(21) Номер заявки	2024/0378.2
(22) Дата подачи заявки	12.03.2024
(51) МПК	G01R 31/52
(54) Название	Устройство контроля тока частичных разрядов подвесных изоляторов линии электропередачи
(73) Патентообладатель	Абильева Денара Эльврановна (KZ)
(72) Автор(-ы)	Абильева Денара Эльврановна Абильева Денара Каиржановна Abisheva Denara Kaishevnovna
(45) Номер и дата бюллетеня	№ 41 - (4.03.2025)
Срок действия	14.11.2025

Дата формирования выписки: 21.04.2025



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения в производство

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Абишевой Динары Каиржановны на тему: «Создание методов контроля токов частичных разрядов подвесных изоляторов высоковольтных линий электропередач»

Результаты диссертационной работы Абишевой Динары Каиржановны были рассмотрены и обсуждены в проектной организации ТОО «ARIGATAI». Научная ценность диссертационной работы заключается в получении новых теоретических и прикладных результатов, направленных на развитие методов контроля токов частичных разрядов подвесных изоляторов высоковольтных линий электропередач. Определены области распределения токов частичных разрядов относительно диаграммы периода напряжения на изоляторе; разработана схема замещения подвесного изолятора; разработаны математическая и имитационная модели электродинамических процессов токов частичных разрядов; получены спектральные характеристики тока частичных разрядов для различных значений частот следования токов частичных разрядов. Автором предложены алгоритмы исследования вероятностных характеристик токов частичных разрядов относительно диаграммы напряжения на изоляторе; методика проведения экспериментальных исследований токов частичных разрядов, которые представляют большой интерес, являются актуальными и обладают высоким потенциалом практического применения. Практическая ценность результатов исследования заключается в том, что техническое решение по контролю и мониторингу токов частичных разрядов позволит обеспечить оптимальные режимы работы подвесных изоляторов и повысить надежность их работы. Внедрение такого технического решения предотвратит аварийные случаи, уменьшит количество ремонтных работ, создаст возможности для ранней диагностики состояния подвесных изоляторов с целью снижения активных потерь. Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании воздушных линий электропередач в проектах ТОО «ARIGATAI».

Подписи:

Директор ТОО «ARIGATAI»



Ш.Д. Абдрахманов

Научный консультант
к.т.н., ассоциированный профессор (доцент)
кафедры АПП НАО «Карагандинский
технический университет
имени Абылкаса Сагинова»

В.В. Каверин

Докторант кафедры АПП
НАО «Карагандинский технический
университет имени Абылкаса Сагинова»

Д.К. Абишева

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Комплект эскизной конструкторской документации комбинированного датчика тока утечки подвешенного изолятора

Перв. примен.		Справ. №		Подп. и дата	Инв. № дудл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.
Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание		
			<i>Документация</i>					
А)			КУМС ВВЛЭП.02.056 СБ	Сборочный чертёж				
			<i>Детали</i>					
Б4	1		КУМС ВВЛЭП.02.056	Каркас	1			
				Текстолит ПТ-10 высшего сорта ГОСТ5-78				
				220 ± 1.0 x 15 ± 0,5		мм		
			<i>Материалы</i>					
	4			Провод ПЭВ-2-0,8				
				ГОСТ7262-78	30	г		
	7			Лакоткань ЛХМС-105 0,17				
				ГОСТ2214-78	100	см ²		
	8			Лента липкая маркировочная ТУ6-05-1240-75	0,01	м		
КУМС ВВЛЭП. 02.057								
Изм.		Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
Разраб.		Иванов В.А.			4.08.2015			
Проб.		Эм Г.А.						
Нконтр.		Эм Г.А.						
Утв.		Каверин						
Катушка						Лит.	Лист	Листов
								1

Копировал _____ Формат А4

