

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Иванов Дмитрий Алексеевич

МЕТОДОЛОГИЯ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и
природной среды

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант – профессор,
доктор физико-математических наук
А.В. Голенищев-Кутузов

Казань, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	25
1.1 Дефекты в твердотельных диэлектрических материалах	25
1.1.1 Керамические материалы (фарфор)	25
1.1.2 Полимерные материалы	29
1.2 Электрофизические процессы в диэлектрических материалах	32
1.3 Особенности детектирования частичных разрядов.....	41
1.4 Физические методы контроля дефектов	45
1.5 Оптические методы контроля.....	46
1.6 Методы теплового контроля.....	49
1.7. Методы электромагнитного контроля и регистрации ЧР.....	50
1.8 Методы акустического контроля и регистрации ЧР	54
1.9 Постановка задач исследования	58
2. КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ.....	62
2.1 Переход от ординарных методов контроля характеристик ЧР к комплексным методам контроля.....	62
2.2 Особенности методики одновременных измерений фазовых характеристик ЧР электромагнитным и акустическим датчиками.....	70
2.3 Первоначальный комплексный анализ дефектов	77
2.4 Длительное временное влияние индуцированных электрических полей на развитие дефектов	89
3. ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ.....	97

3.1 Методологические аспекты диагностики технического состояния высоковольтных изоляторов.....	97
3.2 Первоначальная диагностика состояния реальных высоковольтных изоляторов	99
3.3 Результаты стендовых измерений характеристик ЧР с помощью электромагнитного и акустического датчиков	104
3.4 Диагностический электрооптический метод регистрации напряженностей электрических полей.....	118
3.5 Усовершенствованный способ дистанционной диагностики	129
4. МОЩНЫЕ ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РОСТ ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ	133
4.1 Особенности образования и регистрации мощных частичных разрядов.....	133
4.2 Измерение параметров мощных частичных разрядов	139
4.3 Особенности излучения частичных разрядов в высоковольтных изоляторах.....	144
4.4. Обобщенная физическая модель образования мощных частичных разрядов	148
4.5 Физическая модель процесса излучения частичных разрядов в дефекте «стержень-оконцеватель» высоковольтного изолятора	151
4.6 Схема электрофизических процессов в ЧР	159
4.7 Взаимодействие частичных разрядов с электрическими зарядами в плоскостных дефектах диэлектриков в сильных электрических полях	164
4.8 Определение видов дефектов и места их расположения в ВИ в процессе реальной эксплуатации	169
4.9 Влияние МЧР на скорость развития дефектов	176
4.10 Дистанционный мониторинг технического состояния ВИ	179

5. СИСТЕМА МОНИТОРИНГОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	185
5.1 Концепция системы мониторинга (периодической диагностики) высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации	185
5.2 Система мониторинга высоковольтной изоляции открытых распределительных устройств подстанций	191
5.3 Испытательный стенд для изучения электрофизических процессов и разработки диагностических параметров для мониторинга	200
5.4 Результаты дистанционного контроля параметров ЧР высоковольтных изоляторов на подстанции	202
5.5 Методические аспекты выполнения мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов.....	209
5.6 Методика периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов.....	212
5.7 Возможности автоматизации процесса мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов на подстанциях с использованием новой компьютерной программы записи и обработки сигналов с датчиков....	217
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	221
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	224
СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА.....	228
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	242

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения:

АПК – аппаратно-программный комплекс;

АФХ – амплитудно-фазовая характеристика;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БДУ – бесконтактное диагностическое устройство;

ВИ – высоковольтный изолятор;

ВЛ – воздушная линия электропередачи;

ВТ – высоковольтный трансформатор;

ВЧ – высокочастотный;

ДП – диагностический параметр;

И – изоляция;

ИК – инфракрасный;

ИОС – изолятор опорно-стержневой;

КРУЭ – комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией;

ЛЭП – линия электропередачи;

МК – микроконтроллер;

МЧР – мощный частичный разряд ($q \geq 2$ нКл);

МЭМС – микроэлектромеханические системы;

ОРУ – открытое распределительное устройство;

ПВИ – полимерный высоковольтный изолятор;

ПДС – периодическая доменная структура;

ПИ – полимерный изолятор;

ПС – подстанция;

ПЧР – поверхностный частичный разряд;

ПЭ – Промышленная электроника;

СВЧ – сверхвысокочастотный;

СФ – светофильтр;

УЗ – ультразвуковой;

УФ – ультрафиолетовый;

ФВИ – фарфоровый высоковольтный изолятор;
ФИ – фарфоровый изолятор;
ЧР – частичный разряд;
ЭМ – электромагнитный;
ЭОП – электронно-оптический преобразователь;
ЭП – электрическое поле;

Условные обозначения:

C – емкость разрядного промежутка;
 D – коэффициент диффузии электронов;
 d – ширина полости дефекта;
 e – заряд электрона;
 E_a – приложенное высоковольтное поле;
 E_B – порог электрической прочности;
 E_T – остаточное поле;
 E_i – индуцированное поле;
 E_k – локальное электрическое поле;
 L – расстояние между дефектом и датчиком;
 l – длина полости дефекта;
 M_e – подвижность электронов;
 M_p – подвижность положительных ионов;
 M_n – подвижность отрицательных ионов;
 N – количество частичных разрядов;
 N_e – плотность заряда электронов;
 N_n – плотность заряда отрицательных ионов;
 N_p – плотность заряда положительных ионов;
 Q – суммарный кажущийся заряд;

q – кажущийся заряд (интенсивность) частичного разряда;

T – температура;

U_a – приложенное высокое напряжение;

W_e – скорость дрейфа для электронов;

W_p – скорость дрейфа для положительных ионов;

W_n – скорость дрейфа для отрицательных ионов;

α – коэффициент ионизации;

α_e – коэффициент электронного акустического поглощения в отсутствие дрейфа носителей заряда;

β – коэффициент поглощения;

ε – диэлектрическая проницаемость;

η – коэффициент рекомбинации;

φ – потенциал электрического поля;

v_d – дрейфовая скорость носителей заряда;

v_s – скорость звука.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и степень ее разработанности

Проблема повышения надежности работы высоковольтного энергетического оборудования привела к необходимости проведения многочисленных исследований одновременно по нескольким направлениям: изучение электрофизических и физико-химических процессов в изолирующих материалах в условиях эксплуатации и разработки на этой основе новых или модифицированных материалов; создание более совершенных изолирующих конструкций; разработка новых методов контроля и диагностики технического состояния изолирующих элементов высоковольтного энергетического оборудования, в том числе и дистанционных методов диагностики. Следует подчеркнуть, что в разнообразных высоковольтных энергетических устройствах (трансформаторы, вводы, изоляторы, электрические машины, кабели и прочие элементы) используются различные диэлектрические материалы, отличающиеся по своим электрофизическим свойствам и конструкционным решениям.

Высоковольтное энергетическое оборудование вследствие его сложности, использовании разнообразных материалов и работе в условиях воздействия сильных электрических, электромагнитных полей, электродинамических и тепловых воздействий подвержено большому риску образования дефектов, последующих затем электрических пробоев и даже полного разрушения. Поэтому в наши дни целью технического диагностирования является однозначное определение дефектов с прогнозированием их дальнейшего развития и остаточного ресурса высоковольтного оборудования. В последние десятилетия начался переход от системы планово-предупредительного обследования и ремонта высоковольтного оборудования к периодическому обследованию по техническому состоянию, в том числе с помощью неразрушающего контроля технического состояния оборудования. Главное отличие последнего от ранее разработанных и используемых методов диагностики состоит в возможности обследовать оборудование без прекращения процесса передачи электроэнергии [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [A19]. Быстрому и

успешному переходу к методу диагностики «под рабочим напряжением» мешает ряд насущных задач, требующих предварительного решения:

- отсутствие нормативных документов, включающих в себя предельные диагностические параметры, на основании которых можно принимать решение о техническом состоянии;

- отсутствие согласования параметров, получаемых с отключением оборудования, с диагностическими параметрами при использовании метода «под рабочим напряжением»;

- отсутствие методов многократного диагностирования с определенной периодичностью, то есть мониторинга диагностических параметров. При этом периодичность должна определяться скоростью возможного образования и развития дефекта в любом контролируемом элементе оборудования [A20];

- отсутствие оптимального набора измерительных комплексов и компьютерных программ для дистанционного мониторинга технического состояния высоковольтного оборудования в автоматизированном режиме.

В представленной диссертации обобщены результаты по разработке комплексного метода и соответствующей системы мониторинга одних из наиболее ответственных и наиболее уязвимых в процессе эксплуатации узлов – опорных и подвесных высоковольтных изоляторов (ВИ) на воздушных линиях электропередачи и подстанциях. В настоящее время большинство энергетических систем перешло на использование полимерных изоляторов (ПИ) на рабочие напряжения до 500 кВ [A20]. Однако сохранились и более старые системы с использованием фарфоровых изоляторов (ФИ).

По современным представлениям, система мониторинга должна быть способна оценивать текущее техническое состояние объекта, определять характеристики наиболее опасных дефектов, выделять наиболее быстро развивающиеся дефекты, определять периодичность процессов диагностики и прогнозировать остаточный ресурс [A20]. Остаточный ресурс высоковольтного изолятора - суммарная наработка высоковольтного изолятора (в часах, сутках) от

момента проведения контроля его технического состояния, до перехода в предельное состояние.

Начиная со второй половины XX века большое внимание в научных статьях, международных и отечественных стандартах стало уделяться частичным разрядам (ЧР) как первичным электрофизическим процессам, определяющим техническое состояние ВИ [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [A20].

В ВИ различают три основных вида ЧР: микроразряды в малых кавернах, существующих как на поверхностях электродов, так и в объеме диэлектриков; частичные разряды вдоль границ раздела двух диэлектриков; частичные (незавершенные) пробои на границе «твердый диэлектрик – газ». Им соответствуют дефекты, чаще всего в виде воздушных полостей сферической формы внутри диэлектриков или плоскопараллельных воздушных слоев внутри диэлектрика и на границе «диэлектрик – электрод» (дисковые каверны). Существующие методы измерения ЧР (электромагнитный, акустический, оптический) даже при комплексном использовании позволяют оценивать только текущее состояние ВИ [20], [34], [35], [36], [37], [38], [A10]. Поэтому, уже в XXI веке начались разработки бесконтактных способов непрерывного мониторинга состояния ВИ, позволяющие фиксировать момент пробоя или полного их разрушения, которые получили общее название «индикаторы пробоя изоляторов» [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [A10]. Разработанные в них программы непрерывного контроля показаний оптических, емкостных, термодинамических датчиков, прикрепляемых непосредственно к каждому изолятору, позволяют только регистрировать резкое изменение проводящего состояния изоляторов и разбраковывать их по принципу: работоспособный – неработоспособный, не контролируя процесс развития дефектов. К другим недостаткам можно отнести сложность непрерывной передачи информации от каждого датчика, ненадежность работы в жестких климатических условиях и высокая стоимость оборудования.

Периодический контроль (мониторинг) за развитием дефектов в изоляторах стал еще более актуальным после предсказания, а затем обнаружения мощных частичных разрядов (МЧР), по интенсивности превышающих обычные частичные разряды в несколько раз [24], [A18]. Было установлено, что МЧР возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов созданных предыдущими обычными частичными разрядами. Наведенные заряды образуют индуцированные поля (E_i), которые могут значительно превышать приложенные высоковольтные поля (E_a). Мощные разряды возникают при сложении одинаково направленных полей E_i и E_a , что происходит в фазовых интервалах положительного ($0-50^\circ$) и отрицательного ($180-240^\circ$) полупериодов поля E_a . Количество и интенсивность мощных разрядов возрастают с увеличением размера дефекта и могут составлять 2-6 разрядов за период каждого цикла высокого напряжения с интенсивностью 2-6 нКл [A3, A10].

Именно такие МЧР вызывают деградацию диэлектрических поверхностей, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации изоляторов. Поэтому периодический контроль за характеристиками мощных разрядов является одним из наиболее важных при дистанционном мониторинге состояния высоковольтных изоляторов.

Однако не были разработаны физические принципы развития дефектов в полимерных материалах под действием МЧР и не были построены модели развивающихся дефектов и модели остаточного ресурса в зависимости от новых диагностических параметров [25], [26], [A10].

При использовании уже известных разработанных способов комплексной диагностики работоспособности ВИ [20], [34], [35], [36] необходимо было определение таких важных диагностических параметров дефектов как: вид, место расположения, размер, скорость развития, степень влияния на дальнейшую работоспособность посредством периодического измерения разработанного набора характеристик ЧР, обеспечивающего получение значений диагностических параметров дефекта [A10].

ЧР сопровождаются излучением в окружающее пространство коротких с длительностью от 10^{-10} до 10^{-7} с электромагнитных импульсов в широком частотном диапазоне от 10^5 до 10^{17} Гц (в том числе оптическом) и акустических импульсов в диапазоне 20 Гц – 200 кГц. Для дистанционной регистрации таких излучений были разработаны соответствующие методы, каждому из которых присущи как определенные достоинства, так и существенные недостатки [3], [4], [50], [51], [A44]. Электромагнитный метод при высокой чувствительности подвержен сильному влиянию радиочастотных помех и электрических разрядов от работающего оборудования на точность измерений ЧР; акустический способ, имеющий высокую помехоустойчивость от электромагнитных полей и хорошую разрешающую способность к обнаружению дефектного изолятора и в ряде случаев даже места дефекта, сочетается с малой чувствительностью; оптические и термографические методы эффективны только при отсутствии солнечной засветки и работают в определенном температурном интервале окружающей среды [A44]. Было установлено, что определенные характеристики ЧР могут служить основой для определения дефектов и их влияния на работоспособность оборудования. С этой целью уже в конце XX века было разработано помимо контактного способа, также несколько бесконтактных способов измерения характеристик ЧР (акустический, ультразвуковой, оптический, электромагнитный). Главным достоинством метода ЧР является принципиальная возможность контроля и диагностики текущего состояния оборудования, находящегося под рабочим напряжением. Однако вследствие неразработанности реальных методик сопоставления характеристик ЧР с параметрами дефектов в различных видах энергетического оборудования до начала XXI века контроль дефектности изоляционных конструкций и элементов, в основном, выполнялся только при вводе оборудования в эксплуатацию или после обнаружения каких-либо пробоев на специализированных стендах.

Дистанционные методы контроля с помощью ЧР нашли применение в основном только для диагностики силовых трансформаторов и кабельных линий

[25], [38], [26], [52], [53], [54], [55], в том числе газонаполненных и высокотемпературных сверхпроводящих линий [9]. Особенно это касается высоковольтных изоляторов, расположенных, как правило, высоко над землей. В этом случае до начала XXI века практически не использовались какие-либо способы дистанционной диагностики и только в начале первого десятилетия нового века были выполнены первые исследования.

В целом система современной технической диагностики и мониторинга высоковольтного энергетического оборудования состоит из нескольких функциональных подсистем, одной из которых является установление и последующее измерение на объектах электроэнергетики диагностических параметров. Именно от правильного выбора таких параметров будет зависеть надежность оценки технического состояния элементов высоковольтного оборудования.

Диагностические параметры (ДП) подразделяются на три вида [56]:

- параметры информационного вида ($X_{инф}$), представляющие объектную характеристику, т.е. используя ранее выполненные измерения ДП;
- параметры, представляющие текущую техническую характеристику (X_i), т.е. измеренные ДП в данный момент;
- параметры, представляющие собой производные нескольких однозначных параметров и имеющие прогностическую направленность в определении остаточного ресурса.

Поскольку для действующих высоковольтных систем чаще всего характерно отсутствие рабочей информации о состоянии объекта в момент его ввода в эксплуатацию, о проводившихся ранее регламентных работах, а также о нормированных значениях диагностических параметров, то в начале необходимо, на основе первоначальных испытаний, определить реальный набор ДП и способы его измерения.

При изложенных обстоятельствах стали актуальными создание и исследование дистанционного мониторинга технического состояния находящихся

в эксплуатации высоковольтных изоляторов и других диэлектрических элементов подстанций и линий электропередачи, установление их эксплуатационного ресурса посредством периодического дистанционного измерения и последующего анализа ряда диагностических параметров наиболее опасных дефектов посредством комплекса физических методов. При использовании уже разработанных способов комплексной диагностики работоспособности ВИ [56] необходимо было разработать определение таких важных диагностических параметров дефектов как: вид, место расположения, размер, скорость развития, степень влияния на дальнейшую работоспособность посредством периодического измерения разработанного набора характеристик ЧР, обеспечивающего получение значений диагностических параметров дефекта, а также способов их измерения и метрологического обеспечения [А10].

Методология и методы исследования

Объект исследования

Высоковольтные опорные и подвесные изоляторы в процессе эксплуатации.

Предмет исследования

Методы и средства неразрушающего контроля и диагностики технического состояния фарфоровых и полимерных высоковольтных изоляторов подстанций и линий электропередачи, находящихся в процессе эксплуатации.

Цель работы

Цель диссертационной работы состоит в решении важной научно-технической проблемы – повышении надежности энергетического оборудования (подстанций и линий электропередачи) и уменьшения потерь электроэнергии путем улучшения метрологических, технико-экономических и функциональных возможностей дистанционного контроля и диагностики высоковольтных изоляторов (ВИ) подстанций и линий электропередачи в процессе эксплуатации с оценкой технического состояния на основе анализа характеристик частичных разрядов.

Научная проблема

Разработка методологии дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации, прогнозирование срока их службы на основе изучения характеристик частичных разрядов, способствующее повышению функциональной надежности энергетического оборудования.

Для достижения цели и решения научной проблемы были поставлены следующие задачи:

1. На основе анализа результатов известных теоретических и экспериментальных исследований оценить наиболее характерные для ВИ подстанций и ЛЭП дефекты и неисправности, степень их влияния на работоспособность всей системы в целом, а также возможные способы контроля дефектов.

2. Разработать комплексную методику измерений характеристик частичных разрядов, основанную на использовании набора физических датчиков для контроля технического состояния высоковольтных изоляторов с последующим автоматизированным анализом и обработкой результатов по диагностическим признакам с целью выявления дефектов и неисправностей.

3. Разработать и внедрить в научно-исследовательскую практику испытательный стенд, позволяющий в лабораторных условиях выполнять изучение электрофизических процессов в различных диэлектрических материалах и изделиях под воздействием изменяемых высоких напряжений электромагнитным, акустическим, электрооптическим и другими датчиками.

4. Разработать и внедрить аппаратно-программный комплекс, позволяющий осуществлять дистанционный периодический контроль технического состояния находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов подстанций и ЛЭП в автоматизированном режиме на основе измерения характеристик ЧР.

5. Изучить взаимосвязи дефектов с характеристиками ЧР в ВИ, что позволит определять периодичность проведения мониторинга и прогнозировать их дальнейший срок службы.

6. Провести натурные испытания аппаратно-программного комплекса дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов, реализованного в виде системы комплексного мониторинга на реальных высоковольтных изоляторах, находящихся в условиях эксплуатации, и на этой основе разработать набор диагностических параметров для выявления вида и степени опасности дефектов и неисправностей.

Методы исследования

Использовался комплексный подход к измерению характеристик частичных разрядов в высоковольтных изоляторах, включающий применение системного анализа характеристик дефектов, которые были определены в ходе экспериментальных исследований, выполненных на оригинальных стендах и производственных объектах высоковольтной энергетики с использованием нескольких физических методов. Основные результаты получены с применением современных физических представлений о взаимодействии высокоэнергетических частиц (электронов и ионов) с диэлектрическими материалами. Для измерений и обработки результатов экспериментов был разработан оригинальный аппаратно-программный комплекс, осуществляющий в процессе мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов регистрацию сигналов частичных разрядов с датчиков, их оцифровывание, запись и обработку с помощью математического моделирования в среде LabView 14.

На защиту выносятся

1. Методики периодического дистанционного комплексного измерения одновременно электромагнитным и акустическим датчиками и анализа характеристик частичных разрядов, измерения напряженностей электрических полей электрооптическим датчиком, локализации положения дефектных изоляторов на подстанциях, повышающие информативность и достоверность оценки технического состояния высоковольтных изоляторов, путем сопоставления их с параметрами наиболее опасных при эксплуатации дефектов.

2. Разработанный испытательный стенд, включающий в себя аппаратный комплекс (различные физические датчики – электромагнитный, электрооптический, акустический), цифровой программный комплекс и регулируемый источник высокого напряжения, позволяющий комплексно и дистанционно определять и анализировать характеристики диагностических параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов.

3. Установленный набор диагностических параметров, включающий интенсивность, количество, смещение фазовых углов появления МЧР, форму и ширину импульсов МЧР, которые дают возможность определять техническое состояние ВИ в условиях эксплуатации.

4. Комплексный метод обнаружения и регистрации вида, места расположения и роста наиболее опасных дефектов путем дистанционного измерения повышенных напряженностей электрического поля, локально расположенных на поверхностях ВИ, и набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками.

5. Особенности дистанционного мониторинга ЧР в ВИ. Роль мощных ЧР в ускорении процессов старения ВИ.

Научная новизна

1. Разработана комплексная методика определения вида, места расположения наиболее опасных дефектов, позволяющая прогнозировать процессы деградации высоковольтных изоляторов путем периодической регистрации выявленных диагностических параметров.

2. Впервые изучены закономерности возникновения мощных частичных разрядов на дефектах в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации. Установлено, что главной причиной возникновения мощных частичных разрядов является векторное сложение напряженностей приложенного к ВИ электрического поля и поля, образованного предыдущими частичными разрядами на диэлектрических поверхностях дефекта.

3. Выполненное с помощью разработанного и изготовленного аппаратно-программного комплекса изучение набора диагностических параметров ВИ в

стендовом и полевом вариантах позволило развить новые представления о природе возрастания электрического поля в области дефекта за счет полей, индуцированных предыдущими частичными разрядами. Предположено, а затем экспериментально подтверждено, что индуцированные поля по напряженности могут значительно превосходить напряженности приложенных полей в энергетических высоковольтных системах, и таким образом приводить к ускоренной локальной деградации диэлектрических элементов в процессе эксплуатации.

4. Разработанный цифровой программный комплекс для определения различных характеристик ЧР, их изменений в зависимости от параметров дефектов и их развития позволил более достоверно оценивать техническое состояние ВИ.

Теоретическая значимость

Разработана физическая модель особенностей появления и динамики развития МЧР, позволяющая определять характер дальнейшего развития наиболее опасных дефектов высоковольтных изоляторов и тем самым оценивать их техническое состояние.

Практическая значимость

1. Предложена и протестирована методология периодического диагностирования (мониторинга) с помощью разработанного набора характеристик частичных разрядов с использованием нескольких датчиков различной физической природы и последующей математической обработки результатов измерений, позволяющая более точно по сравнению с существующими методами оценивать текущее техническое состояние высоковольтных изоляторов.

2. Разработанная методика мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов на основе детектирования и последующего анализа характеристик мощных частичных разрядов может быть применена для диагностики других конструкционных и технологических элементов высоковольтной энергетики.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректной постановкой исследовательских задач и их физической обоснованностью, применением в измерительном комплексе современной элементной базы, комплексным подходом к методам исследований, которая подтверждена сопоставимостью результатов, полученных в стендовом режиме, с результатами испытаний ВИ на подстанциях в условиях эксплуатации; корректной обработкой полученных результатов с использованием современных средств вычислительной техники; экспертизами ФИПС на разработанные способы и технические решения. Полученные результаты не противоречат выводам, полученным другими авторами.

Соответствие паспорту специальности

Работа соответствует специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды и отвечает следующим пунктам паспорта специальности.

Разработанные методики периодического комплексного дистанционного измерения одновременно электромагнитным и акустическим датчиками и анализа характеристик частичных разрядов, измерения напряженностей электрических полей электрооптическим датчиком, локализации положения дефектных изоляторов на подстанциях повышают информативность и достоверность оценки технического состояния высоковольтных изоляторов, путем сопоставления их с параметрами наиболее опасных при эксплуатации дефектов, что соответствует п. 1 паспорта специальности «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

Разработанный испытательный стенд, включающий в себя аппаратный комплекс (различные физические датчики – электромагнитный, электрооптический, акустический), цифровой программный комплекс и регулируемый источник высокого напряжения, позволяет комплексно и дистанционно определять и анализировать характеристики диагностических

параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов, что соответствует п. 3 паспорта специальности «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды» и п.6 паспорта специальности «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

Установлен набор диагностических параметров, включающий интенсивность, количество, смещение фазовых углов появления МЧР, форму и ширину импульсов МЧР, которые дают возможность определять техническое состояние ВИ в условиях эксплуатации, что соответствует п. 4 паспорта специальности «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды».

Разработан комплексный метод обнаружения и регистрации вида, места расположения и роста наиболее опасных дефектов путем дистанционного измерения повышенных напряженностей электрического поля, локально расположенных на поверхностях ВИ, и набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками, что соответствует п. 2 паспорта специальности «Разработка методологий прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса изделий, направляющих оптимизацию методов, приборов, систем контроля и диагностирования изделий, повышение надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

Установлены особенности дистанционного мониторинга ЧР в ВИ, что соответствует п. 1 паспорта специальности «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды».

Реализация и внедрение результатов

Результаты работы, реализованные в виде разработанной системы мониторинга технического состояния ВИ на подстанции, комплексной методики определения вида, места расположения и дальнейшего развития наиболее опасных дефектов, многопараметрического измерительного устройства использовались при выполнении хозяйственных, госбюджетных НИР и прикладных исследований в ОАО «Сетевая компания», г. Казань, и ПАО «Татнефть», г. Альметьевск.

Проведенные исследования поддержаны грантами РФФИ 17-48-160878, 18-08-00203, 20-38-90145, Президента Российской Федерации 075-15-2020-172, Госзаданием на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (номер темы 075-03-2022-151).

Результаты исследований используются в учебном процессе КГЭУ для подготовки бакалавров и магистров по реализуемым направлениям, а также аспирантами при проведении научных исследований.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационного исследования обсуждались и докладывались на Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016», г. Томск, 25–27 мая 2016 г., XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2016», г. Новосибирск, 3-6 октября 2016 г., IV Международном молодёжном

форуме «Интеллектуальные энергосистемы», Томский политехнический университет, г. Томск, 2016 г., IV Российской молодежной научной школе-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», Томский политехнический университет, г. Томск, 2016 г., XI Всероссийской заочной научно-практической конференции, г. Камышин, 25 октября 2016 г., Конференции NI Academic Days 2017, г. Москва, 13-14 апреля 2017 г., Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУР «Научная сессия ТУСУР–2017», г. Томск, 10–12 мая 2017 г., V Международном молодёжном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 9-13 октября 2017 г., VIII Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», г. Самара, 2–6 октября 2017 г., Международной конференции «Энергосбережение. Наука и образование», г. Набережные Челны, 28 ноября 2017 г., Научно-исследовательской конференции по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ - РТ, АН РТ, г. Казань, 2017 г., XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», г. Казань, 2017 г., XVIII Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан», г. Казань, 13-15 марта 2018 г., XVI международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки», г. Томск, 21 ноября 2018 г., IV Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», г. Казань, 6–7 декабря 2018 г., IV Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Кемерово, 19–21 декабря 2018 г., Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», г. Казань, 20–21 марта 2019 г., 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, г. Казань, 18-20 сентября 2019 г., V Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в

топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» г. Казань, 12–13 декабря 2019 г., Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», г. Сочи, 18-22 мая 2020 г., XII Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ-2020), г. Чебоксары, 5 июня 2020 г., Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, 27 – 30 апреля 2020 г., Международной молодежной конференции, приуроченной к 90-летию СГТУ имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов, 27-28 мая 2020 г., XVIII Международной научно-практической конференции преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов «Промышленное развитие России: проблемы, перспективы», г. Нижний Новгород, 2020 г., II Международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики», Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 2020 г., Международной научно-технической конференции молодых ученых, г. Белгород, 2020 г., Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация», г. Казань, 2021 г., Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения)», г. Иваново, 2021 г., II Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2021» (SES-2021), г. Казань, 2021 г., Международном симпозиуме «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE-2021», г. Казань, 18-19 февраля 2021 г., 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), г. Челябинск, 2021 г., XIV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС-2021), г. Чебоксары, 2021 г., Международной молодежной научной конференции «XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых), КНИТУ-КАИ, г. Казань, 2021 г.

Публикации результатов исследования

По теме диссертации опубликованы 75 печатных работ в журналах и сборниках, в том числе 11 статей в российских и зарубежных рецензируемых

научных изданиях, индексируемых в международных базах SCOPUS или/и Web of Science (и приравненных к изданиям, входящим в перечень ВАК), 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патент на изобретение, 4 патента на полезную модель, 5 свидетельств на программы для ЭВМ, 1 монография, и 39 работ в рецензируемых изданиях и сборниках материалов конференций.

Личный вклад автора

Диссертация является обобщением выполненных на кафедре «Промышленная электроника» КГЭУ исследований. Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в разработке общей методологии системы мониторинга, в разработке и создании методик измерения и измерительных устройств, аппаратно-программного комплекса, испытательного стенда, проведении полевых измерений характеристик ЧР на подстанциях. Диссертация выполнена с использованием результатов, полученных лично автором или при его активном участии в измерениях на подстанциях. В обследовании ВИ на подстанциях, а также в совместных публикациях принимали участие аспиранты кафедры ПЭ КГЭУ Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д., Галиева Т.Г. Постановка задач, направление исследований осуществлялось совместно с научным консультантом – заведующим кафедрой ПЭ, профессором А.В. Голенищевым-Кутузовым.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 285 страницах текста, включает 74 рисунка, 9 таблиц, библиографию из 229 наименований, содержит 8 приложений.

Автор выражает искреннюю благодарность коллективам кафедры «Промышленная электроника» и научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов электроэнергетики» КГЭУ за помощь и ценные замечания в ходе выполнения диссертационной работы.

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1. Дефекты в твердотельных диэлектрических материалах

Условия работы высоковольтного энергетического оборудования (высоковольтные линии электропередачи, подстанции и т.д.) значительно отличаются от тех, в которых работает изоляция электротехнического оборудования (особенно для высоковольтных изоляторов и проводов). Поэтому для использования в энергетическом оборудовании к изоляционным материалам предъявляются повышенные требования по электрической прочности и устойчивости к внешним воздействиям. Поскольку механизм электрического пробоя во многом определяется наличием и дальнейшим ростом дефектов, то рассмотрение проблем диагностики начинается с обсуждения физических свойств основных диэлектрических материалов, используемых для производства высоковольтных изоляторов, и наиболее опасных дефектов в них.

1.1.1. Керамические материалы (фарфор)

Одним из основных свойств диэлектрических материалов является способность к поляризации в электрическом поле, суть которой состоит в смещении связанных зарядов в направлении приложенного поля (электронная, ионная и молекулярная поляризация). Вторым свойством диэлектриков является высокое электрическое сопротивление ($10^6 - 10^{22}$ Ом·м), что обусловлено незначительным числом свободных зарядов.

Поскольку данная диссертация посвящена диагностике только высоковольтных изоляторов различных видов [57]: (линейные, штыревые, подвесные, опорно-стержневые, проходные), перекрывающие диапазон высоких напряжений от 10 кВ до 400 кВ, то в этой главе будут рассмотрены материалы и конструкции, уже нашедшие широкое применение или только начинающие

использоваться в высоковольтных линиях (ВЛ). К концу XX века основным материалом для изоляторов ВЛ был электротехнический фарфор (изоляционный фарфор, относящийся к классу керамических низкочастотных материалов). Его получают путем отжига смеси из специальной глины, кварцевого песка и полевого шпата. При отжиге (1450 °С) получается материал с незначительной закрытой пористостью, высокой механической прочностью (до 100 МПа), термостойкостью ($\sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ К}^{-1}$), электрической прочностью ($\sim 30 \text{ кВ/мм}$).

Как это ни покажется странным, но даже в последних монографиях [1], [3], [6], [7], [19], [18] не приведены необходимые данные по поведению фарфоровых изоляторов под приложенным рабочим напряжением и происходящих при этом процессах старения. Однако уже существует ряд зарубежных и отечественных исследований [18], [19], из обобщенных результатов которых можно сделать такие выводы:

- основным типом дефектов являются поверхностные и внутренние радиальные трещины;
- главными причинами перекрытий и пробоев являются перенапряжения (в том числе грозовые), нарушение контакта между фарфоровым телом и металлическими оконцевателями, загрязнение и увлажнение поверхности изоляторов в нормальном режиме эксплуатации.

Следует подчеркнуть, что выводы всех исследований основаны на комплексном контактном и бесконтактном определении дефектов и визуальном осмотре ряда фарфоровых изоляторов после их демонтажа из ВЛ.

В начале двухтысячных годов на кафедре промышленной электроники КГЭУ на изготовленном стенде было выполнено комплексное исследование реальных дефектов в модельных образцах электротехнического фарфора, возникающих в приложенном электрическом поле [23], [24], [58], [59], [60], [61]. Модельные образцы изготавливались в виде прямоугольных пластин из электротехнического фарфора с размерами 30x50x2 мм. Разрядная ячейка содержала два электрода: стержневого и плоского типов. Изучались разряды двух типов: пробой между электродом и изолятором с возможностью изменения толщины воздушного

промежутка между ними. В этом случае преобладает нормальная составляющая вектора напряжённости приложенного поля, что характерно при неполном контакте электрода с поверхностью изолятора, а также трещина внутри изолятора. При исследовании поверхностных трещин и сколов оба электрода располагались на одной поверхности образца по разные стороны сформированной трещины, что моделировало поверхностный пробой по поверхности (перекрытия). На модельных образцах путем детектирования разрядов, их анализа и построения амплитудно-фазовых характеристик (АФХ) и зависимости количества ЧР от фазового угла были изучены особенности возникновения и характеристики различных типов разрядов при пробое диэлектрика: ЧР, корона, стримеры, искровой и частичный разряды. Было показано, что положение искрового разряда после начала не зависит от фазы приложенного напряжения, в то время как ЧР возникают и заканчиваются прежде, чем напряжение достигает максимума, т.е. в первом и третьем квадрантах фазового диапазона, а начальные ЧР могут появляться по окончании второго и четвёртого квадрантов. Наличие дефектов в виде зазоров или трещин, заполненных воздухом, приводит к значительному увеличению интенсивности ЧР, а также сопровождается понижением значения напряжённости поля возникновения ЧР. Сами ЧР, не достигшие уровня искрового или дугового пробоя не вызывают какого-либо заметного увеличения дефектов.

В дальнейшем разработанная методика была перенесена на изучение особенностей ЧР от реальных высоковольтных изоляторов типа ИОС (изоляторы опорно-стержневые) и ЛК (изоляторы линейные подвесные). Результаты стендовых измерений показали идентичность импульсов ЧР от реальных изоляторов и импульсов ЧР от моделей при одинаковости дефектов, тем самым была подтверждена возможность использования характеристик ЧР для анализа дефектов в полимерных и фарфоровых изоляторах [62], [63]. Изученные особенности ЧР от наиболее характерных дефектов и разработанные модели возникновения одиночных ЧР в материалах из электротехнического фарфора впоследствии нашли подтверждение в более углублённой модели возникновения ЧР в воздушном промежутке электрод-диэлектрик [А5]. Как следует из выше

изложенного, к настоящему времени уже достаточно подробно исследованы особенности ЧР в фарфоровых изоляторах, связанные с возникновением перенапряжения в сети, грозовых эффектов или уменьшения электрической прочности.

Однако гораздо меньшее внимание было обращено на влияние загрязнений и последующего увлажнения на процессы перекрытия изоляции [62], [64]. Во многом это связано со сложностью и разнообразием физико-химических свойств загрязнений и увлажнённой поверхности. На практике решение этой задачи находят в создании более качественных изолирующих материалов и оптимизации по геометрическим параметрам конструкций, а также очистке изоляторов от скопившейся грязи. Поскольку натурные измерения на изоляторах при рабочем напряжении практически весьма сложны, то были выполнены только отдельные попытки изучения электрического пробоя на модельных изоляторах [63]. Так в работе [62] на основе экспериментального моделирования процесса разряда на диэлектрической пластине, покрытой жидким проводящим слоем, было обнаружено развитие поверхностного ЧР. При этом наблюдалось возникновение ветвлений, развивающихся вдоль поверхности разряда. Однако пока на наш взгляд, не установлено связи модельных экспериментов с реальными пробоями в высоковольтных загрязнённых и увлажнённых изоляторах, поскольку эксперименты [62] выполнялись при постоянном высоком напряжении.

Итак, главным результатом ранее проведенного изучения возможных дефектов являются следующие выводы [63]:

- преимущественные дефекты в фарфоровых изоляторах – это поверхностные трещины с шириной от 0,01 мм до 0,5 мм и поверхностные сколы, которые практически не изменяются под действием ЧР;

- изменение параметров указанных дефектов происходит в основном при переходе ЧР в искровой или дуговой разряды.

1.1.2. Полимерные материалы

Со второй половины XX века в электротехнике, а затем и в энергетике стали использоваться различные твердотельные полимерные материалы [65], в основном синтетические смолы, представляющие сложные смеси высокомолекулярных соединений. Линейно ориентированные молекулы высокополимерных материалов (макромолекулы) состоят из большого числа повторяющихся группировок, обладают гибкостью (например, резина). Сначала они получили распространение для изоляции кабелей, а затем постепенно из высокополимерных материалов стали изготавливаться изоляторы. Высокополимерные изоляторы обладают рядом несомненных достоинств и преимуществ по сравнению с фарфоровыми изоляторами: более высокая механическая прочность, повышенная стойкость к загрязнению и, как следствие, высокие разрядные характеристики. В России, в начале 90-х годов, высокополимерные изоляторы (ПИ) как подвесные, так и стержневые опорные были не только разработаны, но и стали выпускаться с характеристиками, соответствующие ГОСТ 1516.2-97 [34]. За рубежом (Франция, Германия, США и др.) выпускаются подобные изоляторы на напряжения до 500 кВ. По габаритам и установочным размерам ПИ в России унифицированы с фарфоровыми изоляторами типа «С» и могут применяться взамен последних. Конструкции ПИ различных фирм изготовителей принципиально не отличаются друг от друга. Основными элементами конструкции ПИ являются: стеклопластиковый стержень или труба, выполняющие функцию грузонесущего и изолирующего элемента: оребренная цельнолитая оболочка из атмосферно стойкой резины для защиты стержня от внешних воздействий и формирующая необходимую длину утечки: литые металлические фланцы – оконцеватели [34], [66].

Наиболее слабыми местами ПИ, в которых могут возникать дефекты в процессе эксплуатации [11], это наличие упругой деформации, присущей стеклопластику, причем конструкция в виде трубы позволяет обеспечивать большую устойчивость к деформациям, чем стержень: электрическая прочность

стеклопластиковой трубы, герметичность защитной оболочки и границы раздела «стержень-оболочка» и «оболочка-металлическая арматура». По-видимому, главной сложностью изучения ПИ является разнородность полимерных материалов, используемых для изготовления стержня/трубы и оболочки. В первом случае – это стеклопластики, состоящие из ориентировано расположенных стеклянных нитей (жгутов), пропитанных связывающими эпоксидными смолами, которые имеют пористую структуру, причем поры заполнены воздухом. Именно наличие пор в эпоксидном связывающем материале определяет начальный порог возникновения ЧР. Кремнийорганические, а также силиконовые резиновые композиты подвергаются воздействию атмосферных осадков, вследствие чего может возникать эрозия поверхностей, а под воздействием электрического поля – треки на границе «стержень-оболочка» и на самой оболочке. К сожалению, малочисленность исследований поведения ПИ в условиях эксплуатации не позволяет более полно проанализировать дефекты, возникающие под действием внешних воздействий [65], [34]. Поскольку полимерные материалы по своим физико-химическим и электрофизическим свойствам значительно отличаются от керамик, к которым относится и фарфор, то начиная с начала 90-х годов стали выполняться как теоретические [35], [36], [37], так и экспериментальные исследования [67], [58], [68], [69], по поведению полимерных материалов в сильных электрических полях и появлению в них ЧР. Причем до настоящего времени большинство работ касается только образования дефектов и их контроля различными контактными методами в модельных полимерных материалах [70], [57], [71], [72] и только несколько работ посвящено изучению состояния ПИ после эксплуатации [65], [34]. В большинстве работ на модельных образцах полимерных материалов рассматривался только один вид дефекта: внутренняя полость [73], [74]. По-видимому, первые исследования реальных ПИ типа ЛК были выполнены в работах [55], [56], [59], [71].

Как установлено рядом экспериментов [11], [66], [75], [76], электрическая прочность анизотропного стеклопластика в основном определяется физико-химическими свойствами эпоксидных смол, как связывающего материала.

Вследствие этого обстоятельства далее будут рассматриваться именно свойства эпоксидных смол, уже изученных в ряде работ по пробое полимерных материалов. В отличие от механического разрушения изоляторов при электрическом пробое, характерного для керамических материалов, для полимеров электрическим разрушением является возникновение проводящего канала в приложенном поле. Причем начало пробойного состояния состоит в зарождении частичных повреждений материалов в виде дендритной (древовидной) структуры. Основной причиной возникновения дендритной структуры и последующего разрушения однородного полимерного материала являются существующие газовые или проводящие включения, неоднородности структуры, создающие местное повышение напряженности поля, или обладающие более низкой электрической прочностью по сравнению с прочностью основного материала. Причем при малых размерах неоднородностей (менее десятка мкм, например, пор) в них не возникают ЧР и такие неоднородности не влияют на электрическую прочность [1], [77]. При больших размерах неоднородностей первичные ЧР в полимерах, в отличие от керамик, являются причиной расширения первоначального канала разряда с возрастанием дендритного состояния.

Поскольку электрическое разрушение имеет сложный временной характер, в том числе связанный с химическими процессами в объеме действия разряда, то неудивительно, что до настоящего времени не существует единой физико-химической электрической модели, адекватно описывающей данный процесс. На основе общих представлений о процессах электрического старения как главного фактора для полимеров [1], [78], [79], [37], [80], [81], старение можно, несколько условно, разделить на два временных этапа. Первый из них со временем τ_1 от начала приложения номинального рабочего напряжения до зарождения каких-либо первичных дефектов, например, для полимеров в виде первичных древовидных каналов [66]. Длительность первого этапа в нормальных условиях эксплуатации может соответствовать периоду в несколько лет без заметного снижения электрической прочности [11]. Такой временной интервал τ_1 характеризует проходящие под действием поля процессы, подготавливающие полимер к пробое:

инжектирование электронов с электродов, формирование и последующая эволюция объёмных зарядов разных знаков, ионизация полимерных молекул. Временные характеристики этих процессов различны. Присущую позиции различных процессов кинетику подготовки полимера к пробивному состоянию будут также определять ЧР и температура канала разряда. Так при достижении температуры $\sim 700 - 1000$ К происходит деструкция полимеров. Второй этап со временем τ_2 происходит от зарождения дендритов до пробоя и может варьироваться от 1 до 10^6 с и во многом определяется температурой (T). Пробой полимерной изоляции происходит в результате роста дендритов и последующего перекрытия межэлектродного промежутка дендритов. Причем в отсутствие ЧР каналы дендритной структуры являются непроводящими. Образование нового канала определяется разрушением диэлектрика, окружающего существующие каналы с характерным временем роста ($> 10^3$ с). Образование каналов можно рассматривать как незавершенный пробой, поскольку изолирующие свойства диэлектрика в этом случае нарушены. В процессе роста дендрита максимально возможная длина траектории разряда увеличивается и соответственно возрастает величина наблюдаемых разрядов. Максимальная величина разрядов увеличивается с ростом мгновенного значения прикладываемого напряжения, т.е. от фазы напряжения и пропорциональна амплитуде ЧР [3], [82], [83].

1.2. Электрофизические процессы в диэлектрических материалах

Зарождение дефектов в изоляции под действием электрических полей и влиянием факторов окружающей среды (влажность, резкие градиенты температур, запыленность) в условиях эксплуатации является процессом нарушения сплошности материалов (трещины, полости, нарушение контакта металл–диэлектрик), что приводит к возникновению локальных электрических разрядов, шунтирующих часть изоляции. Такие разряды получили название частичных разрядов. ЧР сопровождаются акустическим, оптическим, электромагнитным и тепловым излучением (рис.1.1).

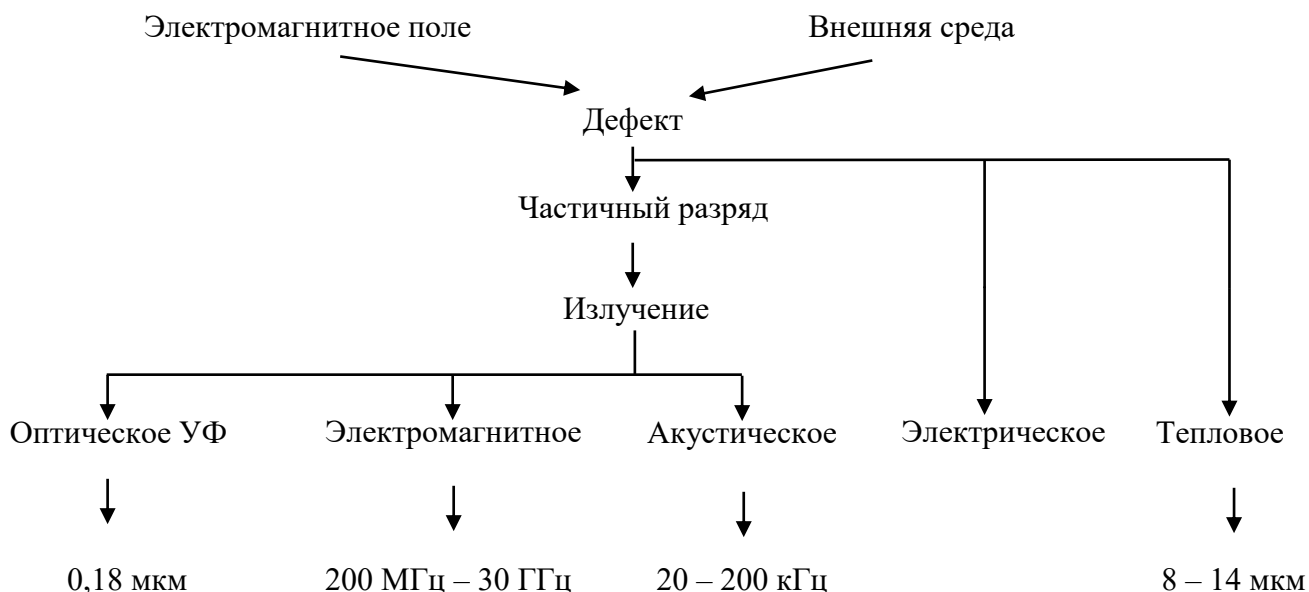


Рис. 1.1. Регистрация дефектов в изоляторах физическими методами

Основой различных методов обнаружения дефектов ВИ является измерение характеристик частичных разрядов. Измерения ряда параметров излучений ЧР являются основой для различных методов регистрации характеристик дефектов. За исключением метода регистрации теплового излучения все другие методы: акустический, оптический и электромагнитный основаны на регистрации излучений, генерируемых электрическими разрядами [84], [85], [86], [87], [88], [89], [15], [90]. Возникновение ЧР происходит вследствие локального повышения напряженности электрического поля на поверхности или внутри объема диэлектрика, превышающего электрическую прочность, а также в местах с пониженной электрической прочностью. Моменты возникновения ЧР имеют стохастический (вероятностный) характер, поскольку сами ЧР являются результатом влияния эксплуатационных и природных воздействий. Возникающие ЧР проявляются в электрической цепи высокого напряжения в виде импульсов тока, а в окружающем пространстве изолятора – импульсов напряжения в широком временном интервале вплоть до 10^{-11} с. Длительность импульсов зависит от многих факторов: структуры материала изоляции, особенности высоковольтной конструкции, размера дефекта. В твердых диэлектриках, согласно

экспериментальным данным [91], время нарастания интенсивности до максимума составляет порядка нескольких наносекунд, а общая длительность импульса достигает десятков нс. При регистрации импульсов ЧР контактным способом [91] наблюдались две разновидности ЧР, затухающие колебательным образом и затухающие равномерно или экспоненциально.

Уже с начала 90-х годов стали разрабатываться два способа контроля и диагностики дефектов по характеристикам ЧР. В первом из них [21], [22], [54], [26], [58] для изучения параметров дефектов предполагалось использовать характеристики отдельных ЧР: спектральный состав, форму и их изменения в зависимости от дефекта. Хотя и были разработаны способы выделения одиночных импульсов из шумов, в том числе вейвлет-преобразованием, и по нему выполнять оценку параметров импульса, но до настоящего времени, судя по прошедшим публикациям, никакой привязки к характеристикам реальных дефектов не было достигнуто. Тем не менее, исследование спектрального состава отдельных электромагнитных импульсов позволяет в принципе выделять наиболее пригодные для детектирования ЧР спектральные полосы. С меньшим количеством промышленных помех выбирать спектральную ширину приемного тракта для увеличения отношения сигнал/шум, что особенно важно при построении АФХ и зависимости количества ЧР от фазового угла.

Во втором случае ГОСТом Р 55191-2012 (МЭК 60270:2010) предусмотрено измерение только контактным способом на стенде двух основных характеристик отдельных ЧР: кажущийся заряд (интенсивность) и напряжение его возникновения, а также при необходимости нескольких дополнительных характеристик ЧР: скорость и частота повторения, средний ток и мощность. Как показали эксперименты, этих характеристик недостаточно для оценки технического состояния ВИ в процессе эксплуатации [92]. Как отмечается в указанном ГОСТе максимально допустимое значение какой-либо характеристики ЧР, при большой номенклатуре электротехнических изделий, устанавливается дополнительным отраслевым нормативом на оборудование конкретного типа. Однако пока технические нормативы для ВИ не разработаны. Практически и в наши дни

повреждения ВИ в виде видимых трещин, сколов, пробоев определяются на работающем оборудовании в основном визуально, причем с учетом того, что дефекты миллиметровых размеров по-разному влияют на дальнейшую работоспособность ВИ в зависимости от материала, размеров и приложенного высокого напряжения [63].

В современных условиях возникла существенная необходимость дистанционного бесконтактного контроля технического состояния высоковольтного оборудования, особенно ВИ, на что неоднократно указывалось в ведомственных документах [10], [38]. Однако до сих пор нет нормативных материалов по дистанционному контролю ВИ, а существуют отдельные попытки использования для контроля энергетического оборудования различных методов измерения ЧР, причем в основном для контроля силовых трансформаторов [26], [54], [63].

Ранее в ряде работ [93], [94] предполагалось, что амплитуда (интенсивность) ЧР q на дефекте в виде полости, заполненной газом, главным образом определяется разностью значений критического поля пробоя до разряда E_a и остаточного поля после разряда E_r

$$q = C (E_a - E_r) d, \quad (1.1)$$

где C - емкость разрядного промежутка, d - ширина полости.

Однако практически в те же годы было показано, что при оценке величины q и других характеристик ЧР необходимо учитывать влияние перераспределения зарядов на поверхностях диэлектрика, образующих полость [95], [96]. При малых толщинах полостей возникают в основном нормальные разряды (рис. 1.2), каналы которых ориентированы вдоль приложенного поля. При малой длине канала разряда, сами разряды не могут создавать на диэлектрических поверхностях вторичных электрических полей, достаточных для возникновения тангенциальных полей вдоль поверхностей диэлектрика (рис. 1.3).

Как известно [20], такие поверхностные частичные разряды (ПЧР) в воздухе могут возникать при плотности осевшего заряда $q \geq 10^{-10}$ Кл/мм². В частном случае при воздушной полости, расположенной между электродом и диэлектриком, ширина полости необходимая для возникновения ПЧР, определяется следующим эмпирическим выражением [20] (рис. 1.3)

$$\Delta_{гр} \geq - 2,8 [d / \epsilon_u]^2 + 3,3 [d / \epsilon_u] - 0,05 \quad (1.2)$$

где d - толщина полости.

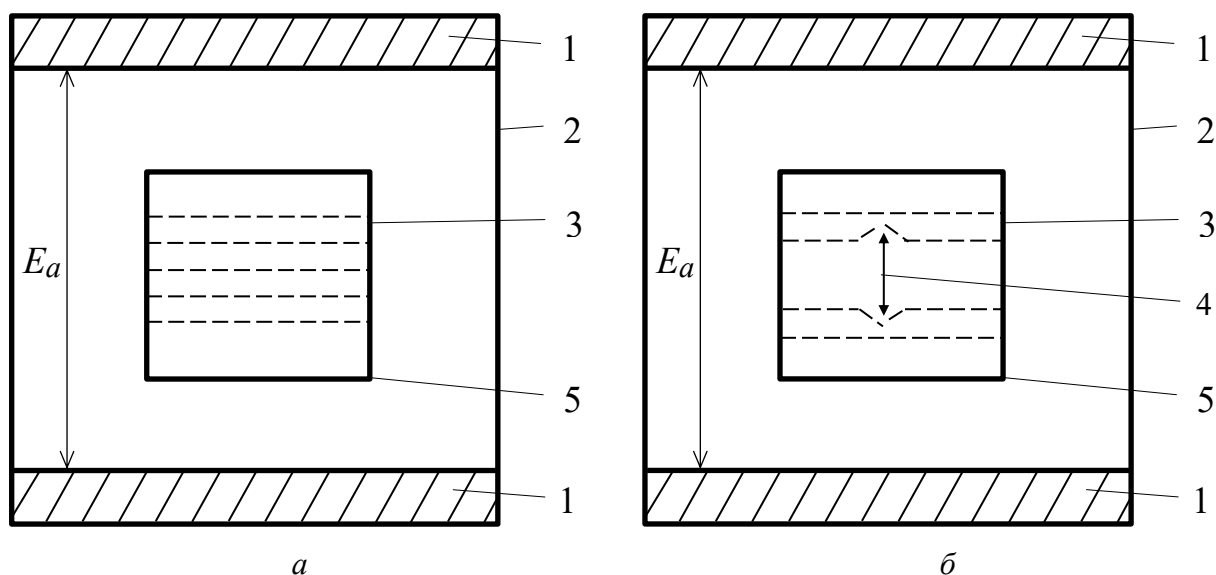


Рис. 1.2. Распределение электрического поля в полости при возникновении ЧР:

a – в отсутствии ЧР; b – при ЧР;

1 – металлические электроды; 2 – диэлектрик; 3 – полость; 4 – искажение силовых линий при возникновении ЧР; 5 – поверхности диэлектрика, на которых при ЧР оседают заряды

Поскольку для ВИ в выражении (1.2) преобладающим является второй член, то приближенно критическая ширина полости прямо пропорциональна толщине диэлектрика, и, следовательно, возникновение ПЧР наиболее вероятно для дефектов, находящихся вблизи фланцев. ЧР возникают в виде импульсов тока с продолжительностью до 10^{-10} - 10^{-11} с и имеют частотный интервал от кГц до ГГц.

Верхний предел спектра колебаний в ЧР пока установлен при частоте 33 ГГц, что, по-видимому, не предельная частота [23].

В последующих работах [59] процесс возникновения ЧР был смоделирован на дефекте (рис. 1.3, 1.4), образованном между металлическим электродом и плоским диэлектриком с воздушным зазором между ними. Было предположено, что при приложении высоковольтного переменного поля в воздушном зазоре возникают ЧР. Сами ЧР имеют двухстадийный характер: на первом этапе в воздушном зазоре между металлическими электродами, а на втором вдоль поверхностей диэлектрика (поверхностный частичный разряд - ПЧР). Авторы [91] для его описания использовали систему уравнений, представляющих одновременное перемещение зарядов и изменение напряжения комплексных электрических полей (1.3).

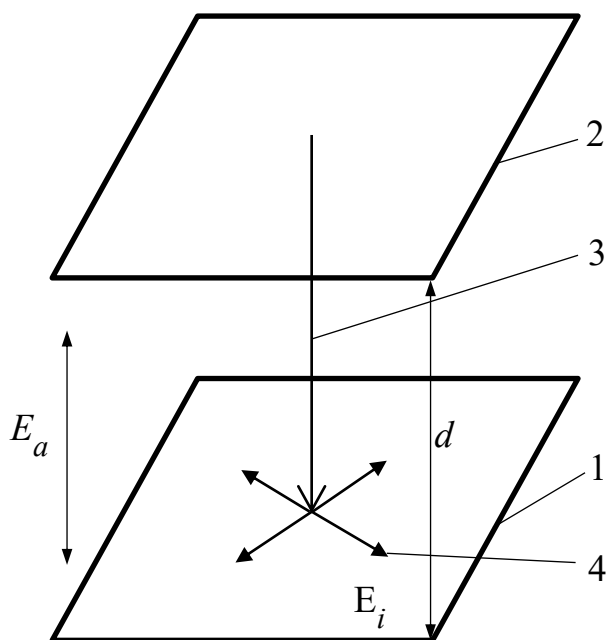


Рис. 1.3. Схема разрядов на дефекте в виде полости на границе «стержень-оконцеватель»: 1 – границы диэлектрика с полостью; 2 – граница оконцевателя; 3 – ЧР между границами полости; 4 – поверхностные ЧР вдоль поверхности

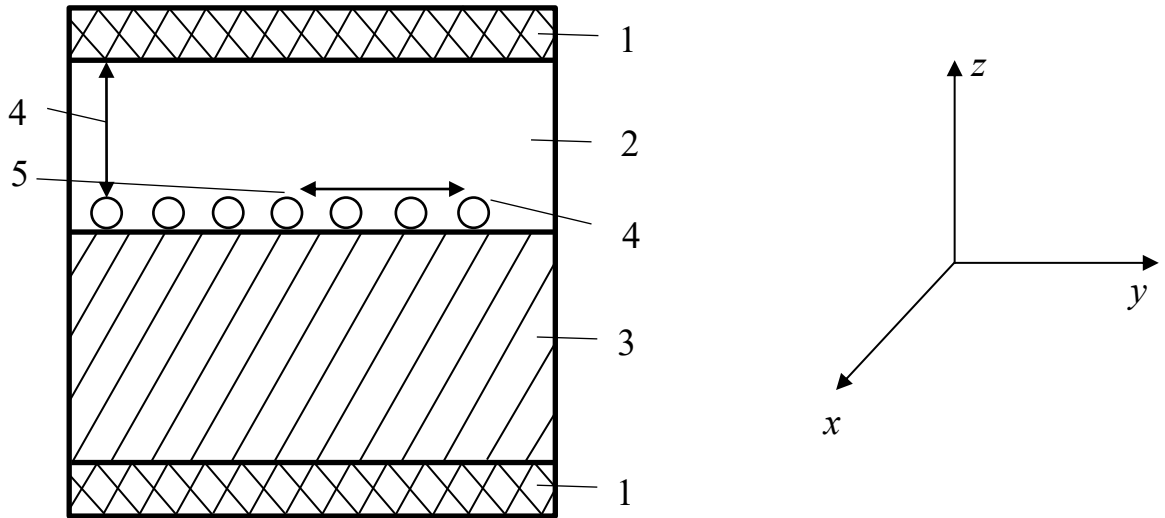


Рис. 1.4. Электродная структура симуляции ЧР:

1 – электроды, 2 – полость, 3 – диэлектрик, 4 – первичные ЧР (стримеры), 5 – ПЧР

Временные изменения плотностей заряда для электронов N_e , положительных ионов N_p , отрицательных ионов N_n и скорость дрейфа для электронов W_e , положительных W_p и отрицательных W_n ионов, подвижностей электронов, положительных и отрицательных ионов соответственно M_e, M_p, M_n , описываются следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dN_c}{dt} &= N_e \alpha / W_e - N_e \eta / W_e - N_e N_p \beta - \nabla(N_e W_e - D \nabla N_e), \\ \frac{dN_e}{dt} &= N_e \alpha / W_e - N_e N_p \beta - N_n N_p \beta - \nabla(N_p W_p), \\ \frac{dN_n}{dt} &= N_e \eta / W_e - N_n N_p \beta - \nabla(N_n W_n), \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$W_{e,n,p} = \mu_{e,n,p} E,$$

где α, β, η, D соответственно коэффициенты ионизации, поглощения, рекомбинации и диффузии электронов; коэффициенты рекомбинации $\eta = 2 \times 10^{-7}$

принимаются одинаковыми для процессов взаимодействия, положительный ион - электрон, положительный ион - отрицательный ион.

В данной системе уравнений диффузия ионов много меньше, чем электронов и, следовательно, α и W_e определяются только как E_K/N , где E_K – локальное электрическое поле и N – плотность газа в полости.

Электрическое поле, контролирующее перемещение зарядов, было представлено посредством решения уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{e}{\varepsilon \varepsilon_0} (N_p - N_n - N_e), \quad (1.4)$$

где φ – потенциал электрического поля, e – заряд электрона, $\varepsilon \varepsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость.

Следовательно, решение данной задачи должно быть связано с перемещением первоначально ионизированных частиц вдоль оси z до достижения ими свободной поверхности диэлектрика, а затем и перемещения вдоль диэлектрической поверхности (рис. 1.3).

В данном рассмотрении учитывалось, что поверхностная проводимость диэлектрика близка к нулевой и, следовательно, распределение зарядов на поверхности не изменяется после окончания ЧР до возникновения последующего разряда. Таким образом, в каждый момент времени приложения переменного поля его напряженность E_a складывается (вычитается) в зависимости от соотношения его знака с полем зарядов и следующий ЧР возникает, когда это общее поле E_t будет превосходить критическое поле E_B [97].

$$E_t = (\pm E_a + E_i) > E_B \quad (1.5)$$

Электрический пробой воздушного промежутка внутри полости возникает при напряжении V_B , значение которого описывается при нормальном атмосферном давлении следующим эмпирическим уравнением [91].

$$V_B = 24,41 (\rho d) + 6,73 \sqrt{\rho d}, \quad (1.6)$$

где ρ - плотность воздуха, d - размер (толщина) полости.

Электрическое поле E_B для пробоя составляет при таких условиях ≈ 7 кВ/мм.

Полярность ЧР соответствует направлению дрейфа положительных или отрицательных зарядов. Положительные разряды и токи в импульсах создаются положительными зарядами во время разрядного дрейфа их вдоль оси z . В результате такого дрейфового тока на поверхности диэлектрика в области разряда возникает более высокая плотность положительных зарядов по сравнению с остальной поверхностью, не охваченной ЧР. В условиях положительного полупериода приложенного напряжения поле зарядов будет уменьшать его значение, а последующий ЧР будет происходить вне области предыдущего ЧР, что создает флуктуации интенсивности ЧР. При таком процессе на поверхности диэлектрика может возникать сильное радиальное поле (тангенциальное поле вдоль осей x и y). Если площадь предыдущего ЧР была велика в общей поверхности диэлектрика, то область последующего ЧР будет малой, как и интенсивность. Это утверждение справедливо и для противоположного случая. Изменение структуры заряда на поверхности диэлектрика после каждого ЧР является не только главной причиной стохастичности ЧР, но может быть причиной возникновения ПЧР. Поскольку наибольшее изменение напряженности поля на поверхности при ЧР возникает вблизи канала ЧР (рис 1.2), а затем экспоненциально спадает, то при $E_t = (\varphi_1 - \varphi_2) / \Delta > E_B$ может возникать ПЧР.

Дефект в ВИ можно представить, как локальное нарушение электрической прочности диэлектрического материала, определённое в виде полости или неоднородности материала. При достижении воздействующего на дефект

переменного напряжения, превышающего электрическую прочность, возникает разряд на дефекте [92]. Разряд носит кратковременный характер.

На основе ранее разработанных модельных представлений о механизмах электрического пробоя в диэлектриках, процесс возникновения ЧР в приложенном к изолятору переменном электрическом поле определяется одновременным или последовательным протеканием нескольких локальных процессов: ионизацией, дрейфом и рекомбинацией возникших в ходе ионизации электронов, образованием положительных и отрицательных зарядов на границах дефекта. Причем величина и знак последних определяется значением напряженности и знаком приложенного поля. Следовательно, с ростом напряженности E_a в положительной фазе ($0-180^\circ$) или отрицательной фазе ($180^\circ-360^\circ$) возникают ЧР при превышении E_a порога электрической прочности (E_B) в области локальной неоднородности. При образовании ЧР его энергия расходуется на работу по расширению канала разряда, на потери нерезонансного излучения, теплоотвод и ионизацию [98]. Быстро протекающий процесс расширения канала разряда способствует образованию микротрещин и деструкции диэлектрика в области разряда, приводящие к уменьшению электрического сопротивления, и, следовательно, к понижению электрической прочности диэлектрика в области первоначального разряда. Поэтому предполагалось, что ЧР могут сами непосредственно влиять, помимо внешних воздействий, на срок службы изоляции, а увеличение интенсивности и количества ЧР, как и понижение порогового поля пробоя могут свидетельствовать о степени старения изоляции [95].

1.3. Особенности детектирования частичных разрядов

Частичные разряды создают временный пробой изоляции с размерами $10 \leq l \leq 10^4$ мкм [99], [100], [101]. Процесс ЧР сопровождается излучением импульсов высокочастотного электрического поля [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], спектральный состав которых расположен в интервале

$10^6 \leq f_{\text{эм}} \leq 10^{16}$ Гц. Одновременно возникает пульсирующее излучение акустических волн в воздушное пространство, окружающее области ЧР в спектральном интервале $20 \text{ Гц} \leq f_a \leq 200 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ [A12].

Поле излучения от любых источников, характеризуется тремя параметрами с размерностями длины: масштабом источника излучения (l), длиной волны (λ), расстоянием от источника излучения (L). Эти параметры являются основой классификации самих источников и создаваемых ими полей [109].

При выполнении условий $l \ll \lambda$ область ЧР можно рассматривать как точечный сосредоточенный источник излучения, генерирующий сферические волны. Параметр L/λ определяет характер излучаемого поля в зависимости удаления от источника. Для электромагнитных волн на расстояниях $L < \lambda$ поле излучения представлено квазистатическими полями (поля индукции), быстро убывающими в зависимости как L^{-2} или L^{-3} . На больших расстояниях $L \gg \lambda$ с учетом условий дифракции Фраунгофера

$$L \geq 2 l^2 / \lambda \quad (1.7)$$

затухание волн убывает как L^{-1} . Эту область определяют как волновую зону (иногда называющиеся дальней зоной), содержащую чисто бегущие волны, переносящие энергию [A12].

Для акустических волн режим излучения при $L < \lambda$ обуславливается интерференцией звуковых колебаний, приходящих в данную точку среды от отдельных участков излучателя, которые усредняются при расстояниях $L > \lambda$.

С учетом существующих приемников электромагнитных сигналов в частотном диапазоне 1-100 МГц и акустических приемников (20 Гц-100 кГц) их волновые зоны находятся в пределах расстояний (L), соответствующих длине волн электромагнитных и акустических колебаний.

Электромагнитные волны $L_{\text{волн}} \geq 3 \text{ м}$ ($f = 100 \text{ МГц}$).

Акустические волны $L_{\text{волн}} \geq 1$ см ($f = 100$ кГц).

Большая разница значений $L_{\text{волн}}$ связана со значительным в несколько порядков различием в скоростях распространения электромагнитных и акустических волн.

Использование электромагнитных и акустических волн, излучаемых ЧР, наиболее эффективно именно в волновой зоне, где наблюдаются наименьшие изменения в затухании при пространственном перемещении электромагнитных или акустических датчиков [A12]. Более того, в волновой зоне выполняется условие (1.7) для представления ЧР в виде сосредоточенного источника.

Выбор частотного интервала регистрируемых электромагнитных и акустических сигналов ЧР в основном определяется несколькими факторами помимо волновой зоны: шумами и излучениями окружающего энергетического оборудования, внешней среды, ростом затухания электромагнитных и акустических волн с повышением частоты, уменьшения интенсивности сигналов ЧР с частотой и рядом более экзотических факторов. Интенсивность электромагнитного поля E_0 , согласно современной теории антенн для волновой области, можно представить в виде [109]:

$$E_0 = k^2 I l / L \omega \varepsilon, \quad (1.8)$$

где k – волновой вектор, равный $2\pi/\lambda$, L – расстояние между дефектом и антенной, λ – длина волны, I – ток через разряд, ω – частота излучения, l – длина полости дефекта.

На акустические измерения наибольшее влияние оказывают непрерывные шумы, доминирующие в низкочастотной области (20 Гц – 20 кГц), которые возникают от колебаний (вибраций) промышленного оборудования, и переходные (нестационарные) шумы, создающиеся потоками воздуха, ударами ветра, дождя и снега. Верхний частотный предел ограничивается квадратичной зависимостью затухания от частоты. Вследствие этих пределов наиболее эффективным с точки

зрения чувствительности и выделения акустических сигналов из шумов – является интервал 35-45 кГц при измерении акустических сигналов на расстояниях до 10 м от источника ЧР разрядов.

С учетом наиболее существенных низкочастотных (50-150 Гц) и высокочастотных электромагнитных помех (50-200 МГц и выше 800 МГц) наиболее предпочтительными интервалами для детектирования электромагнитных сигналов от ЧР являются полосы 20-50 МГц и 400-600 МГц [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119].

Для регистрации электромагнитного и акустического сигналов от ЧР используют разнообразные приёмные антенны, наиболее важными параметрами которых, во-первых, являются пространственная избирательность, то есть способность принимать волны в одних направлениях в большей степени, чем в других, и чувствительность т.е. минимально обнаруживаемый сигнал на фоне шумов [120], [121], [122].

В режиме приёма акустических или электромагнитных волн в волновой зоне характеристики их направленности (или диаграммы направленности), т.е. угловое распределение величины принимаемого сигнала от направления прихода сферической волны, имеют много общего. Они представляются одним и тем же соотношением параметров антенны l и длины волны принимаемых сигналов

$$\theta \sim \lambda / l, \quad (1.9)$$

где θ – угол, отсчитываемый от направления максимального излучения до направления с излучением, равный 0,7.

Вторым параметром является коэффициент концентрации принимаемого излучения (K), пропорциональный отношению ёмкостей на выходе направленной и ненаправленной антенны при условии равенства чувствительности приёмников излучения. В первом приближении чем больше волновые размеры антенн, определяемые как отношение максимального геометрического размера (l) к длине

волны (λ), тем уже угловая направленность и тем больше коэффициент концентрации.

$$K=4\pi S/\lambda, \quad (1.10)$$

где S – площадь антенны.

Для антенны параболической формы, собирающей излучение в фокальной точке, дополнительное усиление интенсивности поступающего излучения имеет вид:

$$K = F / \lambda \sin(\theta / 2), \quad (1.11)$$

где F – фокусное расстояние, θ – угол сжатия волнового фронта.

При указанных выше частотных интервалах для электромагнитных волн ($f=600$ МГц) и акустических волн $\lambda_{\text{ЭМ}}=560$ см и $\lambda_{\text{а}}=8$ мм, угловое разрешение для акустических антенн почти на два порядка меньше, чем для электромагнитных при близких параметрах параболических антенн.

1.4. Физические методы контроля дефектов

В настоящее время отсутствуют какие-либо нормативные документы, регламентирующие контроль наличия дефектов с помощью ЧР, измерения их параметров и влияния на техническое состояние ВИ, находящихся под высоким напряжением. Согласно последнему ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) [4] и Международному стандарту IEC 60060-1(2010) [3] предусматриваются только периодические испытания высоковольтного энергетического оборудования с выводом из эксплуатации [А9]. В основу определения параметров дефектов и их влияния на работоспособность изоляции положен электрический контактный метод измерения характеристик ЧР с помощью специализированных для каждого

вида оборудования стендов с использованием регулируемых источников высокого напряжения.

1.5. Оптические методы контроля

Как уже отмечалось, электрические разряды на дефектах сопровождаются широким спектром электромагнитного излучения от радиодиапазона до ультрафиолетового диапазона. Характер оптического излучения весьма разнообразен. С учетом ограничений при детектировании оптических сигналов (прямой видимости объекта изучения высоковольтного изолятора, малым количеством окон прозрачности атмосферы, засветки принимаемого сигнала солнечным излучением) на практике наибольшее применение для оптической локации нашли методы, использующие УФ диапазон 0,2 – 0,4 мкм [123], [124], [125]. Именно этому диапазону соответствует максимальная интенсивность фотонов, излучаемых электрическими разрядами. Наблюдение и контроль за дефектами можно осуществлять с использованием фотоэлементов, фотоэлектронных умножителей и электронно-оптических преобразователей. В последнее время для этих же целей стали использовать матричные фотоприемники на основе полупроводниковых элементов с зарядовой связью. Высокие пространственные и временные разрешающие способности, ограниченные только дифракционной расходимостью, низкий порог чувствительности и другие достоинства УФ приемников были использованы при создании целого класса ультрафиолетовых дефектоскопов, позволяющие осуществлять в реальном времени дефектоскопию различных типов высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением. В России к подобному типу приборов относится серия «Филин» (рис. 1.5).

Принцип работы электронно-оптического дефектоскопа иллюстрируется блок-схемой, представленной на рис. 1.5. Оптические изображения изоляции (И), поверхностного частичного разряда и коронного разряда, проходя через светофильтр (СФ) с полосой пропускания в коротковолновой части оптического спектра, формируются входным объективом (О1) на фотокатоде (ФК) электронно-

оптического усилителя света (ЭОП) с микроканальной пластиной (МКП). Оптические сигналы усиливаются более чем в 20000 раз. Так как «Филин-6» выполнен на телеобъективе из кварцевого стекла, имеющего почти 100% пропускания в УФ области спектра, причем на экране видны не только разряды, но и хорошо различимые контуры оборудования, то это позволяет точно определять местонахождение дефектов.

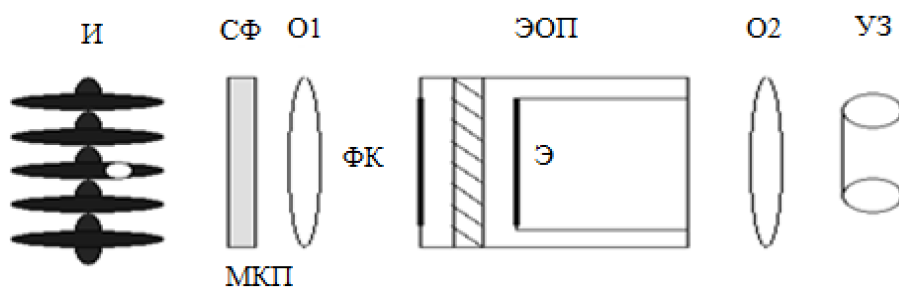


Рис. 1.5. Блок схема устройства Филин-6

Еще один тип подобных устройств – камеры *DayCor* (рис. 1.6) служат для обнаружения коронных разрядов и электрических дуг в условиях дневного и ночного освещения.

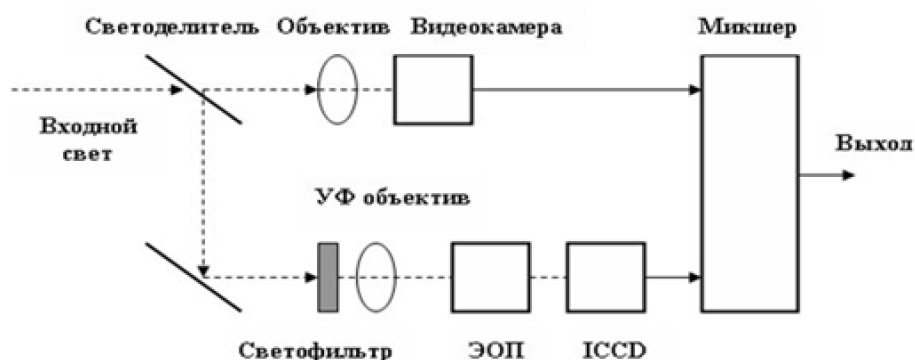


Рис. 1.6. Блок схема устройства *DayCor*

Высокая чувствительность и узкое поле зрения камер *DayCor* дают возможность производить диагностику с расстояния до 150 метров. УФ камеры приспособлены для работы в условиях плохой погоды. Наблюдения за объектами

могут проводиться в условиях густого тумана и мелкого дождя. УФ камеры *DayCor* позволяют легко и быстро обнаруживать местоположение источников короны, порождаемых разрядами на линиях электропередач и промышленном оборудовании (рис. 1.7). Позволяют осуществлять регулярный мониторинг полимерных, фарфоровых и стеклянных изоляторов на линиях высокого напряжения непосредственно в процессе эксплуатации.

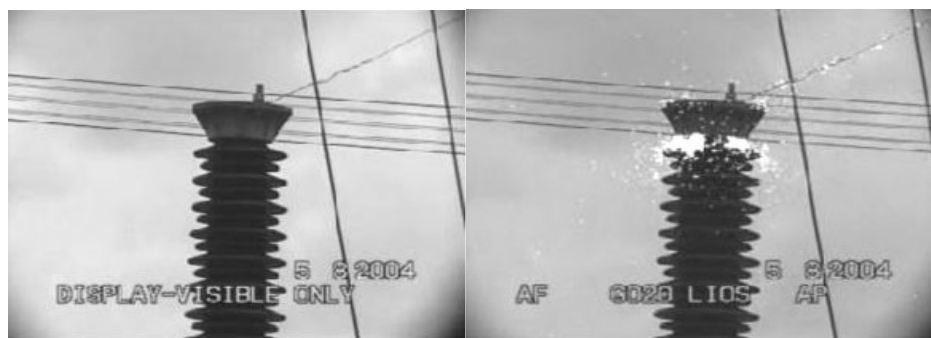


Рис. 1.7. Формирование изображения в камере *DayCor*

Среди зарубежных оптико-электронных приборов подобного типа следует отметить линейку приборов международной фирмы *UVIRCO technologies* – серия *Coro CAM* – позволяет выполнять исследования состояния в ультрафиолетовом и видимом диапазонах, а также сохранять в памяти полученные изображения. Трехспектральная камера *MultiCAM* позволяет регистрировать изображения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах. На рис. 1.8 представлено изображение, получаемое с помощью камеры *MultiCAM* в ультрафиолетовом (совмещенном с видимым) спектре, тепловом и совмещенном ультрафиолетовом и инфракрасном спектрах.

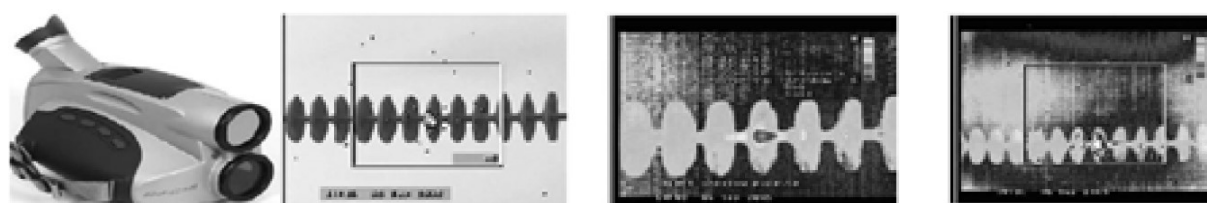


Рис. 1.8. Устройство *MultiCAM* и формируемые им изображения

В последнее время усилия разработчиков направлены на разработку новых способов оптической локации в УФ диапазоне 0,2 мкм, где солнечное излучение слабее, поскольку оно эффективно рассеивается атмосферой.

1.6. Методы теплового контроля

Данный метод базируется на регистрации температурного (инфракрасного) излучения изоляции. Возникновение ЧР на дефектах изоляции сопровождается излучением электромагнитных волн в различных частотных диапазонах [126], [127]. Одновременно происходит временная деградация материала в области дефекта [128], [129], [129], сопровождающаяся выделением тепла и нагревом, который является объектом измерения. С учетом температуры контролируемого высоковольтного изолятора, степени увлажненности и загрязненности в определенных случаях тепловизионный метод позволяет обнаруживать дефекты с высокой разрешающей способностью (до нескольких мм) и градиентом температуры на дефекте порядка 0,05 – 0,2 °С, причем минимальная обнаруживаемая разность температур достигнута только при работе в режиме накопления сигнала. В основу метода обработки термографической информации положен принцип определения наиболее вероятного значения температуры поверхности изолятора, поскольку в реальных условиях эксплуатации изоляторов в энергетическом оборудовании разброс температур может колебаться в пределах (+ 50 °С – 40 °С). Метод позволяет вводить критерии оценки технического состояния изоляционных элементов оборудования при различных температурах окружающей среды [130].

На рис.1.9 приведен пример работы тепловизора марки *Flir ThermaCAM S65* при диагностике изолятора с сильной степенью повреждения со сквозной эрозией оболочки и прямым доступом влаги в изолятор. При данном повреждении условия нагрева и возникновения коронных разрядов на изоляторах могут меняться в зависимости от степени увлажнения поврежденной части изолятора за счет прямого доступа влаги.

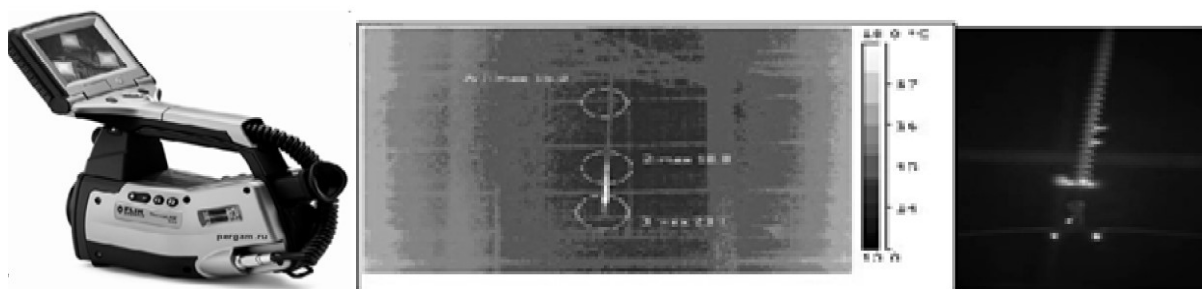


Рис. 1.9. Устройство *Flir ThermaCAM S65* и формируемые им изображения

Впервые в России метод инфракрасной и ультрафиолетовой спектроскопии был применен при стендовых испытаниях снятых с эксплуатации высоковольтных полимерных изоляторов марок ЛК 70/220 и ЛК 120/330, имеющих дефекты [8], [11], [131], [132], [133]. Программа стендовых испытаний включала длительное приложение к изоляторам переменного напряжения, равного номинальному 220 кВ и 330 кВ соответственно, контроль состояния методами ИК и УФ спектроскопии позволил выявить области повышенного нагрева градиентами температур порядка 0,5 – 5 °С. На следующем этапе [132], используя результаты лабораторных испытаний, были выполнены обследования таких же полимерных изоляторов, находящихся под рабочим напряжением. Было установлено несколько дефектных изоляторов, нуждающихся в замене. После демонтажа осмотр поврежденных изоляторов полностью подтвердил достоверность диагностики. К недостаткам термооптической диагностики можно отнести невозможность изучения начальных дефектов изоляторов. Возможна только разбраковка изоляторов по признаку годности.

1.7. Методы электромагнитного контроля и регистрации ЧР

Электромагнитные эффекты ЧР возникают из-за импульсов тока частичного разряда, приводящих к излучению электромагнитной волны в высокочастотном диапазоне. Электромагнитные волны, генерируемые сигналами частичных разрядов, распространяются через диэлектрические материалы, окружающие

источник частичных разрядов. Эти сигналы могут регистрироваться различными антеннами или преобразователями (датчиками). Короткие времена нарастания импульсных токов частичных разрядов (<1 нс) возбуждают электромагнитные волны в диапазоне от ВЧ до УВЧ (от 3 МГц до 3 ГГц) и превышают его в некоторых изоляционных материалах. Скорость распространения результирующих УВЧ-волн зависит от диэлектрической проницаемости материала изолятора, а диапазон частот измерения зависит от конкретного прибора. Дисперсия, затухание, резонанс полости дефекта, стоячие волны, отражение и дифракция влияют на распространение импульсных сигналов ЧР и их характеристики.

Датчики электромагнитного контроля и регистрации ЧР в диапазоне частот ВЧ и УВЧ (УКВ) основаны на емкостном, индуктивном и электромагнитном принципах обнаружения. В диапазоне частот УКВ используемые датчики обычно представляют собой антенны ближнего поля. Выходные сигналы датчиков обычно имеют форму высокочастотных колебательных импульсов. Эти сигналы могут отображаться во временной области в виде осциллирующих импульсов, например, с максимумом огибающей измеряемой выходной величины. В частотной области сигналы обычно отображаются в виде спектра переходных импульсов. Выходной сигнал датчика электромагнитного контроля и регистрации ЧР является функцией его импеданса и величины, соответствующей переходной составляющей поля, возникающей из сигнала ЧР. Измеряемой величиной может быть переходное напряжение или значение импульса тока.

В диапазонах частот от ВЧ до УКВ преимущественно используются конденсаторы связи, трансформаторы тока, катушки Роговского, направленные ответвители, пленочные электроды, датчики переходного напряжения заземления, резистивные соединители, муфты для КРУЭ, волноводные датчики, антенны УКВ. Каждый тип датчика имеет свои особенности установки и использования в зависимости от типа высоковольтного оборудования.

Выходные сигналы датчиков обрабатываются и анализируются во временной или частотной области (рис. 1.10) [108].

Обработка широкополосного сигнала во временной области позволяет проводить подробный анализ характеристик формы сигнала одиночных импульсов (например, рефлектометрия ЧР, анализ формы импульса ЧР и т. д.).

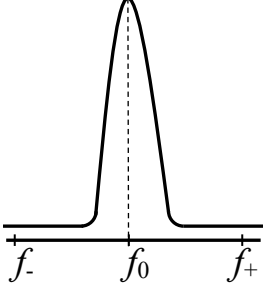
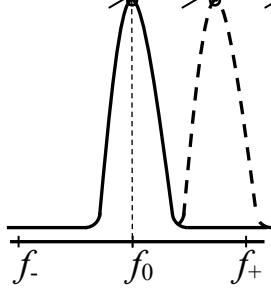
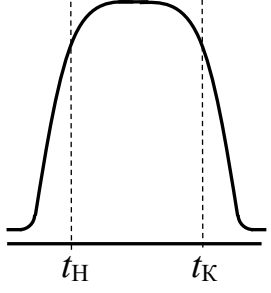

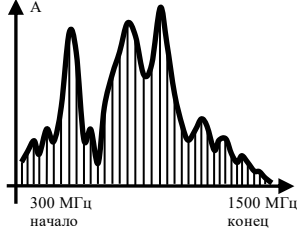
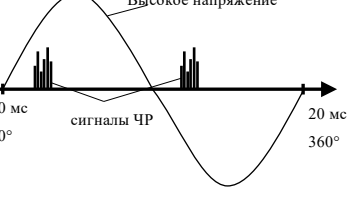
	Измерение в частотной области		Измерение во временной области
Режимы	Нулевая полоса	Полный спектр	Широкополосный
Частотный диапазон			
Сигналы ЧР			

Рис. 1.10. Виды обработки и анализа сигналов ЧР

Узкополосная обработка сигналов в частотной области позволяет обеспечить лучшее подавление шума и внешних помех и, следовательно, повышенную чувствительность. В этом случае анализ формы одиночного импульса ЧР невозможен, поскольку ограничения полосы пропускания в тракте обработки искажают форму импульса.

Основные аспекты электромагнитного метода для обнаружения и регистрации электромагнитного излучения ЧР приведены на рис. 1.11.

При использовании метода электромагнитного детектирования величина ЧР в виде кажущегося заряда не может быть оценена непосредственно как калиброванное значение. Тем не менее, может быть выполнена проверка

чувствительности обнаружения и регистрации ЧР. На практике в готовых системах контроля этот прием для элегазовых распределительных устройств, обмоток статоров вращающихся машин и т.д.

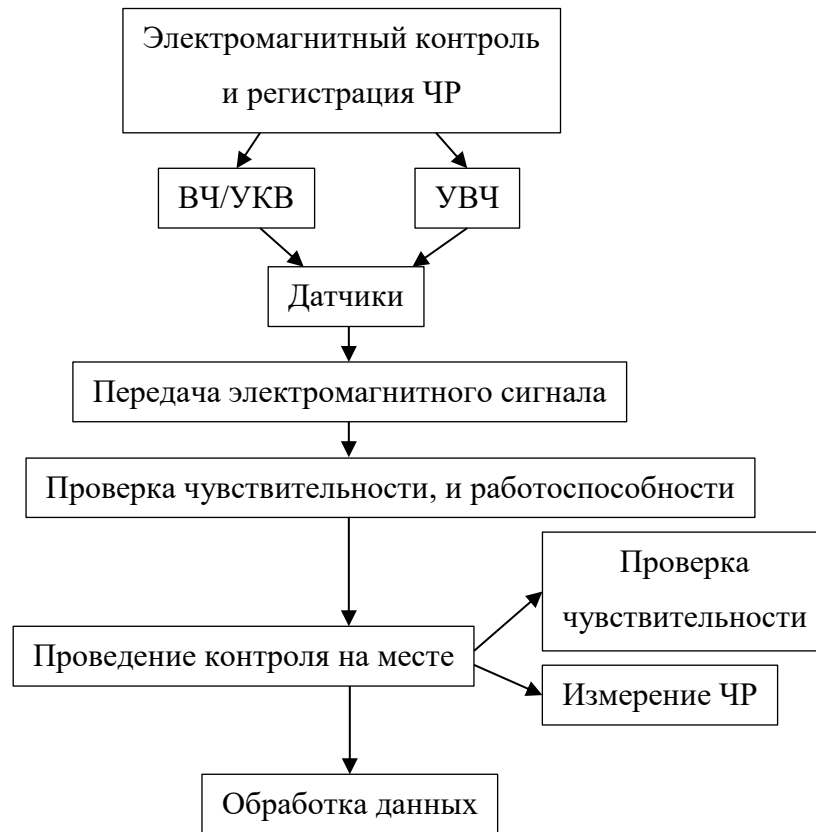


Рис. 1.11. Основные аспекты электромагнитного обнаружения частичных разрядов

Оценка чувствительности электромагнитного метода регистрации ЧР производится в наихудшей конфигурации путем прямого сравнения при одновременном измерении кажущегося заряда (пКл) по стандарту [4] от источника частичных разрядов. Проверка работоспособности заключается в проверке функционирования всей системы измерения частичных разрядов, но не включает измерения кажущегося заряда.

Обнаружение частичных разрядов в диапазоне от ВЧ до УВЧ в основном применяется для изоляции силовых кабелей и электрических машин, где электромагнитные переходные процессы регистрируются с помощью индуктивных и емкостных датчиков, а также с помощью датчиков поля специальной

конструкции. Для силовых трансформаторов, элегазовых распределительных устройств и статорных обмоток в основном используются диапазоны ОВЧ и УВЧ.

1.8. Методы акустического контроля и регистрации ЧР

В процессе генерации ЧР возникает нестационарная акустическая волна, создаваемая импульсом тока частичного разряда. Акустическое обнаружение частичных разрядов основано на том, что частичные разряды представляют собой точечный источник акустических волн. Эти акустические волны распространяются через внутреннюю структуру высоковольтного аппарата, пока не достигнут внешней поверхности. Возникают разные типы волн с разными скоростями распространения. Отражения и преломления акустических волн, возникающих в результате генерации ЧР, приводят к эффектам затухания, поглощения и рассеяния на границах раздела сред «диэлектрик-воздух», «диэлектрик-металл» и др. Как правило, акустические волны обнаруживаются и преобразуются в электрические сигналы, с помощью пьезоэлектрических датчиков, датчиков структурного резонанса звука, акселерометров, конденсаторных микрофонов или оптико-акустических датчиков.

Акустические сигналы, связанные с ЧР, также могут генерироваться свободно движущимися частицами в виде изолированных устройств (например, КРУЭ). Для акустического обнаружения частичных разрядов используется ультразвуковой диапазон частот (от 20 кГц до 250 кГц), а также звуковой диапазон (от 100 Гц до 20 кГц). Используемые для акустического обнаружения диапазоны частот выбираются в зависимости от системы изоляции, к которой применяется метод (твердая, жидкая и газообразная).

Внутри жидких и газообразных частей изоляции излучаемое звуковое поле идеально распространяется в виде продольной сферической волны давления. При достижении частей или корпусов с твердой изоляцией обычно наблюдаются более сложные моды и так называемые структурные пути распространения. Акустические волны имеют разные скорости в разных средах. Из-за этого

геометрически кратчайший путь распространения не обязательно может быть самым быстрым путем между источником и датчиком.

Путь акустической передачи обычно включает следующие важные характеристики:

- режимы распространения акустической волны и их вариации на пути передачи сигнал ЧР от источника к чувствительному элементу;

- изменения скорости распространения в зависимости от различных материалов и условий (например, для изоляционного масла: сравнительно большое изменение скорости в зависимости от температуры и незначительное изменение скорости в зависимости от влажности);

- дисперсия акустических волн от источника ЧР обусловленную физическими свойствами среды, либо наличием границ тела, в котором звуковая волна распространяется и от свойств тела не зависящая;

- частотно-зависимое затухание акустических импульсов в различных изоляционных материалах, соединениях и конструкциях;

- согласование акустических импедансов на границах материалов между чувствительным элементом и корпусом высоковольтного аппарата;

- расстояние от чувствительного элемента до источника ЧР.

Системы измерения можно разделить на контактные и бесконтактные (или дистанционные). Для контактного обнаружения частичных разрядов внутри высоковольтных аппаратов измерительные системы, в которых используется прямой контакт между их датчиками и конструкциями аппарата (корпуса). Измерительные системы также могут различаться в зависимости от того, используется ли обработка во временной или частотной области.

Рассмотрим датчики измерительной системы. В настоящее время используются пьезоэлектрические датчики, микрофоны и акустооптические датчики.

Существует два типа внешних пьезоэлектрических датчиков:

- а) акселерометры (выходной сигнал пропорционален ускорению) с плоской частотной характеристикой;

б) датчики акустической эмиссии (выходной сигнал пропорционален скорости), которые обычно демонстрируют преобладающие резонансы в своей частотной характеристике.

Датчики бывают пассивные или активные. Пассивный датчик не нуждается в дополнительном источнике энергии. Он преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал. Активный датчик для своей работы требует источник внешней энергии, называемой сигналом возбуждения, с усилением сигнала в корпусе датчика.

Общие характеристики датчика включают чувствительность, частотные характеристики в виде рабочего диапазона частот (резонансный тип или плоская АЧХ), температурные характеристики в виде рабочего диапазона температур.

Ввиду затухания акустических сигналов обычно предпочтение отдается датчикам резонансного типа с характерной для них более высокой чувствительностью в определенных диапазонах частот.

Внешние акустические пьезоэлектрические датчики следует размещать там, где они наилучшим образом принимают акустические сигналы, генерируемые частичными разрядами. Таким образом, датчики можно расположить близко к областям, в которых, возможно, были выявлены проблемы при предыдущей диагностике. Например, в КРУЭ акустические сигналы ЧР принимаются датчиками, расположенными на внешней поверхности корпуса КРУЭ. Обычно датчики крепят к корпусу с помощью эластичных лент или магнитных держателей. Поскольку поступающий от дефектов акустический сигнал затухает по длине КРУЭ, датчики лучше располагать в разных местах КРУЭ. В трансформаторах при расположении датчиков учитывают особенности его конструкции, избегая ребер жесткости корпуса трансформатора. При размещении датчиков в верхней части бака трансформатора учитывают безопасные расстояния. Также датчики могут перемещаться в процессе определения местоположения ЧР в корпусе.

Основной единицей измерения механического давления является Паскаль. Однако используемые пьезоэлектрические датчики преобразуют поступающие акустические волны в выходные сигналы напряжения, связанные с механическим

входом, поэтому в большинстве приборов величина акустического сигнала измеряется в вольтах (В) или децибелах (дБ).

Для интерпретации акустических измерений могут использоваться другие характеристики – частота или количество импульсов ЧР, гистограммы, шаблоны импульсов ЧР, синхронизированные с фазой приложенного высокого напряжения, информация о частотной области одиночных или множественных акустических импульсов частичного разряда, различные коэффициенты корреляции к частоте сети и др.

Акустические сигналы ЧР могут измеряться во временной или в частотной области. Необходимо предварительно откалибровать чувствительный элемент. Для этого сначала проводятся лабораторные исследования для определения частотного спектра и уровней сигналов ЧР от дефекта изоляции. Уровень акустического сигнала ЧР, соответствующий известному уровню кажущегося заряда в пКл от локального источника частичного разряда, регистрируется с помощью используемого датчика и прибора. Измеряют частотный спектр обнаруженного сигнала. Далее сигнал от искусственного излучателя акустических сигналов регистрируется акустическим измерительным устройством. Сигнал может генерироваться акустическим датчиком. Частотный спектр и интенсивность сигнала от искусственного источника ЧР могут быть сгенерированы таким образом, что они аналогичны спектру реального дефекта. Так устанавливается эталон акустического сигнала ЧР, который можно использовать для проверки чувствительности измерительного прибора.

Если частотная характеристика сигнала от искусственного источника ЧР отличается от характеристик реального дефекта, то между датчиком и блоком формирования и регистрации сигнала ЧР должен быть установлен фильтр, ограничивающий диапазон частот, соответствующий реальному дефекту.

Бесконтактные датчики для акустической регистрации ЧР применяются в многочастотных камерах для акустической визуализации на экране прибора и поиска коронных и электрических разрядов на высоковольтном оборудовании (ультразвуковой дефектоскоп) [134]. Ультразвуковой дефектоскоп позволяет

обнаруживать дефекты с безопасного расстояния и фиксирует их местонахождение визуально в формате изображения или видео с наложением измеренных сигналов на фазу высокого напряжения. Ультразвуковой дефектоскоп использует матрицу сфазированных параболических микрофонов.

Акустические измерения на высоковольтном оборудовании выполняются преимущественно для обнаружения, распознавания и локализации источников частичных разрядов. Этот метод имеет следующие преимущества:

- недорогое оборудование (акустический датчик с блоком регистрации частичных разрядов);
- относительная простота исполнения;
- метод акустической регистрации ЧР неинвазивный, выполняется при нормальной работе оборудования;
- невосприимчивость к электромагнитным помехам на подстанции;
- несложно проверить работоспособность акустической системы на месте.

Недостатки акустического обнаружения, распознавания и локализации источников частичных разрядов:

- в зависимости от расстояния между источником ЧР и датчиком высокие коэффициенты затухания могут увеличить время, необходимое для измерений на месте;
- невысокая чувствительность к местонахождению источника ЧР в силовых трансформаторах в полевых условиях;
- отсутствие нормативных документов для калибровки акустического сигнала и проведения диагностики высоковольтных аппаратов с помощью существующих акустических приборов.

1.9. Постановка задач исследования

Развитие научно-обоснованных технических и технологических решений по разработке методологических основ технического диагностирования высоковольтных изоляторов заключается в улучшении метрологических, технико-

экономических и функциональных возможностей дистанционного диагностирования ВИ в режиме эксплуатации, способствующее повышению надежности и увеличению эксплуатационного ресурса ВИ.

Эффективность методологических основ технического диагностирования высоковольтных изоляторов обеспечивается решением следующих задач:

1. На основе анализа результатов известных теоретических и экспериментальных исследований оценить наиболее характерные для ВИ подстанций и ЛЭП дефекты и неисправности, степень их влияния на работоспособность всей системы в целом, а также возможные способы контроля дефектов.

2. Разработать комплексную методику измерений характеристик частичных разрядов, основанную на использовании набора физических датчиков для контроля технического состояния высоковольтных изоляторов с последующим автоматизированным анализом и обработкой результатов по диагностическим признакам с целью выявления дефектов и неисправностей.

3. Разработать и внедрить в научно-исследовательскую практику испытательный стенд, позволяющий в лабораторных условиях выполнять изучение электрофизических процессов в различных диэлектрических материалах и изделиях под воздействием изменяемых высоких напряжений электромагнитным, акустическим, электрооптическим и другими датчиками.

4. Разработать и внедрить аппаратно-программный комплекс, позволяющий осуществлять дистанционный периодический контроль технического состояния находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов подстанций и ЛЭП в автоматизированном режиме на основе измерения характеристик ЧР.

5. Изучить взаимосвязи дефектов с характеристиками ЧР в ВИ, что позволит определять периодичность проведения мониторинга и прогнозировать их дальнейший срок службы.

6. Провести натурные испытания аппаратно-программного комплекса дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов,

реализованного в виде системы комплексного мониторинга на реальных высоковольтных изоляторах, находящихся в условиях эксплуатации, и на этой основе разработать набор диагностических параметров для выявления вида и степени опасности дефектов и неисправностей.

Выводы к главе 1

1. Можно констатировать, что несмотря на многолетние исследования разнообразных электротехнических материалов, используемых в ВИ, в настоящее время отсутствует какая-либо общепринятая и закреплённая ГОСТом методика по оценке текущего состояния и прогнозирования дальнейшего срока работоспособности высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации при рабочем напряжении.

2. На основе анализа характеристик дефектов в высоковольтных диэлектрических материалах и методов их контроля установлена необходимость в разработке новых комплексных методов контроля ВИ, основанных на различных физических принципах.

3. Наиболее предпочтительным для контроля ВИ, как показали предварительные эксперименты [А10], является измерение набора характеристик ЧР, наиболее адекватно отражающих дефектность изолятора с помощью нескольких физических методов. Наиболее предпочтительным являются комплексное использование электромагнитного и акустического методов, а также определение локальных напряженностей электрических полей.

4. Анализ реального использования различных способов дистанционного контроля технического состояния ВИ путем однократной регистрации ряда диагностических параметров показал, что такими измерениями возможно определять с определенной и не всегда достоверной точностью текущее техническое состояние ВИ и практически невозможно прогнозировать остаточный ресурс. На наш взгляд, необходимо выполнять периодические измерения нового поколения диагностических параметров, разработанных для дистанционного

контроля на всех этапах функционирования изоляторов в высоковольтной сети: при постановке ВИ в эксплуатацию, в процессе эксплуатации и выводе ВИ из эксплуатации. Именно такой непрерывный контроль может быть использован в целях повышения качества ВИ у изготовителя и позволит создавать более приемлемые условия для увеличения срока эксплуатации.

2. КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

2.1. Переход от ординарных методов контроля характеристик ЧР к комплексным методам контроля

Первые комплексные исследования по разработке контроля технического состояния ВИ мы начали на полимерных высоковольтных изоляторах типа ЛК 70/35. В созданном лабораторном стенде был использован контактный метод в сочетании с несколькими бесконтактными датчиками измерения параметров ЧР.

На первом этапе изучения электрическим контактным способом на основе ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) измерялись значения величины кажущегося заряда q частичных разрядов, затем устанавливались предельные значения q и количества ЧР, характеризующие степень дефектности для каждого типа ПИ, одновременно определяемые с помощью визуального осмотра.

На втором этапе были разработаны несколько способов дистанционного бесконтактного контроля параметров технического состояния ВИ, включая и различные физические датчики [А16], причем предполагался постепенный переход от одиночных датчиков к совместному использованию нескольких датчиков. Вначале была разработана методика последовательного изучения ВИ стендовым методом с применением контактного и бесконтактного способов, а потом и двух бесконтактных способов для формирования наиболее эффективного комплексного способа.

В соответствии с ГОСТ 28739-90 (МЭК 660-84) нами был изготовлен контактный датчик для регистрации высокочастотных импульсов тока, наводимых в заземляющем проводе ЧР (рис. 2.1). Высокочастотный фильтр включается в цепь заземляющего провода для выделения высокочастотной составляющей напряжения, он также выполняет роль измерительного шунта. Пиковый детектор предназначен для выделения высокочастотных импульсов ЧР и генерации цифрового импульса, регистрируемого платой АЦП.

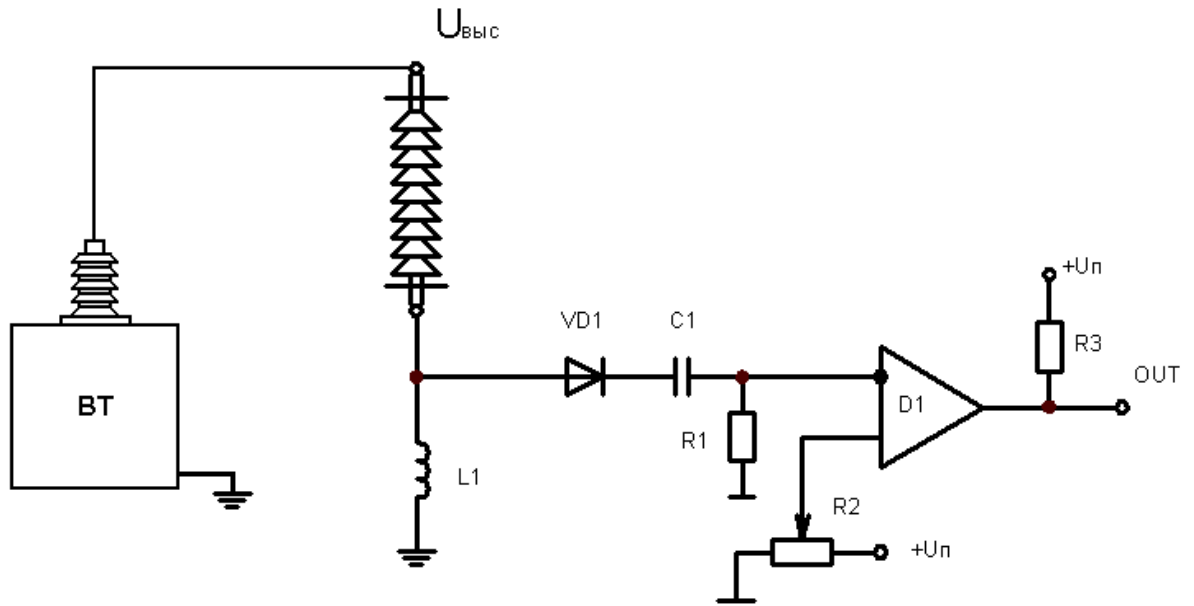


Рис. 2.1. Схема включения контактного датчика

Градуировка индуцированных полей выполняется контактным методом (рис. 2.1). Реальное определение напряженностей индуцированных полей осуществляется электрооптическим датчиком, описание которого приведено в последующих главах. Вначале им определяется интенсивность ЧР (отдельных), их накопление заканчивается разрядом МЧР. Используя предварительную градуировку, мы определяем создаваемую мощными ЧР напряженность поля на диэлектрических поверхностях дефекта.

В местах локальных дефектов возникает электрический заряд, который может разряжаться и излучать импульсы переменного электрического и магнитного полей в окружающее пространство. Возникающие в изоляции частичные разряды вызывают импульсы тока в заземляющем проводе, которые, в свою очередь, наводят ЭДС индукции в катушке индуктивности датчика. В результате с датчика снимается электрический сигнал, прямо пропорциональный величине так называемого кажущегося заряда ЧР. Этот сигнал содержит в себе, собственно импульсы ЧР и синусоидальную составляющую сетевого напряжения [58], [67], [135].

Индуктивность фильтра-реактора с воздушным сердечником используется для выделения высокочастотной составляющей напряжения: при этом он выполняет роль измерительного шунта; пиковый детектор предназначен для выделения высокочастотных импульсов ЧР и генерации цифрового импульса, регистрируемого платой АЦП.

Индуктивность фильтра $L1$ составляет 20 мГн. Емкость конденсатора $C1$ равна 680 пФ. Емкость $C1$ формирует импульс длительностью 100 мкс, который регистрируются с помощью пикового детектора. Пиковый детектор собран по схеме компаратора на микросхеме K554СА3.

Влияние приложенного к диэлектрику поля, и особенно на развитые дефекты в виде полости, стало предметом обсуждения еще в конце 90-х годов XX века [93] и продолжается до настоящего времени [52]. Постепенно с учетом все возрастающей напряженности приложенного поля и соответственно возрастания индуцированных полей частичных разрядов в области дефекта, все больше внимания стало обращаться на индуцированные ЧР поля [52], [73]. Достаточно указать на такой факт, как упоминание в заголовках статей словосочетания «частичные разряды» [91], [95], [136]. Однако все это не прибавило ясности в вопросе о характере взаимодействия электрических полей в модельных сферических формах дефектов в полимерах. Исследования на кафедре ПЭ КГЭУ, начавшиеся также на модельных образцах вначале XXI века, уже позволили получить первые реальные факты [59]. Однако осталось непонятным скачкообразное изменение зависимости кажущегося заряда ЧР вблизи приложенного напряжения порядка 5 кВ для дефектов в виде полости с диаметром $d \sim 1$ мм. Совсем недавно было обнаружено для модельных дефектов в виде сферы подобные скачкообразные изменения кажущегося заряда для $d \approx 1,0-1,2$ мм [137], которые авторы связали с особенностями процессов рекомбинации индуцированных зарядов от предыдущих ЧР на противоположных поверхностях дефекта сферической формы.

Поскольку в первоначальных экспериментах мы уже убедились в том факте, что особенности дефектов в модельных образцах в большинстве своем не

совпадают с характеристиками дефектов в реальных изоляторах, то в дальнейшем мы стали проводить эксперименты в контактном и дистанционном вариантах используя реальные ВИ, содержащие более разнообразные дефекты.

Для более полного изучения зависимости характеристик ЧР от параметров дефектов были созданы модельные образцы из диэлектрических материалов - фарфора и полимера, используемых в реальных ВИ. В модельных пластинах (50×30×2 мм) создавались регулируемые отверстия и воздушные промежутки. Пластины помещались между электродами и при приложении высокого электрического переменного напряжения можно было имитировать поведение целого бездефектного ВИ, с регулируемыми дефектами на стержне и на контакте «стержень-оконцеватель». На рис. 2.2 представлены конфигурации измерительных ячеек для имитации проходного изолятора с дефектом на стержне и опорного изолятора с дефектом «стержень-оконцеватель» [А10].

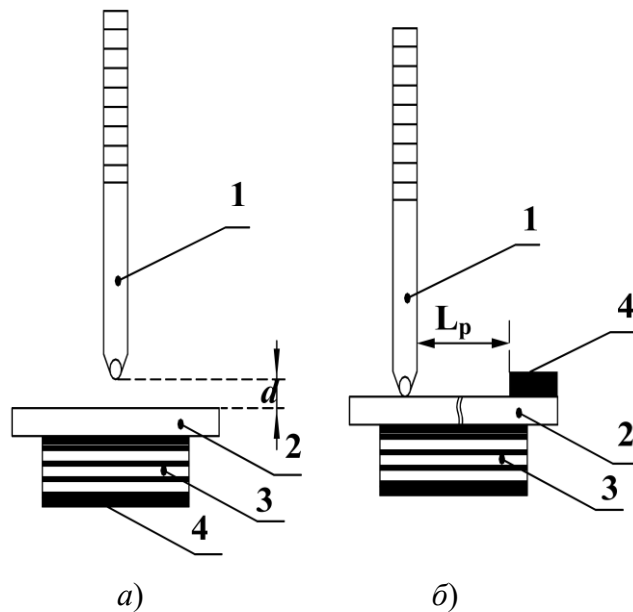


Рис. 2.2. Конфигурация измерительных ячеек:

a – имитация проходного изолятора с дефектом на стержне; *б* – имитация опорного изолятора с дефектом «стержень-оконцеватель»;

1 – шариковый электрод; *2* – образец; *3* – поджимающая пружина; *4* – плоский электрод

Первоначально в модельных образцах было обнаружено пороговое скачкообразное увеличение интенсивности суммарного кажущегося заряда q за период напряжения при определенных значениях приложенного напряжения (рис.2.3, *a* и *б*). Полевая зависимость амплитуды скачков q также зависела от размера d ширины дефекта. Скачки q были минимальны при $d \leq 0,05$ мм, затем возрастали, а при $d \geq 0,5$ мм практически не изменялись. Также было отмечено увеличение амплитуды скачков при возрастании толщины диэлектрических слоев стержня между дефектом и оконцевателем.

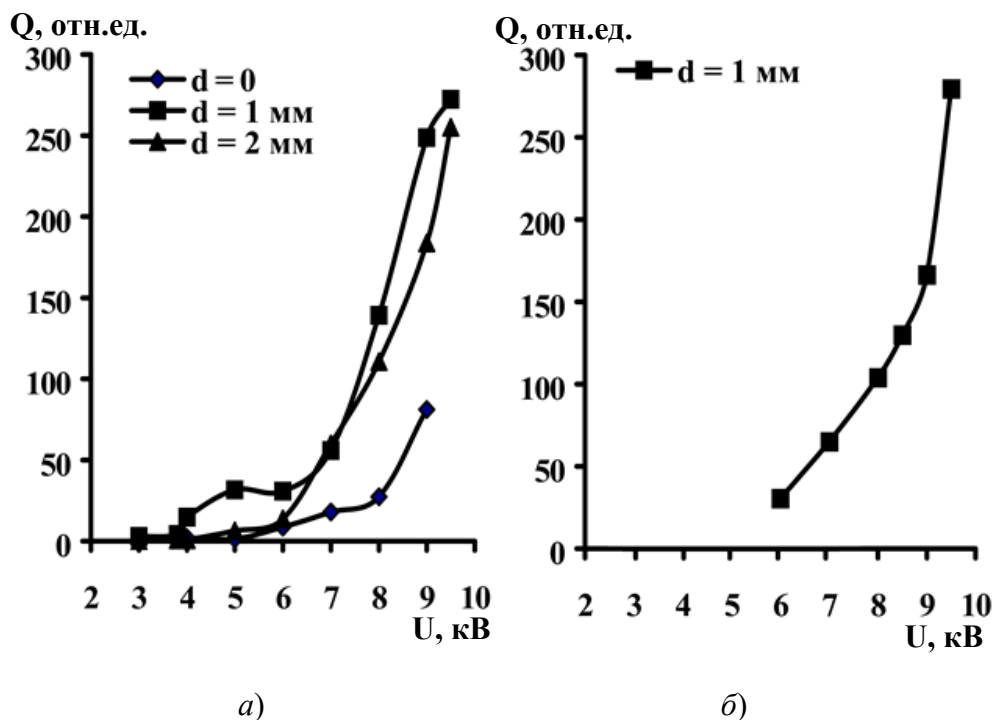


Рис.2.3. Зависимость суммарного кажущегося заряда Q ЧР от приложенного напряжения при различных величинах воздушного зазора:

a – пробой «стержень-оконцеватель»; *б* – пробой на стержне

Поскольку до наших исследований мы не обнаружили публикаций работ по комплексному применению тепловизионных и акустических методов для дистанционного контроля технического состояния ВИ, то далее мы начали изучение возможностей комплексного дистанционного метода именно с такого варианта. Наш выбор датчиков был обусловлен необходимостью изучения

технического состояния ВИ на подстанции, где опорно-стержневые ВИ расположены кучно на небольших расстояниях (2-3 м) друг от друга и применение электромагнитного метода особенно на относительно низких частотах (20-100 МГц) не всегда позволяет определять от какого именно изолятора детектируется сигналы ЧР. Однако, следует отметить, что на данный момент тепловизионный контроль ВИ и других видов высоковольтных диэлектрических элементов не отражен в каких либо нормативных документах.

С учетом вышесказанного, дальнейшей целью нашей работы было создание реального комплексного метода контроля технического состояния высоковольтных изоляторов, сочетающего детектирование ряда характеристик ЧР акустическим датчиком с регистрацией локальных областей нагрева тепловизором. Разработанная компьютерная система позволяла регистрировать основные характеристики и отображать распределение амплитуды и количества ЧР в зависимости от фазы приложенного напряжения [132].

Разработанные нами метод и устройство были использованы для контроля различных ВИ, находящихся в эксплуатации на подстанции ГПП ВЗС «Челныводоканал». Измерения показали сопоставимость результатов, полученных двумя методами [А20].

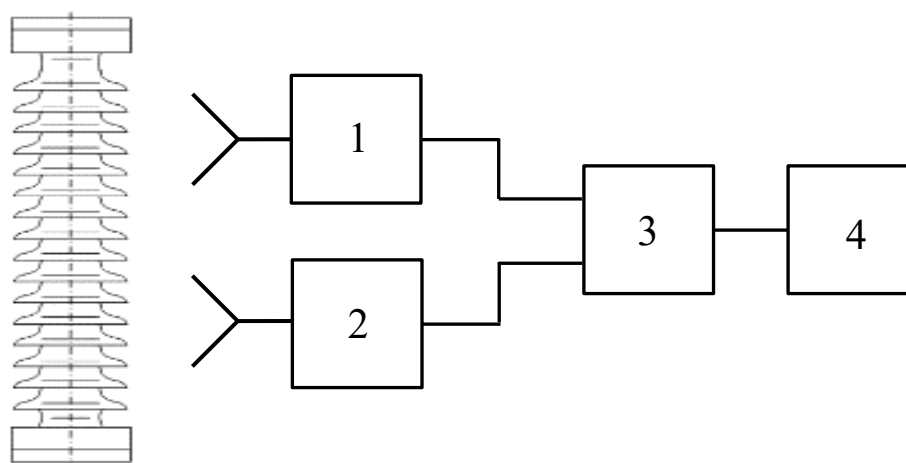


Рис. 2.4. Блок-схема измерительного АПК:

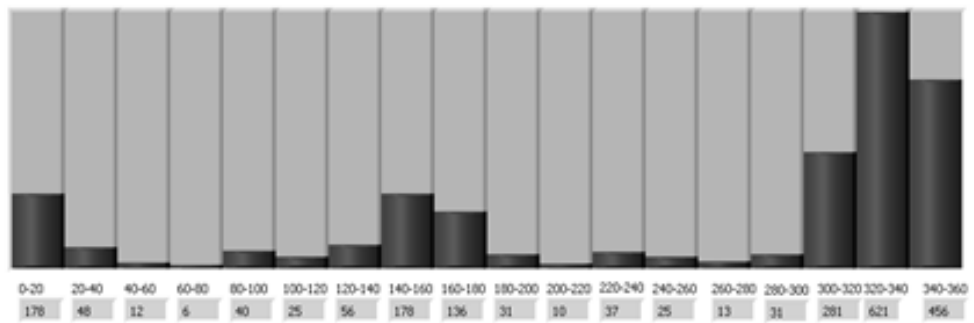
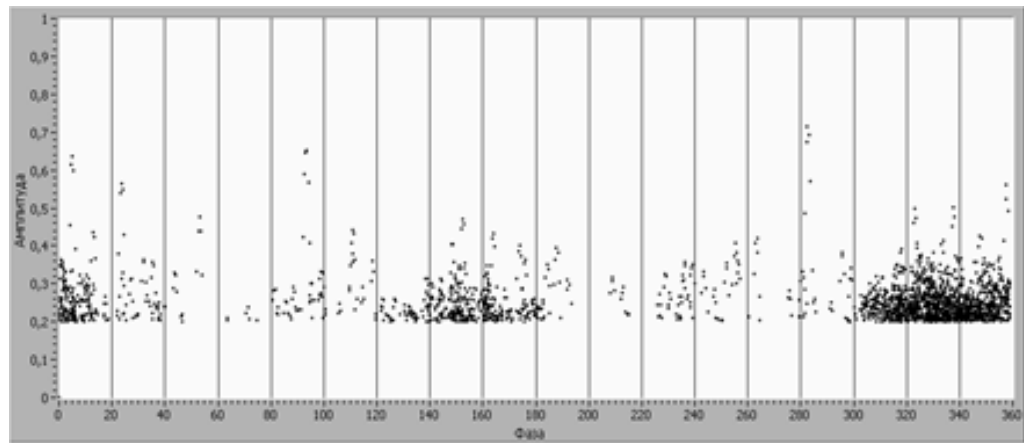
1 – акустический датчик; 2 – тепловизионный датчик; 3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – персональный компьютер

Созданная комплексная система позволила представить характеристики ЧР в виде двухмерных характеристик для каждого изолятора. На рис. 2.5 представлены амплитудно-фазовые характеристики (АФХ) для работоспособного изолятора и для изолятора с наихудшими характеристиками. Верхняя диаграмма отражает интенсивность ЧР, а нижняя – количество ЧР за фазовый интервал. Помимо резкого увеличения интенсивности и количества ЧР в дефектном изоляторе наблюдается фазовый сдвиг этих максимумов по отношению к работоспособному изолятору [132]. Проверка тех же изоляторов при помощи тепловизора марки *Testo 890-2* (рис. 2.6), показала наличие дефектов, выявленных с помощью тепловизионного метода.

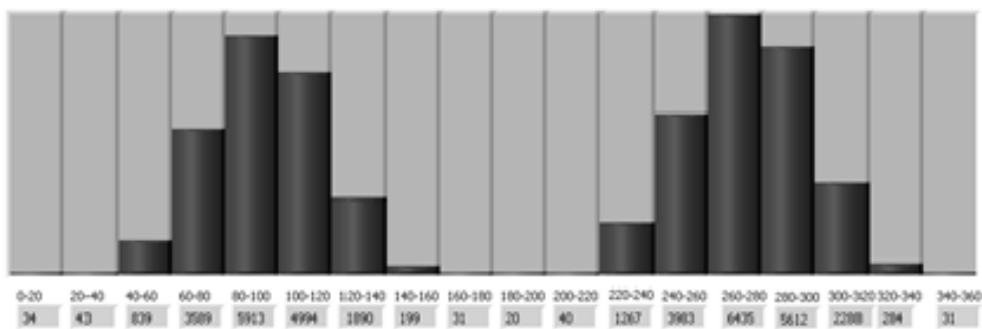
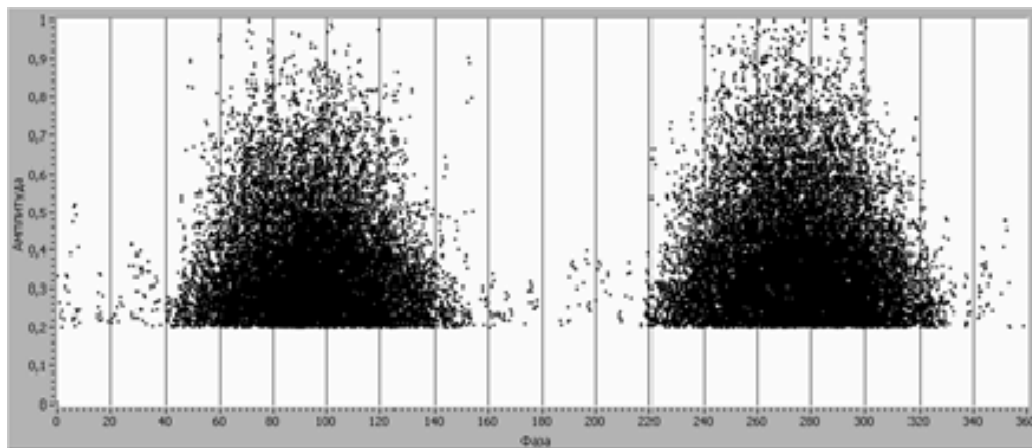
Таблица 2.1 - Выделение изображений, полученных тепловизором

Измеряемые объекты	Темп [°C]	Излуч.	Отраж. темп. [°C]	Примечания
Самая теплая точка 1	16,9	0,80	-100,0	Работоспособный
Самая теплая точка 2	35,9	0,80	-100,0	Поврежденный

Однако, как следует из полученных результатов с помощью имевшейся у нас аппаратуры, так и ряда результатов других авторов [11], [131], [138], использование тепловизионного метода в основном полезно для обнаружения крупных дефектов, видимых визуально или с помощью простых оптических средств. Вследствии этого обстоятельства в дальнейших исследованиях мы отказались от этого метода, сосредоточившись на одновременном применении электромагнитного и акустического датчиков.



(a)



(b)

Рис. 2.5. Амплитудно-фазовые характеристики, полученные с помощью акустического датчика:
a – дефект на контакте «стержень-оконцеватель», *b* – дефект на стержне

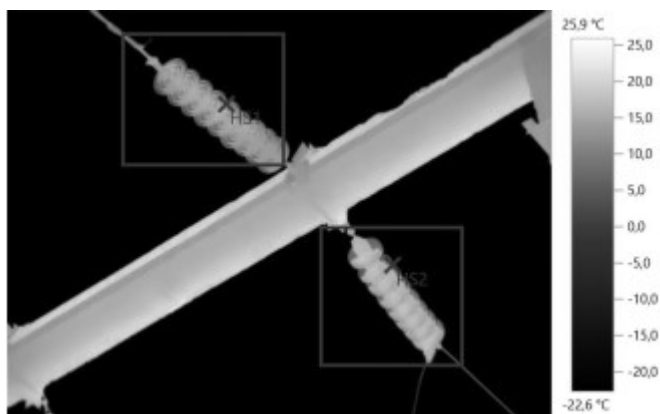


Рис. 2.6. Термограммы работоспособного и поврежденного изоляторов. Параметры изображения: коэффициент излучения – 0,80; отраж. темп. [°C] – -100,0



Рис.2.7. Общий вид гирлянд изоляторов, обследованных с помощью акустического и тепловизионного методов

2.2. Особенности методики одновременных измерений фазовых характеристик ЧР электромагнитным и акустическим датчиками

ЧР сопровождаются излучением коротких длительностью (от 10^{-7} до 10^{-11} с.) электромагнитных импульсов в широком частотном диапазоне от 10^2 до 10^{17} Гц и акустических импульсов в диапазоне 20 Гц - 500 кГц. Для дистанционной регистрации таких излучений были разработаны соответствующие методы,

каждому из которых присущи как определенные достоинства, так и существенные недостатки [92]. Электромагнитный метод при высокой чувствительности, подвержен сильному влиянию радиочастотных помех и электрических разрядов от работающего оборудования на точность измерений ЧР; акустический способ имеет высокую помехоустойчивость от электромагнитных полей и хорошую разрешающую способность к обнаружению дефектного изолятора и в ряде случаев даже места дефекта, что сочетается с малой чувствительностью; оптические и термографические методы эффективны только при отсутствии солнечной засветки и работают в определенном температурном интервале окружающей среды [A16].

С учетом выполненного в главе 1 (§1.3) рассмотрения особенностей распространения электромагнитных и акустических волн в настоящее время даже с использованием совершенных направленных антенн и усилителей невозможно указанными способами, а так же с использованием тепловизоров, определять места и тем более размеры дефектов дистанционно. Существует только возможность выделения одиночных дефектных изоляторов в пределах до 100 м электромагнитным датчиком, а выделение дефектных изоляторов внутри групп возможно только при одновременном применении электромагнитных и акустических способов на более малых расстояниях до 10-15 м [92].

Отсюда следует вывод, что успешный контроль состояния изолирующих элементов высоковольтного оборудования возможен только при одновременном использовании нескольких рассмотренных выше методов. Однако в настоящее время практически все выпускаемые промышленностью диагностические приборы как отечественные, так и зарубежные рассчитаны, в основном, на использование одного метода, в основном либо акустического, либо термографического, и которые пока нашли применение для контроля изоляции высоковольтных силовых трансформаторов и кабелей [92].

Таким образом, неразработанность реальных методик и отсутствие нормативных документов по контролю и диагностике технического состояния ВИ стало главной причиной для разработки более совершенного комплексного метода оперативного контроля технического состояния ВИ, сочетающего одновременную

регистрацию ЧР с помощью электромагнитного и акустического датчиков, и созданной компьютерной программы. Как показали предварительные исследования, разработанный метод способен определять необходимые характеристики ЧР и отображать их в виде распределения амплитуды и количества ЧР в зависимости от фазы рабочего напряжения и распределения их количества по интенсивности кажущегося заряда ЧР [63].

Поскольку электромагнитное излучение ЧР представляет собой видеоимпульс, то для измерения сигнала импульса ЧР используются различные приборы, работающие в области высоких или сверхвысоких частот с шириной полосы пропускания не менее 15 кГц, согласно ГОСТ Р55191–2012 [4], [63].

Регистрация электромагнитных импульсов ЧР (рис. 2.8) осуществляется всеволновой телевизионной антенной «Дельта Н111–01», с коэффициентом усиления 28 дБ, соединённой с широкополосным перестраиваемым приёмником «AOR AR5000A», позволяющим детектировать сигналы в интервале частот 0,5 – 800 МГц (табл. 2.1). Регистрация акустических импульсов осуществляется активной параболической антенной «ParaDish–2», соединённой с приёмником «SDT–270» на частоте 40 кГц. Выбор частоты измерений был обоснован такими факторами как частотная зависимость затухания волн, производственные шумы и электромагнитные помехи окружающего электрического оборудования. Так акустические шумы доминируют в низкочастотной области (20 Гц – 20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания, ($f \geq 100$ кГц). В интервале 35 – 45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал/шум ≈ 2 , акустические импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 10 – 20 м. С учетом низкочастотных производственных электромагнитных помех в диапазоне (50 – 200 МГц) и выше 600 МГц, наиболее предпочтительными для электромагнитной регистрации ЧР являются полосы 20 – 50 МГц и 400 – 650 МГц, причем интенсивность сигналов ЧР значительно выше во второй полосе, чем в первой. Калибровка производилась по результатам контактного метода (этим методом вычислялось величина интенсивности ЧР (кажущийся заряд)), а затем электромагнитным и акустическим методами [63].

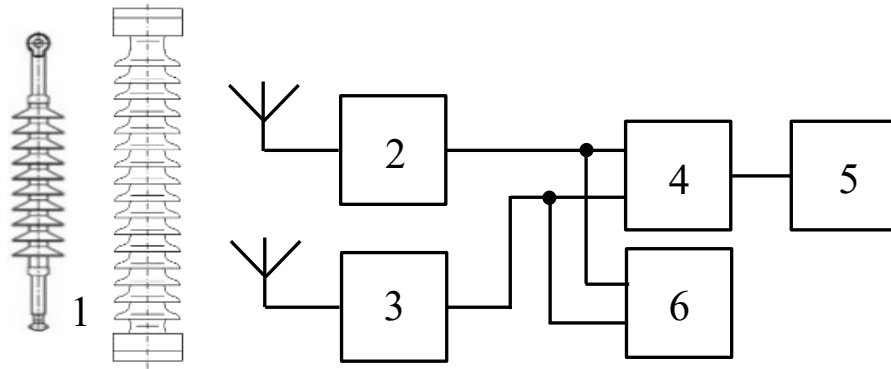


Рис. 2.8. Блок схема дистанционного двухканального аппаратно-программного комплекса (АПК): 1 – высоковольтный изолятор; 2 – электромагнитный канал; 3 – акустический канал; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – персональный компьютер; 6 – двухканальный цифровой осциллограф

Таблица 2.2 – Технические характеристики АПК

	Электромагнитный канал	Акустический канал
Диапазон частот	0,5 – 800 МГц	15,1 – 190,7 кГц
Полоса пропускания	15 кГц – 15 МГц	±2 кГц при 6 дБ
Чувствительность	10 пКл при соотношении сигнал/шум = 3	65 дБ (1 В/1 мбар)

Далее усиленные сигналы от приемников отображаются двухканальным цифровым осциллографом *DSO3062A* в виде амплитудно-временных характеристик импульсов ЧР (рис. 2.9) [63].

Затем синхронизированные с фазой переменного напряжения сети сигналы ЧР поступают на плату сбора данных АЦП *NI USB6341* [139]. Оцифрованные сигналы от электромагнитного и акустического приемников поступают в компьютер, в котором с помощью разработанной программы происходит сбор, запись, обработка информации об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов. Накопление сигналов по узким фазовым интервалам (порядка 20°) происходит в течение 18 с, что вполне удовлетворяет стохастическому характеру возникновения ЧР. Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих

характеристик: амплитуда и количество импульсов в каждом фазовом интервале и распределения количества импульсов по амплитудам кажущегося заряда ЧР [63].

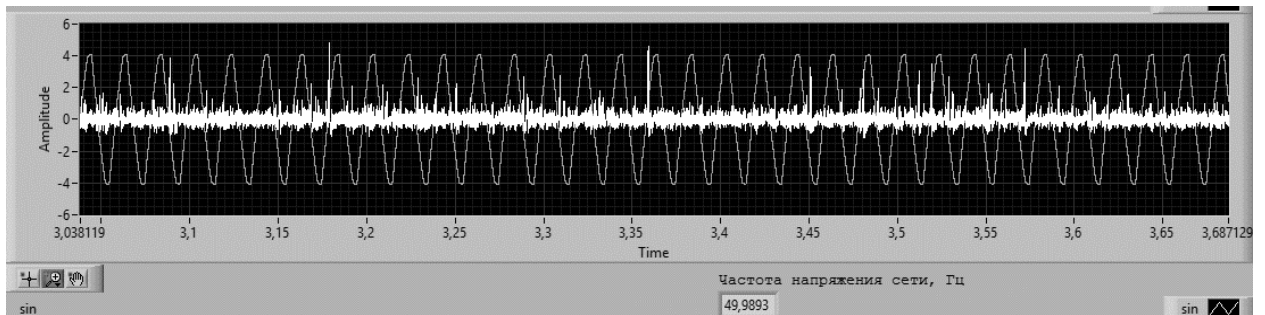


Рис. 2.9. Сигнал ЧР с антенны на частоте 545 МГц с полосой пропускания 15 кГц, наложенный на сигнал напряжения сети

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для (бездефектного) ВИ того же типа [A18].

Таблица 2.3 – Технические характеристики АЦП для сбора диагностической информации с датчиков

Параметр	Значение параметра	Разрешение
Количество аналоговых входов	16	16 бит, 500 кВыб/с
Количество аналоговых выходов	2	900 кВыб/с
Количество цифровых портов ввода-вывода	24	
Количество 32-битных счетчиков-таймеров для генерации ШИМ	4	
Подсчет импульсов	Да	

Определение реального значения интенсивности отдельного частичного разряда выполняется после градуировки приёмников электромагнитных и акустических сигналов с использованием контактного датчика по способу, приведённому в ГОСТ Р55191–2012, с учётом расстояния между антенной и источником ЧР, измеряемых лазерным дальномером [A10], [92].

Процесс записи исходного массива характеристик ЧР производится во внутреннюю память прибора, затем формируется исходный массив данных. После обработки исходного массива характеристики ЧР отображаются виртуальным прибором обработки данных (рис. 2.10). Структурная схема системы представлена на рис. 2.11 [63].

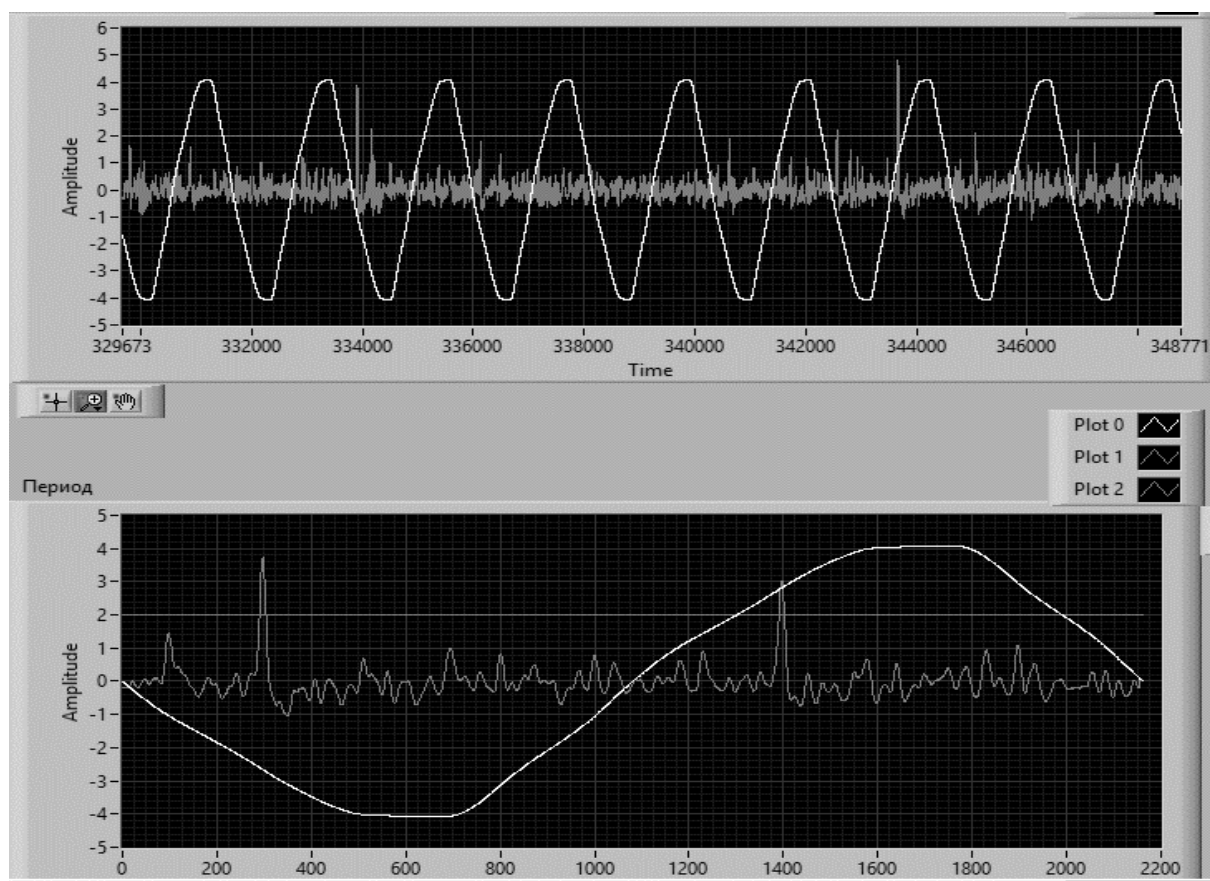


Рис. 2.10. Визуализация обработки сигнала ЧР с антенны на частоте 545 МГц с полосой пропускания 15 кГц

Для приема сигналов с датчиков, обработки и представления результата в виде графических диаграмм, а также записи результатов измерения в виде файла в памяти компьютера используется среда разработки виртуальных приборов *LabView* 14.0, как наиболее удобный инструмент для программирования трех основных составляющих эксперимента: сбора, анализа и представления результата [63].

В блоке построения диаграмм определяется количество ЧР за каждые двадцать фазовых градусов периода сетевого напряжения. На фазовых диаграммах, после программной обработки, каждому ЧР соответствует точка, соответствующая фазе возникновения ЧР и амплитуде, зависящей от мощности ЧР [63].

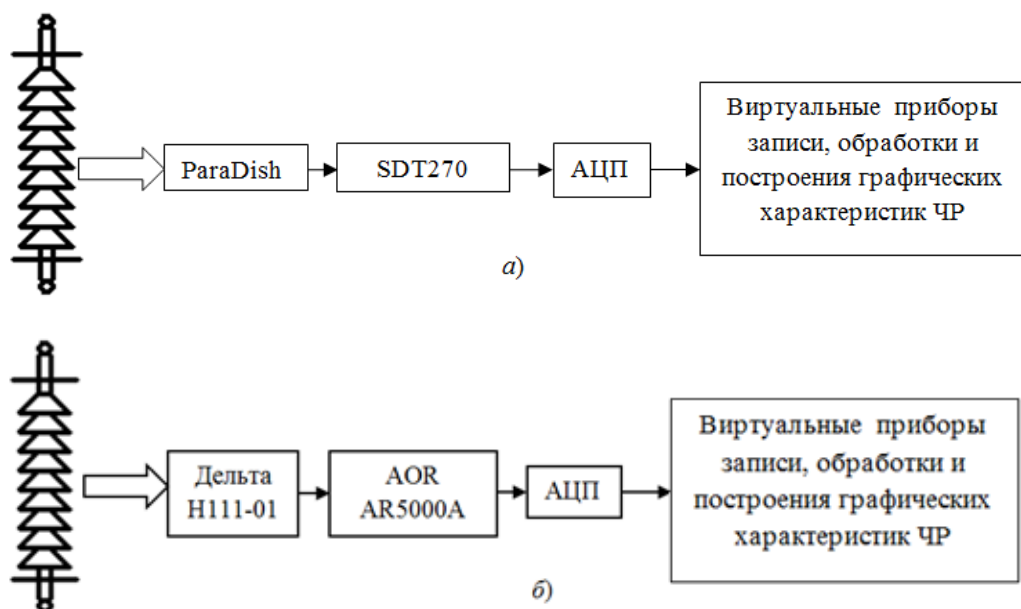


Рис. 2.11. Структурная схема акустической (а) и электромагнитной (б) системы измерения ЧР в изоляторах

На графике распределения ЧР все единичные точки образуют скопления точек с близкой амплитудой и фазой возникновения. Таким же образом происходит построение зависимости количества ЧР от амплитуды и нахождение среднего количества ЧР в каждом фазовом интервале [63].

Для сравнительного анализа с помощью разработанной программы строятся нормированные графики распределения ЧР, где высота столбцов зависит от количества ЧР за определенный фазовый интервал сетевого напряжения. За максимум принимается фазовый интервал с наибольшим количеством зарегистрированных импульсов ЧР, и относительно него в процентном соотношении к максимальному значению определяется высота столбцов, характеризующих относительное количество ЧР в других фазовых интервалах. По окончании построения графиков результаты измерения сохраняются в файле [63].

2.3. Первоначальный комплексный анализ дефектов

Выделение дефектных изоляторов из общей системы высоковольтных изоляторов (ВИ), находящихся под рабочим напряжением и расположенных на определенных расстояниях друг от друга на распределительных узлах и подстанциях, представляет весьма сложную задачу, особенно при одностороннем расположении измерительных датчиков на расстоянии 5-10 м от ВИ. Первоначально в анализе дефектов, во многом основанном на изложенном в патенте [57] способе диагностики полимерных ВИ, был использован ряд характеристик ЧР, позволяющих разделять работоспособные и неработоспособные изоляторы. Однако, как показали наши дальнейшие исследования, набор этих характеристик недостаточен для более точной оценки технического состояния малодефектных и условно работоспособных изоляторов и прогнозирования их дальнейшего срока службы. Вследствие этого обстоятельства были усовершенствована методика и технические возможности разработанного метода измерений набора характеристик ЧР с использованием более узконаправленных электромагнитной и акустической антенн, повышенного частотного интервала до (600 МГц) приема электромагнитных излучений от ЧР. Также была разработана новая методика одновременной компьютерной обработки сигналов ЧР от электромагнитного и акустического датчиков, относящихся к одному и тому же фазовому интервалу [А10]. Особое внимание было обращено на возможность прогнозирования дальнейшего срока службы полимерных ВИ. Для этой цели был использован уже ранее наблюдавшийся в модельных образцах из эпоксидной смолы [59], эффект изменения ряда характеристик ЧР в более продолжительном интервале измерений (~ 30 – 100 мин). Причем ранее этот эффект в полимерных ВИ не наблюдался, так же как и не было единого мнения о его природе [92].

Новые измерения характеристик ЧР в полимерных ВИ выполнялись на лабораторном стенде кафедры промышленной электроники КГЭУ как контактным методом согласно ГОСТ, так и комплексным дистанционным методом. Во втором

случае имитировались полевые условия: использование нормативного рабочего напряжения (35 кВ) при расстоянии узконаправленных электромагнитной и акустической антенн от изолятора $\sim 5 - 7$ метров. Импульсы ЧР характеризуются длительностью от 10^{-11} до 10^{-7} с, кажущимся электрическим зарядом $10^{-12} \leq q \leq 10^{-8}$ Кл, импульсом тока $10^{-8} \leq I \leq 10$ А [A12].

Одновременно двумя датчиками измерялись количество и интенсивность импульсов ЧР в каждом узком фазовом интервале высокого напряжения (20°) с их накоплением в течении 18 с, что вполне удовлетворяло стохастическому характеру возбуждения ЧР. Компьютерный процесс обработки сигналов ЧР заканчивался построением следующих характеристик: количества и амплитуды импульсов в каждом узком фазовом интервале ($\Delta\phi$); распределение количества ЧР по амплитудам; изменение числа амплитуд в течение нескольких часов приложения высокого напряжения. Следует подчеркнуть определенные отличия, построенных нами характеристик ЧР от приведенных в ГОСТ Р 55191 – 2012 [4], в которых рекомендуется измерять среднее количество и интенсивность импульсов ЧР за определенный временной интервал (1 секунду) без привязки к отдельным фазовым интервалам [A12].

В начале измерений электромагнитный и акустический приемники градуировались по чувствительности с учетом расстояния до источника ЧР, используя параметры характеристик (кажущийся заряд q , средний ток I), полученные контактным методом для бездефектного изолятора того же типа [A12].

Была изучена серия подвесных полимерных ВИ ЛК 70/35 в составе 10 экземпляров, выведенных из эксплуатации после окончания нормативного срока службы в Казанских электрических сетях [A10]. Изучение полученных комплексным методом характеристик ЧР в упомянутых выше ВИ, позволило разделить их на три группы: ВИ с минимальным по количеству N и интенсивности ($q \leq 20$ пКл) ЧР, расположенных в фазовых интервалах $\Delta\phi$ в близи 90° и 270° (табл. 2.4) и не изменяющих характеристики ЧР со временем [A12].

Они были отнесены к бездефектным и полностью работоспособным ВИ [А12]. Ко второй группе относятся ВИ, содержащие ЧР ($N \leq 300$ и $q \leq 100$ пКл) с максимумами при $\Delta \varphi = 60^\circ - 80^\circ$ и $210^\circ - 240^\circ$, а также небольшое количество мощных ЧР с $N = 20$ при $q = 100-150$ пКл, не имевшие макроскопических дефектов, которые были отнесены к малодефектным и работоспособным в настоящее время ВИ. В третью группу вошли ВИ имеющие макроскопические дефекты с размерами порядка нескольких десятков мкм и соответствующие им ЧР, расположенные в фазовых интервалах $20^\circ - 60^\circ$ и $190^\circ - 240^\circ$, средней интенсивностью порядка 350 пКл. Кроме того, наблюдались отдельные ($N = 20$) ЧР с интенсивностью 800 пКл. Эти ВИ были отнесены к дефектным и условно работоспособным изоляторам [А12].

Примеры подобных измерений электромагнитным и акустическим датчиками для бездефектных и дефектных образцов ВИ ЛК70/35 приведены на рис. 2.12-2.15. Поскольку их амплитудно-фазовые характеристики практически совпадают независимо от степени дефектности, то далее в данном разделе будут приводиться только АФХ, измеренные электромагнитным датчиком.

Сравнение параметров фазовых интервалов для наиболее интенсивных и многочисленных ЧР групп 2 и 3, представленных на рис. 2.13-2.14 и табл. 2.3 [А10], показывает, что существует значительный фазовый сдвиг (более, чем в 2 – 3 раза) полос ЧР в сторону меньших фазовых углов, как для положительных, так и отрицательных фаз высокого напряжения. Кроме того, наблюдалось значительное отличие в распределении количества ЧР в зависимости от интенсивности ЧР для бездефектных и дефектных полимерных ВИ (рис. 2.15 и 2.16) [92].

Изоляторы № 1 – 4 до снятия с эксплуатации, как следует из предварительного изучения в Казанских электрических сетях, не имели каких-либо макродефектов и вполне соответствовали нормам эксплуатации (условно бездефектные изоляторы). Изоляторы № 5 – 8 содержали различные дефекты (сквозные пробой защитной оболочки, разрядные треки вдоль стержней, между стержнем и оконцевателем), что свидетельствовало о наличии серьезных дефектов и невозможности их дальнейшей эксплуатации [92].

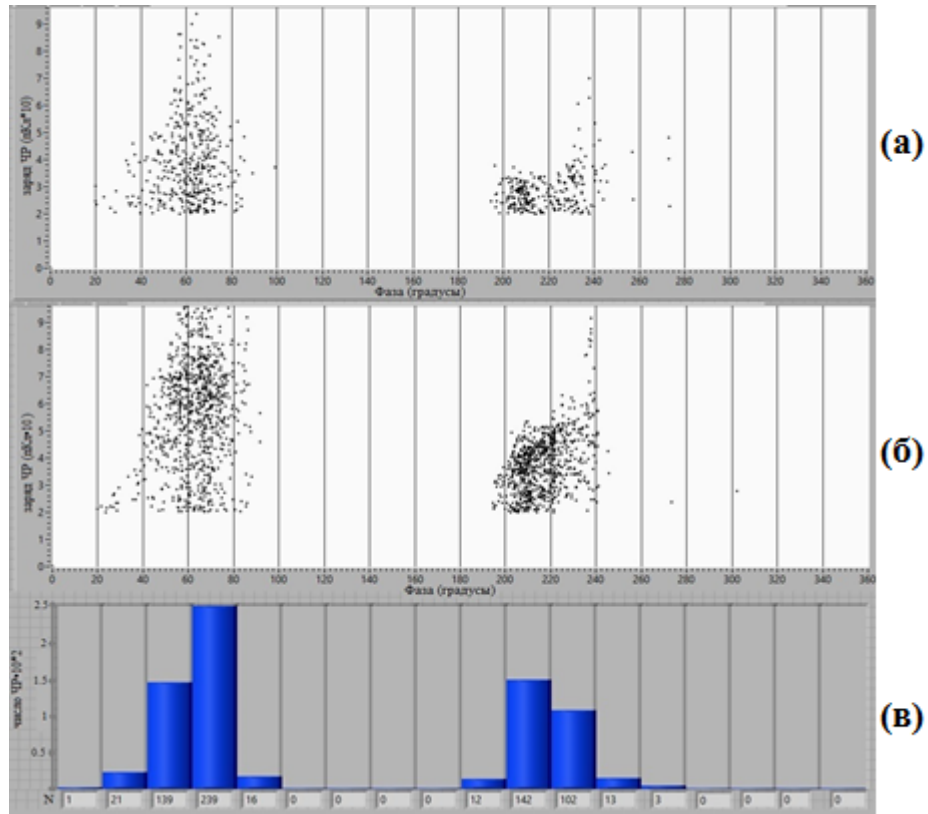


Рис. 2.12. Характеристики ЧР для работоспособного бездефектного изолятора № 3: *a* и *б* – амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*a*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – фазовые распределения количества ЧР, детектированных электромагнитным датчиком

Измерения, проводившиеся на расстоянии порядка 5 – 6 м от изоляторов, показали хорошую сопоставимость результатов, полученных электромагнитным и акустическим методами для каждого изолятора, с характеристиками ЧР, полученными с помощью контактного метода. Отклонения не превышали 25 – 30 %, что связано в основном с использованием различных частотных диапазонов.

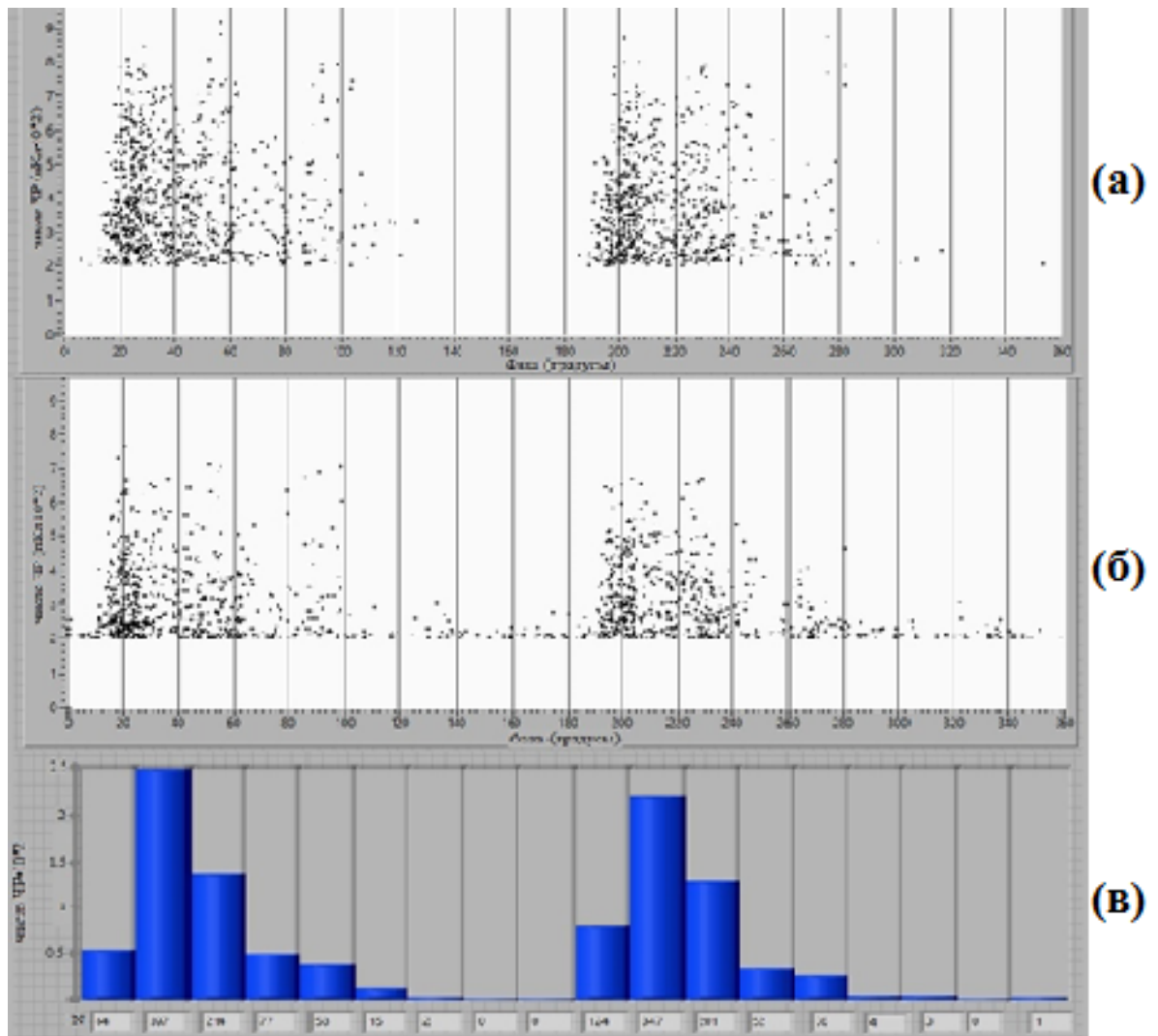
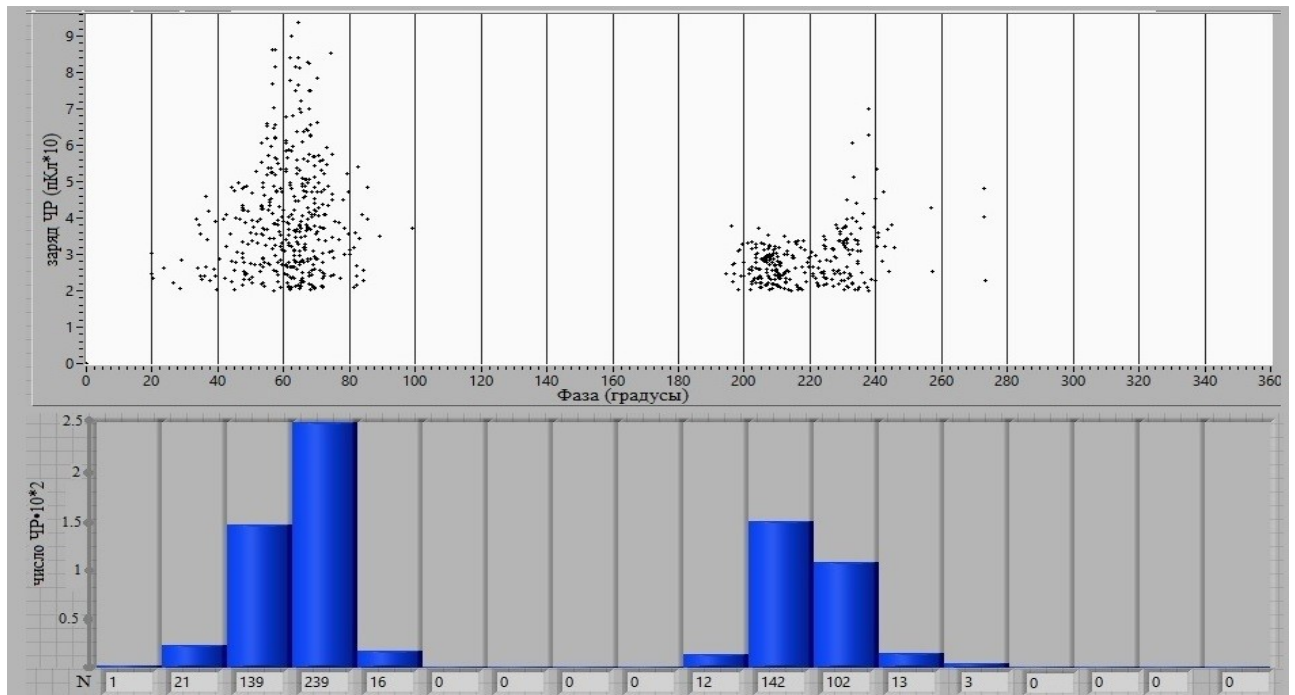
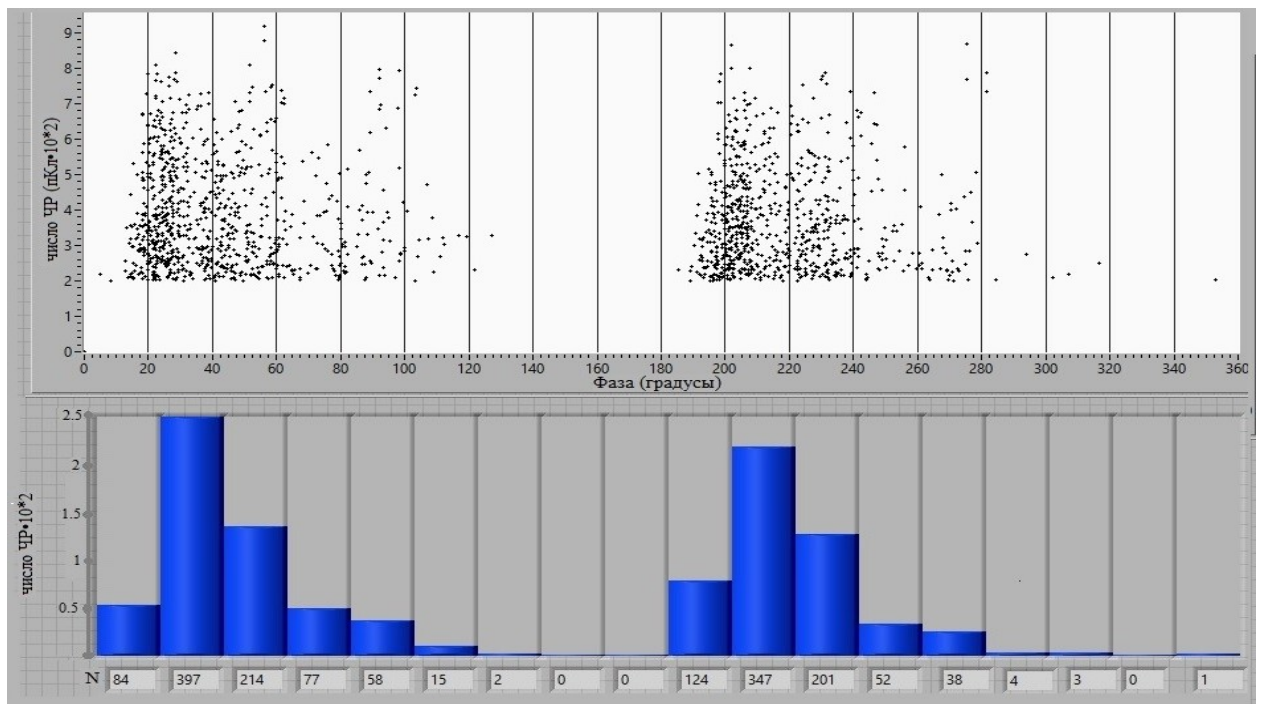


Рис. 2.13. Характеристики ЧР для дефектного изолятора №5:

a и *б* – амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*a*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – фазовые распределения количества ЧР, детектированных электромагнитным датчиком



а)



б)

Рис.2.14. Типичные характеристики ЧР для изоляторов групп 2 и 3:

а – интенсивность (q_i) и б – количество (N) ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения

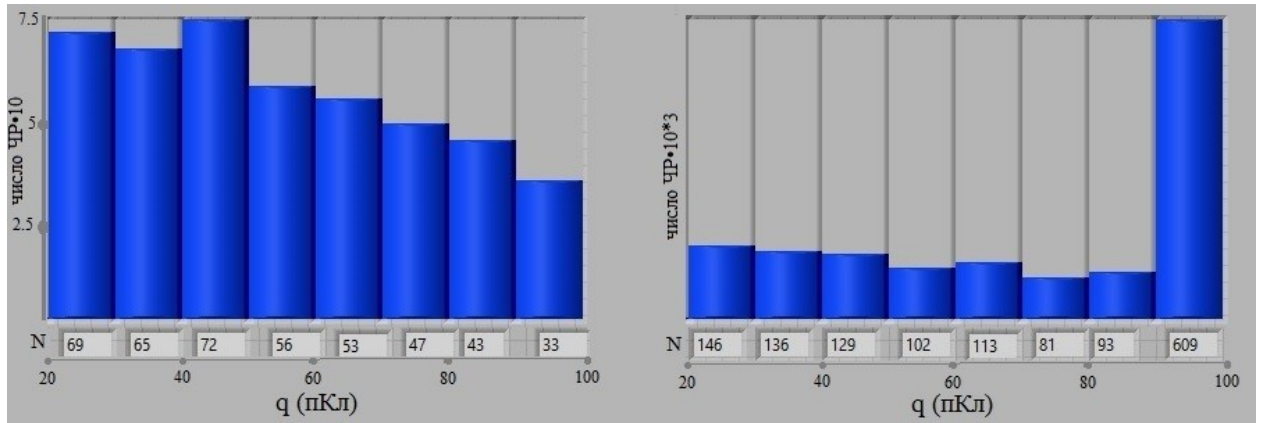


Рис. 2.15. Распределения количества ЧР в зависимости от интенсивности (q_i): слева – для бездефектного, справа – для дефектного изоляторов [A10]

Таблица 2.4 – Характеристики ЧР для трех групп полимерных ВИ.

Группа	№	U_i , кВ	$\Delta \varphi +$	$\Delta \varphi -$	N	qI , пКл	$\Delta \varphi_{I(+)} \max$	$q_i \max$	N_{\max}
1	2	35	$75^\circ - 85^\circ$	$250^\circ - 265^\circ$	85	20	$75^\circ - 85^\circ$	30	10
2	3	28	$60^\circ - 80^\circ$	$210^\circ - 240^\circ$	210	50	$65^\circ - 75^\circ$ $235^\circ - 240^\circ$	100	15
2	4	23	$60^\circ - 80^\circ$	$210^\circ - 240^\circ$	300	55	$65^\circ - 85^\circ$ $240^\circ - 250^\circ$	100	20
2	1	25	$60^\circ - 80^\circ$	$210^\circ - 240^\circ$	270	45	$60^\circ - 80^\circ$ $245^\circ - 245^\circ$	110	20
3	5	20	$20^\circ - 60^\circ$	$190^\circ - 240^\circ$	350	400	$40^\circ - 50^\circ$ $190^\circ - 210^\circ$	800	30
3	6	20	$15^\circ - 60^\circ$	$190^\circ - 230^\circ$	250	370	$15^\circ - 25^\circ$ 195°	750	20

№-номер изолятора, U_i – напряжения начала возникновения ЧР, $\Delta \varphi +$ и $\Delta \varphi -$ – фазовые интервалы ЧР для положительных и отрицательных полуволн высокого напряжения, qI – кажущийся заряд ЧР, N – количество ЧР, ΔqI_{\max} , ΔqI_{\max} и N_{\max} – интервал, кажущийся заряд и количество максимальных ЧР, превышающих среднее значение за период

Характеристики ЧР для работоспособного (№ 3) и дефектного (№ 5) ВИ, типичные для обеих групп изоляторов, приведены на рис. 2.14 и 2.15. Как следует из рис. 2.14 и 2.15, значение интенсивности ЧР и их количества в отдельных

фазовых интервалах различалось не более чем в 1,5 раза, что связано с методами их детектирования, однако положение их максимальных фазовых интервалов полностью совпадало для электро-магнитного и акустического методов. Визуально на изоляторе № 5 наблюдался дефект в виде повреждения стеклопластикового стержня [92].

Различие в интенсивности и количестве ЧР в фазовых интервалах с наибольшей интенсивностью, фазовом распределении этих интервалов внутри каждой группы ВИ составляло не более чем в 1,2 – 1,5 раза, а между группами работоспособных и дефектных ВИ – не менее чем в 3 – 5 раз. Более того, в первой группе ВИ (бездефектные) не наблюдались ЧР с интенсивностью, превышающей 100 пКл, в то время как для второй группы характерны отдельные ЧР с интенсивностью до 1 – 2 нКл. На основе анализа характеристик ЧР для ВИ комплексным методом была разработана методика дистанционной диагностики состояния ВИ, основанная на одновременном детектировании и совместной компьютерной обработке электромагнитных и акустических сигналов от ЧР [А10]. При этом процессе в каждом из дискретных фазовых интервалов высокого напряжения определялись средние значения интенсивности и число импульсов реального заряда, которые превышают допустимый порог для возникновения дефектов или их развития по сравнению с эталонным ВИ. Причем для повышения достоверности при оценке технического состояния ВИ измерялся фазовый сдвиг интервалов числа ЧР с наибольшими интенсивностями в зависимости от степени дефектности [92].

Уже в начале второго десятилетия началось изучение временных зависимостей ранее изученных характеристик ЧР при приложении рабочего напряжения в 35 кВ в течении 1-2 часов (рис.2.16). Необходимая длительность определялась на основе полученных ранее результатов на модельных образцах полимеров [59]. Однако ранее в реальных полимерных ВИ характеристики ЧР при длительном воздействии не изучались. В ходе изучения было установлено, что в бездефектных и условно малодефектных образцах при длительном воздействии рабочего напряжения характеристики ЧР сохраняются неизменными с точностью

до 5% [A12]. Однако в дефектных образцах третьей группы наблюдалось уменьшение средней интенсивности малых ЧР ($q \leq 100$ пКл) на 15 – 20% и почти так же уменьшение их количества (рис. 2.15).

После воздействия поля в течение одного часа одновременно фаза начала ЧР сдвигалась в сторону больших углов. Более неожиданным было уменьшение количества и интенсивности самых мощных ЧР ($q \geq 2,5$ нКл) более чем на 10 – 15%, а их фазовые интервалы генерации становятся более узкими и сдвигаются в сторону больших фаз (рис. 2.16) [A12].

Хотя к моменту начала данных исследований не было какой-либо единой модели, с помощью которой можно было бы однозначно объяснить подобные изменения во временных характеристиках ЧР [24], но мы полагали, что эти результаты можно было использовать для прогнозирования дальнейшего технического состояния полимерных ВИ. По-видимому, изменение характеристик ЧР в дефектных изоляторах, так же и в модельных образцах с искусственно созданными дефектами, является следствием нескольких причин, вызванных длительным воздействием электрического поля. Среди них: уменьшение площади ЧР вследствие деградации поверхности распределения зарядов в объеме полимера, динамики процессов в электронных ловушках. На наш взгляд, наиболее вероятной из этих причин является перераспределение зарядов на дефектах, поскольку после выключения высокого напряжения в течение нескольких часов в образцах с дефектами происходило восстановление первоначальных характеристик малых ЧР ($q \leq 100$ пКл) [A12]. Причиной тому могут быть релаксационные процессы в системе электрических зарядов ионов и перемещенных электронов и дырок, что ранее было обнаружено в работах [24].

Следует подчеркнуть, что приведенные выше изменения во временных характеристиках ЧР наблюдалось только в образцах полимерных ВИ, не имевших электрических пробоев с образованием проводящего канала между электродами. Некоторое увеличение количества и интенсивности мощных ЧР ($q \geq 1$ нКл) вблизи фазовых углов, близких к 90° и 270° , связано с дефектами, которые необратимо изменяются при длительном воздействии высокого напряжения. Следовательно,

обнаруженные обратимые временные изменения характеристик ЧР могут характеризовать процесс накопления локальных изменений в полимерных ВИ, подготавливающих его к зарождению и развитию магистрального пробоя [А12].

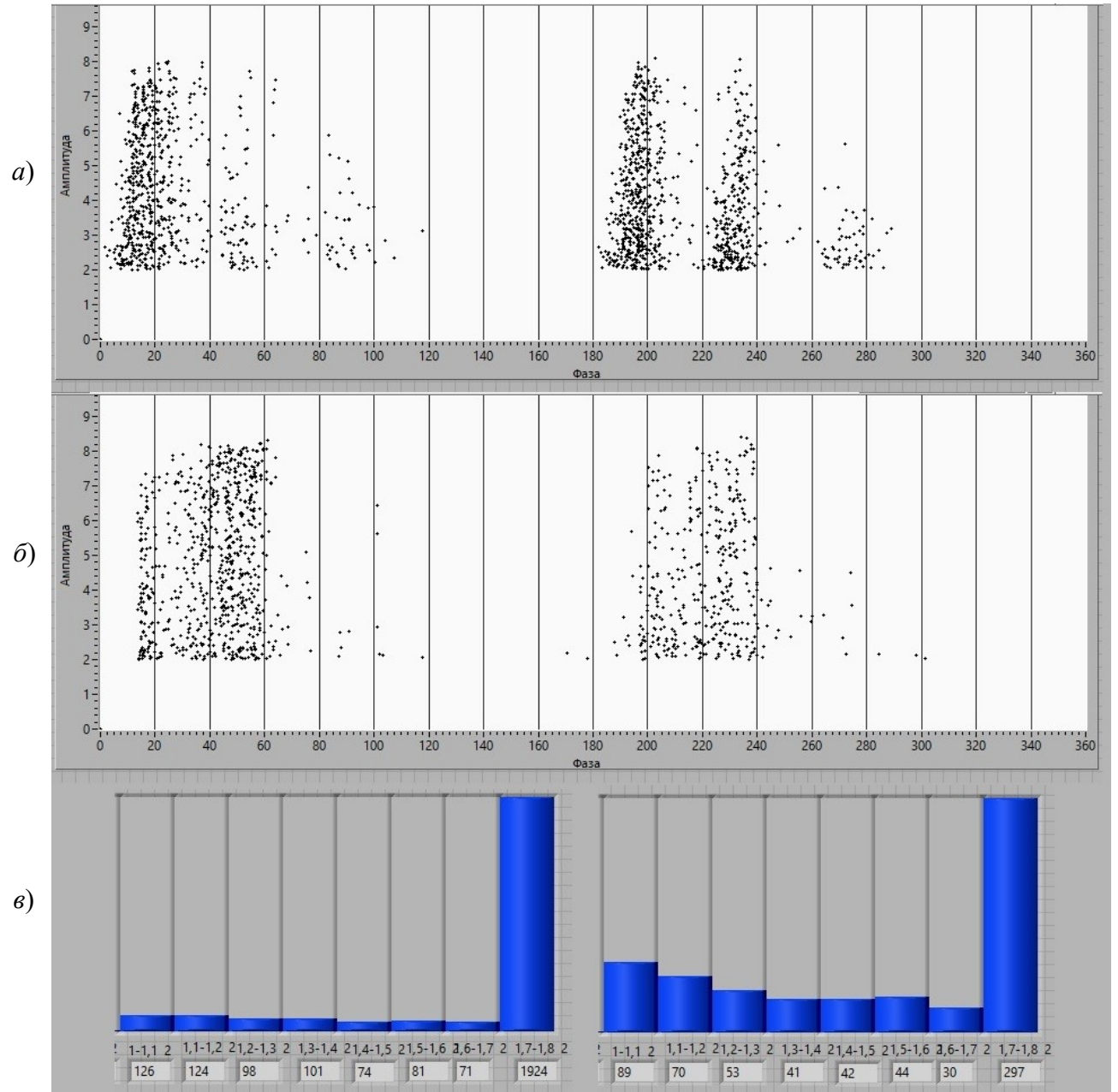


Рис. 2.16. Изменение характеристик ЧР для дефектного образца ВИ:

a – интенсивность ЧР, *б* – количество ЧР, *в* – зависимость N от интенсивности при длительном приложении напряжения (1 час)

Затем эти исследования продолжились на более длинный интервал в один месяц также на стенде кафедры ПЭ КГЭУ. Исследовались образцы ЛК 70/35 с

достаточно большим дефектом на стержне и контакте «стержень-оконцеватель». В результате измерения приведенного выше набора характеристик ЧР (рис.2.12-2.17) было установлено два периода (1 час и 700 часов) их изменений при постоянном приложении переменного поля 35 кВ, которые кардинально отличались друг от друга.

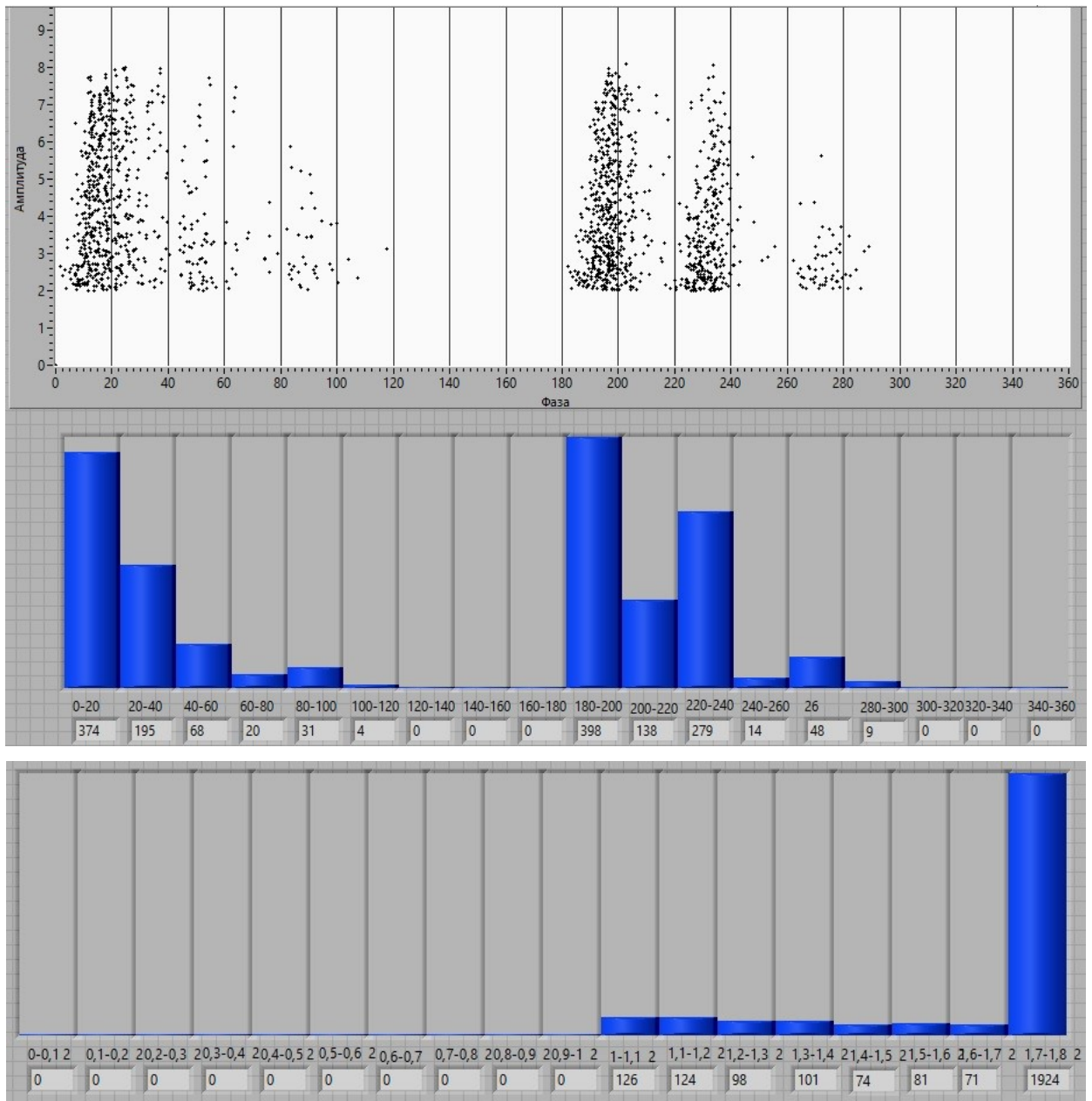


Рис. 2.17. Изменение характеристик ЧР после приложения напряжения в течение 1 месяца после измерения тех же характеристик ранее (рис. 2.16)

В первом периоде, как ранее, также наблюдалось некоторое уменьшение количества и интенсивности ЧР (рис.2.17), расположенных в первом и третьем 90° и 180° интервалах приложенного напряжения с одновременным их сужением и сдвигом в сторону больших углов. Причем количество МЧР уменьшалось значительно. После 1 часа начался период значительного возрастания интенсивности и количества МЧР и сдвиг фазовых интервалов генерации ЧР в сторону нулевых и 180° интервалов (рис.2.18). Этот в начале экспоненциальный процесс постепенно замедлялся и практически оканчивался ближе к 700 часам приложения напряжения.

Можно полагать, что второй этап изменений характеристик ЧР, как уже предполагалось ранее, связан с процессом релаксации индуцированных предыдущими ЧР зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта. Поэтому он имеет необратимый характер и отражает ускоренное старение диэлектрического высоковольтного элемента и может быть одним из диагностических признаков.

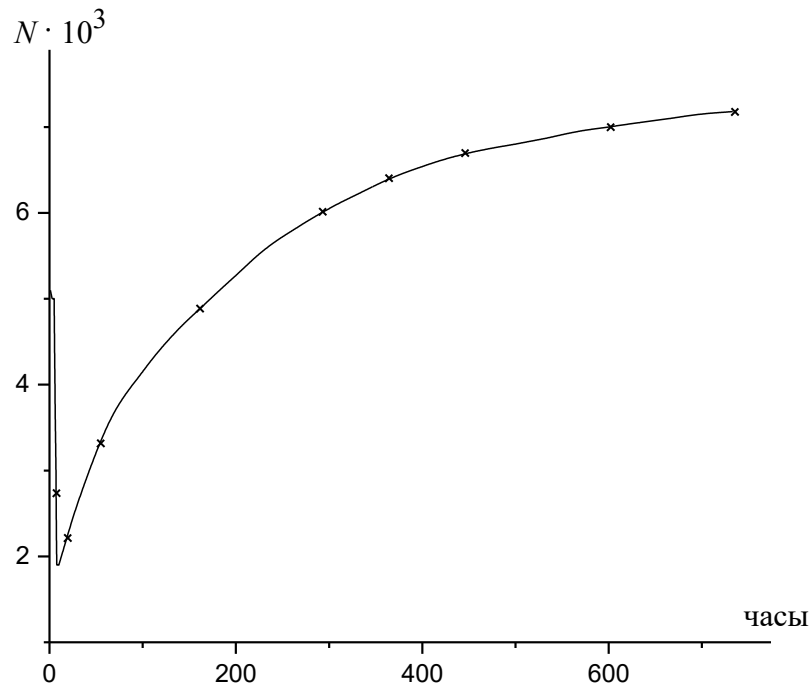


Рис. 2.18. Зависимость количества МЧР за длительный временной интервал

В последние годы появились новые работы, посвященные развитию новых представлений о физических процессах, связанных с возникновением мощных ЧР, и в том числе при длительном воздействии стандартных в энергетике высоких напряжений [140], [141], [91], [137]. Общим для этих работ является компьютерное моделирование разрядных процессов на модельных дефектах сферической формы в полимерах в значительные временные интервалы воздействия электрического поля до одного года. Однако возникающие при этом воздействия описываются разнообразными (более десятка) моделями. Пока можно только полагать, что наши модели кратко- и долговременного поведения дефектов в полимерах не противоречат основным выводам из немногочисленных экспериментов [91], [52], [142] по двухступенчатому поведению поверхностной электропроводности, приведенной в статье [91]. Однако первоначальное изменение (уменьшение) сопротивления поверхностной проводимости стенок дефекта на 7 порядков в течении 50 минут кажется несколько сомнительным. Тем не менее, является значительно более совпадающим с полученными нами данными по временному (800-1000 часов) установлению равновесного состояния параметров поверхностных сопротивлений и электрических полей на диэлектрических поверхностях дефекта.

2.4. Длительное временное влияние индуцированных электрических полей на развитие дефектов

Эффекты памяти совсем недавно снова (конец второго десятилетия XXI века) стали объектом изучения в ряде работ и теперь относятся к влиянию остаточных электрических полей, создаваемых зарядами предыдущих ЧР на диэлектрических поверхностях дефектов ВИ. Ранее предполагалось, что их влияние ограничивается моментом возникновения последующего ЧР. Такие характеристики остаточных зарядов как амплитуда, фаза и место возникновения в полости могут быть достаточными для описания процесса создания поля в полости дефекта и генерации новых свободных электронов посредством двух механизмов – объемной и

поверхностной генерации. Причем первый процесс более эффективен до начала первичной генерации ЧР, а второй – в условиях дальнейшей генерации ЧР. Ранее уже было установлено, что процессы поверхностной рекомбинации различны для сферической и плоской формы дефектов [137], [143], поскольку в сферической полости противоположные границы диэлектрических поверхностей смыкаются, а в плоской остаются раздельными. Из-за этого в плоской полости миграция зарядов между диэлектрическими поверхностями более затруднительна и происходит гораздо дольше, чем на сфере. Поэтому дополнительный вклад в рекомбинацию зарядов вносят объемная проводимость и нейтрализация в газе, содержащемся в полости. Поверхностная рекомбинация может достигать в плоском дефекте 1000 мин [137].

Кроме переходных процессов, связанных с генерацией ЧР, равномерное распределение зарядов в полости может быть связано с композицией состава и концентрацией газов в полости дефекта, физической и химической модификациями поверхностей дефекта, главным образом изменением давления газа за счет окисления поверхности полимера.

Поверхности дефекта могут модифицироваться посредством ЧР двумя путями: химическими реакциями и физическим воздействием (бомбардировкой) движущимися электронами и ионами. При определенных условиях возможно [91] формирование тонкого жидкого слоя [144], приводящего к возрастанию поверхностной проводимости. Установлено, что поверхностная проводимость в полиэтилене [91] может возрасти на несколько порядков во время приложения поля в течение трех часов.

Возрастание поверхностной проводимости будет усиливать поверхностную рекомбинацию зарядов, ведущую к изменению поведения ЧР. Другой модификацией поверхности дефекта может быть формирование более шершавой поверхности, вызывающей усиление локальных электрических полей. Однако этим вопросам уделялось мало внимания, и мы выполнили первичное изучение влияния дефектов на поведение электрофизических процессов в зависимости от характера

дефектов в полимерных изоляторах при длительном приложении электрических полей.

Однако в недавних работах [145], [146] на основе модельных экспериментов было предположено влияние зарядов и соответствующих им полей от предыдущих ЧР на всем периоде приложения электрических полей, то есть накопление влияния предыдущих разрядов. Поэтому нами дополнительно были исследованы условно бездефектные и с различной степенью дефектности полимерные изоляторы типа ЛК 70/35. Изоляторы серии ЛК предназначены для эксплуатации на воздушных линиях электропередачи переменного тока в районах с умеренным и холодным климатом. Они могут применяться в составе поддерживающих и натяжных подвесок.

Наиболее распространенный тип повреждений полимерных изоляторов – это образование дендритов в стеклопластиковом стержне и треков на границе раздела «стержень-оболочка» [11]. Обычно они сопровождаются внутренней эрозией защитной полимерной оболочки, вплоть до образования сквозных отверстий. Такое повреждение связано с попаданием влаги в изолятор.

Отобранные для проведения исследований изоляторы ранее эксплуатировались в Казанских электрических сетях. Изоляторы №1, №2, №3 и №4, как следует из предварительного изучения, до вывода из эксплуатации не имели каких-либо внешних видимых дефектов и вполне соответствовали нормам эксплуатации (условно бездефектные изоляторы) [92]. Наиболее сильные изменения характеристик ЧР за длительный период (несколько суток) приложения высокого электрического поля наблюдались на изоляторах №5, №6 и №7. По характеристикам изменения фазы начала генерации ЧР были оценены временные интервалы до момента сквозного пробоя изолятора №6, которые с точностью до 40% совпали с его реально наблюдавшимся пробоем. Изолятор №5 имел незначительные механические повреждения стеклопластикового стержня и полимерной оболочки. Изолятор №6 имел сквозной пробой стержня под кремнийорганической оболочкой. У изолятора №7 специально были повреждена полимерная оболочка и удалены некоторые ребра.

Для полимерных материалов, как уже отмечалось ранее, характерны весьма сложные процессы деградации физико-химических свойств, что особенно проявляется для полимеров, находящихся под высоким напряжением. Эти процессы приводят к постепенному понижению порогового напряжения для возникновения ЧР. В немногочисленных исследованиях уже отмечались кратковременные (часы) и долговременные (дни и месяцы) изменения характеристик ЧР в модельных образцах полимеров из эпоксидной смолы, находящихся под напряжением [52], [147]. Однако, до настоящего времени поведение реальных ПИ под длительным напряжением не изучалось.

Нами было выполнено изучение влияния приложенного рабочего напряжения на временные изменения характеристик ЧР как условно бездефектных (полимерные изоляторы №1-4), так и содержащих определенные дефекты изоляторов (№5 - №7).

Для всех образцов (изоляторы №1-4) были изучены изменения характеристик ЧР за один час непрерывного воздействия высокого напряжения, а также более длительное наблюдение за характеристиками ЧР в течении 2-3 месяцев без приложения поля. В первом случае общий характер ЧР при воздействии поля в один час сохранился. Для образца №4 в приложенном поле 2 кВ/см следует, что в первые 10-15 минут произошло значительное увеличение количества ЧР, а за последующие 45-50 минут их количество и интенсивность практически не увеличились. Однако области фазовых углов с максимальными значениями параметров ЧР сузились почти в 1,5-2 раза. Также только небольшое изменение в характеристиках ЧР были установлены при повторных измерениях через 2-3 месяца без приложения высокого напряжения.

Временной характер изменения характеристик ЧР в течение часа приложения высокого напряжения к ПИ с дефектами (изоляторы №5 и №7) в основном мало изменился по сравнению с теми же характеристиками для бездефектных изоляторов.

Итак, в результате изучения было установлено, что во всех изоляторах как бездефектных, так и содержавших дефекты в первый период (10-60 мин.)

приложения рабочего напряжения наблюдалось увеличение как количества, так и их интенсивности (рис. 2.19).

После выключения напряжения в течении нескольких часов вследствие релаксационных процессов уменьшения электрических зарядов на дефектах происходило восстановление первоначальных характеристик ЧР для ранее обследованных ПИ. Следует отметить, что подобное временное поведение характеристик ЧР типично только для диапазона напряженностей электрических полей, не приводящих к росту размеров дефектов, первоначально уже существовавших. Так же отмечено, что сигналы разрядов мало изменяются (в пределах 5-10%) в интервале времени от 0 до 60 минут.

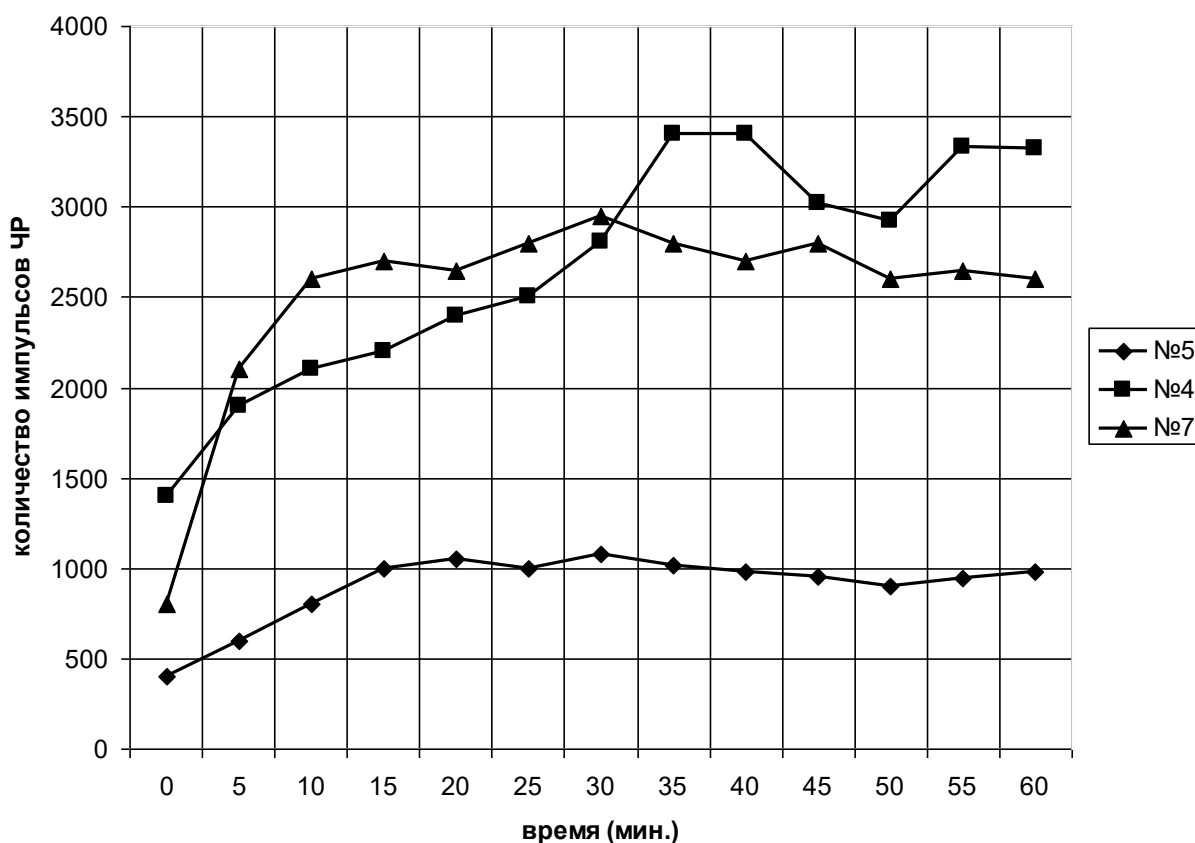


Рис. 2.19. Зависимость количества ЧР от времени воздействия переменного напряжения для изоляторов №4,5,7. Измерение производилось с помощью электромагнитного датчика (частота приема 9 МГц, ширина полосы пропускания 15 кГц). Напряженность поля 2 кВ/см, интервал между измерениями 5 минут

При дальнейшем нарастании электрических полей возникало увеличение размеров и формы дефектов, приводящее к необратимому изменению характеристик ЧР.

Вследствие обнаруженных особенностей временных характеристик ЧР в ПИ, отличающихся от подобных характеристик керамических изоляторов, измерение параметров ЧР при стендовых испытаниях ПИ следует проводить только после временного интервала (не менее 1 часа) выдержки изолятора под рабочим напряжением.

Таким образом, для полимерных материалов нами были установлены следующие определенные особенности в характеристиках ЧР, которые наиболее устойчиво наблюдаются в изоляторах, содержащих различные типы дефектов, опасных для продолжения их эксплуатации: уменьшение количества слабых ЧР, при увеличении кажущегося заряда наиболее интенсивных сигналов ЧР с одновременным уменьшением их количества за длительный период измерений (порядка 1 часа), фазовый сдвиг максимумов ЧР в более удаленные от пиковых значений (90° и 270°) фазовые углы, необходимые изменения параметров ЧР за длительные интервалы приложения поля (порядка нескольких дней).

Хотя до настоящего времени нет какой-либо единой модели, с помощью которой можно было бы однозначно объяснить подобные временные изменения в характеристиках ЧР, но мы полагаем, что полученные нами результаты можно использовать для прогнозирования дальнейшего технического состояния полимерных ВИ. По-видимому, изменение характеристик ЧР в дефектных изоляторах, а также и в модельных образцах с искусственно созданными дефектами, является следствием нескольких причин, вызванных длительным воздействием электрического поля. Среди них: уменьшение площади ЧР вследствие деградации поверхности распределения зарядов в объеме полимера, динамики процессов в электронных ловушках на диэлектрических поверхностях дефектов. На наш взгляд, наиболее вероятной из этих причин является перераспределение зарядов на дефектах, поскольку после выключения высокого напряжения в течение нескольких часов в образцах с дефектами происходило

восстановление первоначальных характеристик малых ЧР ($q \leq 100$ пКл). Причиной тому могут быть релаксационные процессы в системе электрических зарядов ионов и перемещенных электронов и дырок, что ранее было обнаружено в работах других авторов. Следует подчеркнуть, что приведенные выше изменения во временных характеристиках ЧР наблюдались только в образцах полимерных ВИ, не имевших электрических пробоев с образованием проводящего канала между электродами. Некоторое увеличение количества и интенсивности мощных ЧР ($q \geq 1$ нКл) вблизи фазовых углов, близких к 90° и 270° , связано с дефектами, которые необратимо изменяются при длительном воздействии высокого напряжения [А12]. Следовательно, обнаруженные необратимые временные изменения характеристик ЧР могут характеризовать процесс накопления локальных изменений в полимерных ВИ, приводящих его к зарождению и развитию магистрального пробоя.

Выводы главы 2

Оценивая результаты изучения характеристик ЧР в полимерных ВИ при приложении нормированного высокого напряжения, и в том числе в длительном временном интервале, можно сделать следующие выводы:

1. В отличие от контактного стендового метода испытания изоляции высоким напряжением (ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2010)), где в основу положен принцип измерения таких характеристик ЧР, как интенсивность, частота повторения и фазовый момент возникновения за определенный интервал времени (секунда), измерение подобных характеристик при бесконтактном дистанционном методе связано с большими погрешностями, зависящими от расстояния между датчиком и ВИ, влияния климатических и внешних помех.

2. Наиболее важными и достоверными характеристиками ЧР при контроле технического состояния полимерных ВИ являются изменения фазовых интервалов, интенсивности и частоты повторения, соответствующих наиболее мощным ЧР, по сравнению с бездефектными ВИ того же типа.

3. Повышению точности измерений соответствует одновременное использование нескольких методов: акустического и тепловизионного, электромагнитного и акустического, а также дополнительно оптического с накоплением сигналов ЧР не менее, чем за 10 секунд и последующей компьютерной обработкой сигналов.

4. Диагностический прогноз дальнейшего срока технического состояния ВИ возможен на оценке изменения фазовых углов начала ЧР, количества и интенсивности самых мощных импульсов ЧР за длительный период (не менее одного часа, а также в течении месяца) воздействия высокого напряжения.

5. Установление длительного (~ 800 часов) периода изменения таких параметров МЧР в дефектных полимерных ВИ, как возрастание интенсивности и количества разрядов, сдвиг начала разрядов к нулевым или 180° значениям фазы переменного напряжения, могут быть использованы в качестве диагностических параметров при прогнозировании остаточного ресурса ВИ.

3. ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

3.1. Методологические аспекты диагностики технического состояния высоковольтных изоляторов

В последние десятилетия в электроэнергетике начинают находить применение методы контроля высоковольтных изоляторов с использованием характеристик частичных разрядов, что рекомендовано российским ГОСТ 2012-го года и международным стандартом 2010 г., а также с использованием других физических методов: акустический, оптический, тепловизионный и другие более экзотические методы. Большинство из них рассчитаны на применение дистанционных методов измерения ЧР без вывода электрооборудования из эксплуатации. Главными недостатками разработанных ранее методов и измерительных устройств является, как правило, применение при диагностировании только одного метода и соответственно одного устройства, отсутствие разработанных моделей, связывающих показания контролирующих приборов с характеристиками наиболее существенных дефектов и неисправностей. Вследствие этих обстоятельств разработанные однократные методы и устройства используются в отдельных энергосистемах только для выделения дефектных, не пригодных для дальнейшей эксплуатации высоковольтных изоляторов. Более того, до настоящего времени не разработаны отраслевые инструкции по оценке технического состояния ВИ с помощью метода ЧР, как это предполагалось последними ГОСТ.

Поэтому нашей главной задачей стала разработка метода дистанционной многократной диагностики с одновременным использованием нескольких физических методов, позволяющих оценивать не только текущее техническое состояние, но и прогнозировать остаточный ресурс ВИ. При таком подходе понадобилось не сколько оценить возможности уже существующих методик диагностики, но главным образом разработать методологию мониторинга

технического состояния ВИ в процессе эксплуатации и прогнозировании остаточного ресурса при неизменном высоком напряжении.

На первом этапе нашей работы были аналитически проработаны результаты многолетних исследований методов и полученных результатов на основе изучения источников в мировой и отечественной литературе и нормативных документов. В результате создания нескольких видов экспериментального оборудования и выполнения исследований на модельных образцах было установлено, что наиболее важным методом контроля и диагностики ВИ является использование набора характеристик ЧР. Поэтому после разработки и изготовления нескольких экспериментальных установок, описанных в Главе 2, в которых для определения текущего технического состояния ВИ был использован контактный способ регистрации ряда характеристик ЧР согласно ГОСТ Р 55191-2012 и бесконтактный способ с одновременным применением электромагнитных и акустических датчиков. Использование в обоих случаях оригинальной компьютерной программы записи, накопления и обработки сигналов импульсов ЧР позволило выполнить разработку методики не только комплексного измерения набора характеристик ЧР в дефектных ВИ, но и устанавливать более надежные и достоверные связи характеристик ЧР с параметрами дефектов, причем соответствующих не только текущему состоянию ВИ и других высоковольтных диэлектрических элементов, но и прогнозируемому остаточному ресурсу этих элементов. В первом варианте разработанной методики диагностики во многом использовались методические принципы, описанные в ГОСТ и международных стандартах, которые сводились к общей схеме: визуальный контроль состояния высоковольтных элементов → контактный способ измерения ряда рекомендованных характеристик → дистанционный бесконтактный метод измерения тех же характеристик ЧР. В последнем случае имелась возможность выполнять измерения в процессе эксплуатации без отключения исследуемых элементов из сети высокого напряжения.

Таким образом, далее нам предстояло решить следующие задачи, важные для дальнейшего развития диагностики и мониторинга высоковольтных диэлектрических элементов вопросы:

- установить степень соответствия измеренных параметров ЧР контактными и бесконтактными методами;
- определить соответствие измеренных параметров электромагнитным и акустическим датчиками;
- определить минимальный необходимый набор диагностических параметров по характеристикам ЧР для оптимального анализа технического состояния диэлектрического оборудования в текущий момент и прогнозирования его остаточного ресурса.
- найти отличие в параметрах самих ЧР для различных видов ВИ в зависимости от материала ВИ и класса напряжения, на который они рассчитаны.

3.2. Первоначальная диагностика состояния реальных высоковольтных изоляторов

В последние годы был предложен ряд методов для дистанционного измерения характеристик ЧР на ВИ [7], [9], [23], [62], [64], [67], [92]. С помощью изложенных там рекомендаций возможно диагностировать только факт дефектности изолятора без определения вида и места дефекта, поскольку в них предложено дистанционно измерять и анализировать только усредненные по всему образцу характеристики ЧР.

Как известно из многолетних теоретических и экспериментальных исследований [11], [22], [148], [149] основными видами дефектов в высоковольтных изоляторах являются поверхностные трещины (для фарфора) или объемные полости (для полимеров) в диэлектрическом стержне. Другим видом дефектов являются неплотные контакты между стержнем и оконцевателями [А7]. Дефекты в узлах сочленения стержня с оконцевателем наиболее опасны, поскольку электрическое поле в воздушном зазоре микроскопического размера может

существенно превосходить среднюю напряженность поля по образцу; эмиссия с катода (электрода) также будет значительно увеличивать ток через дефект и, тем самым, уменьшать порог электрического пробоя [1], [150], [151], [152], [153]. Поскольку в контакте стержень-оконцеватель, содержащем микроскопическую воздушную прослойку, возникает большая напряженность поля вблизи поверхности стержня, то при длительной эксплуатации происходит ускоренное старение и разложение диэлектрической среды, снижающие электрическую прочность изолятора. Поэтому важно разделять эти основные типы дефектов и места их расположения в изоляторе [А7]. Поскольку практически визуальный осмотр технического состояния находящихся в эксплуатации ВИ на ЛЭП или подстанциях практически невозможен, то мы применяли его только ограниченно для дефектных образцов, уже выведенных из эксплуатации.

Также предварительно были изучены значения интенсивностей ЧР для ВИ ЛК 70/35 в зависимости от приложенного напряжения (рис.3.1). Для этих образцов также характерно скачкообразное полевое изменение, ранее обнаруженное для модельных образцов (Глава 2, рис.2.3), причем ниже излома при 25 кВ значения суммарного кажущегося заряда $q(U_a)$ практически не зависели от вида дефекта и описываются выражением 1.4. Выше 25 кВ зависимость $q(U_a)$ больше соответствует выражению 1.6.

Для изучения характеристик ЧР от дефектов на стержне и дефектов «стержень-оконцеватель» впервые нами была разработана комплексная двухэтапная методика, включающая измерения характеристик ЧР контактно и дистанционно электромагнитным и акустическим датчиками.

Этот метод предварительно был опробован на серии полимерных низковольтных изоляторов типа ЛК 70/35, а затем на фарфоровых высоковольтных изоляторах ИОС 110/400. Особое внимание было обращено на образцы, имевшие дефекты двух типов: повреждения оболочки стержня и повреждение контакта «стержень-оконцеватель». Подобные виды дефектов, были вначале оценены визуально, а затем на экспериментальном стенде кафедры ПЭ КГЭУ были

измерены наборы характеристик ЧР [А10], поскольку для такого образца с большим дефектом, как показало дальнейшее рассмотрение, важную роль играет индуцированное предыдущими разрядами электрическое поле U на диэлектрических поверхностях дефекта [А7].

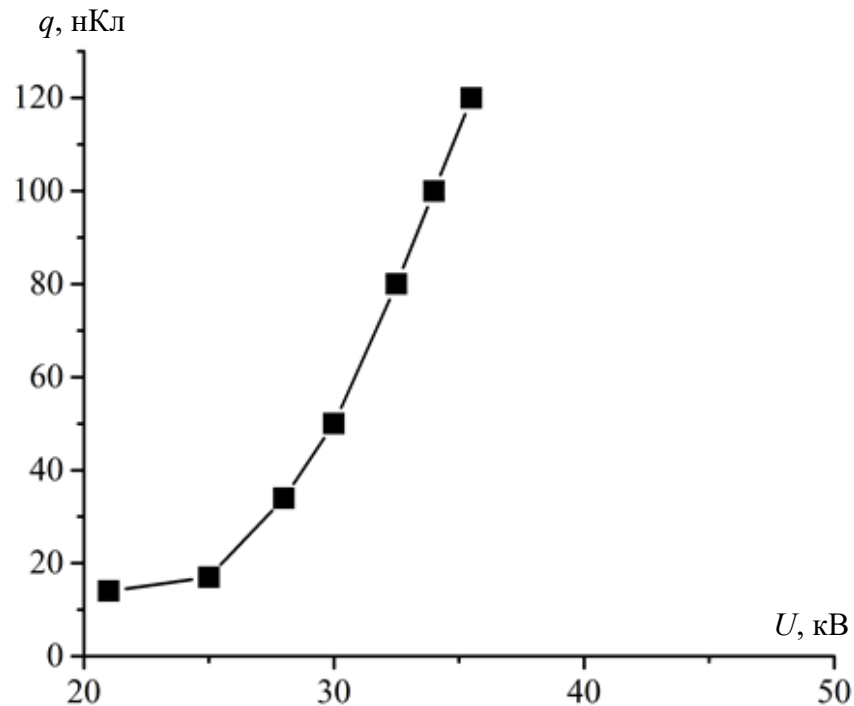


Рис. 3.1. Зависимость интенсивности усредненного максимального ЧР от приложенного напряжения для ПИ ЛК 70/35 с дефектом «стержень-оконцеватель», $d \approx 1$ мм

Это предположение нашло подтверждение в амплитудно-фазовых и количественно-фазовых характеристиках для ПИ, содержащих малые дефекты на стержне (рис. 3.2) и контакте «стержень-оконцеватель» (рис. 3.3).

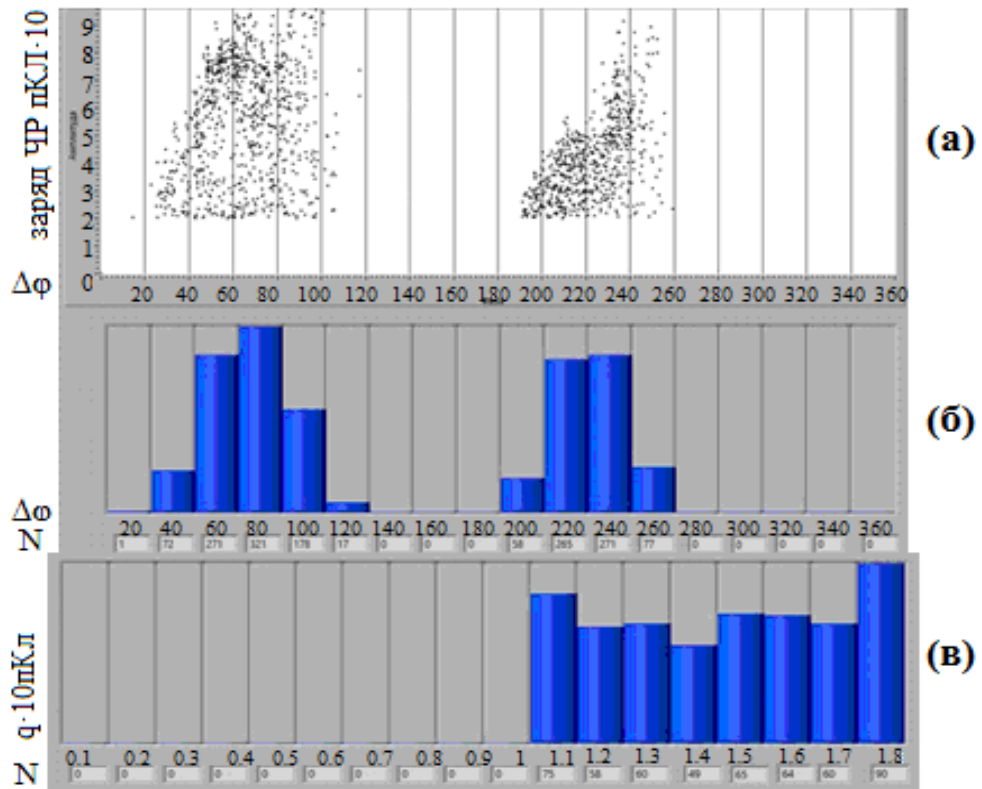


Рис. 3.2. Характеристики ЧР для условно малodefектного изолятора №4:

a – амплитудно-фазовая характеристика; *б* – распределение количества ЧР от фазового угла напряжения, *в* – распределение количества ЧР в зависимости от их интенсивности

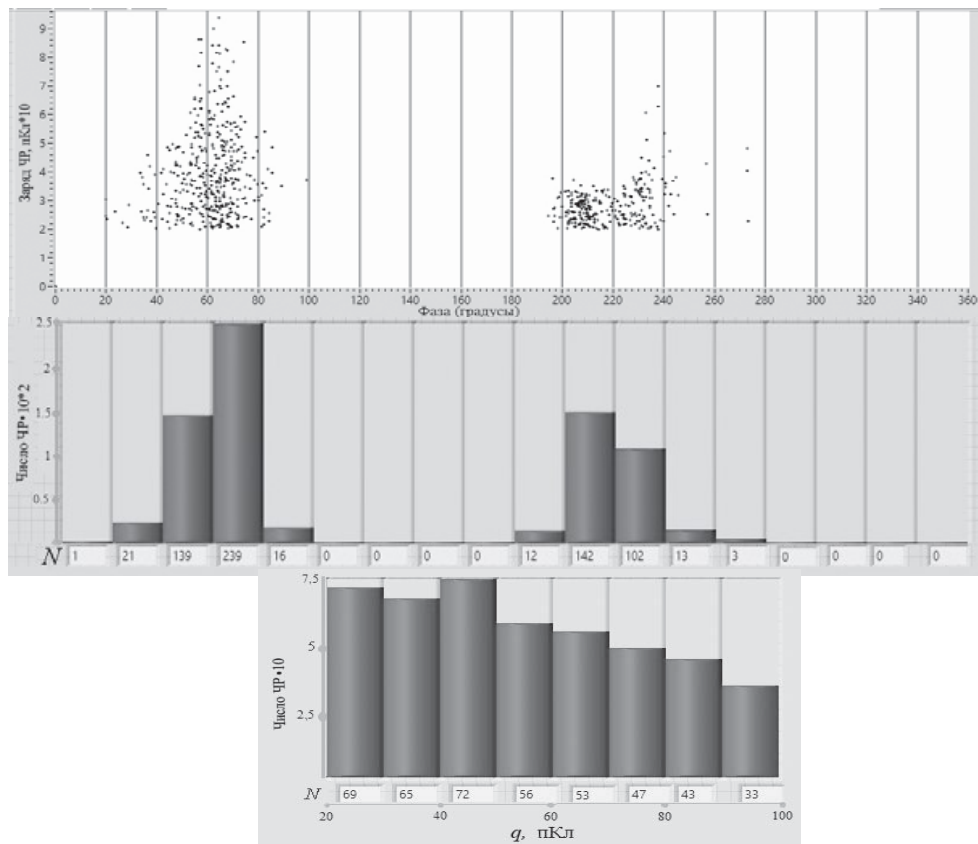


Рис. 3.3. Амплитудно-фазовая, количественно-фазовая и мощностная характеристики ЧР для малodefектного ПИ с дефектом «стержень-оконцеватель»

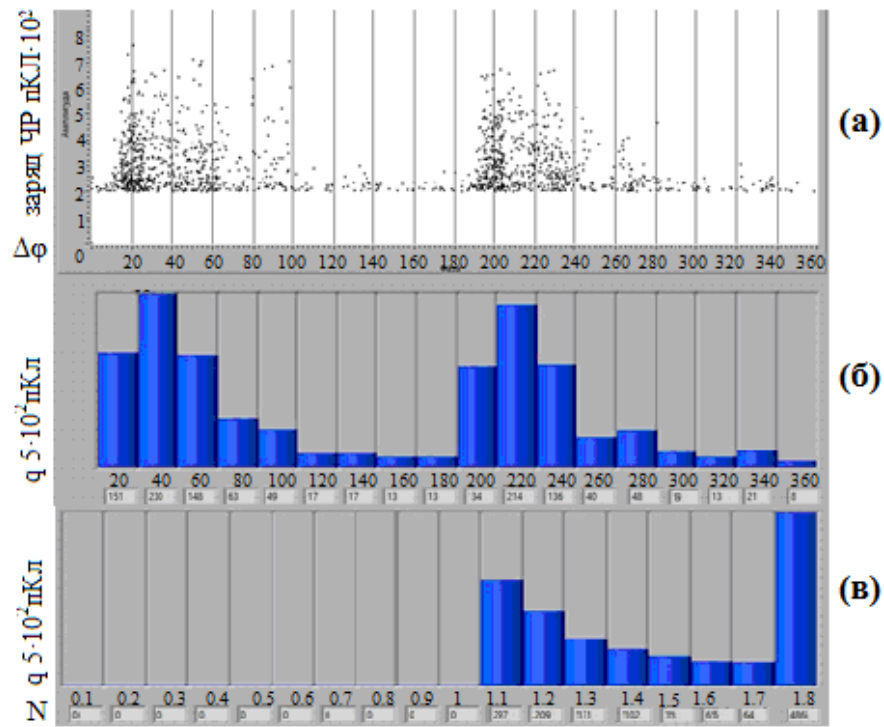


Рис. 3.4. Характеристики ЧР для дефектного изолятора №6 с дефектом на стержне:
a – амплитудно-фазовая характеристика; *б* – распределение количества ЧР от фазового угла напряжения; *в* – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности

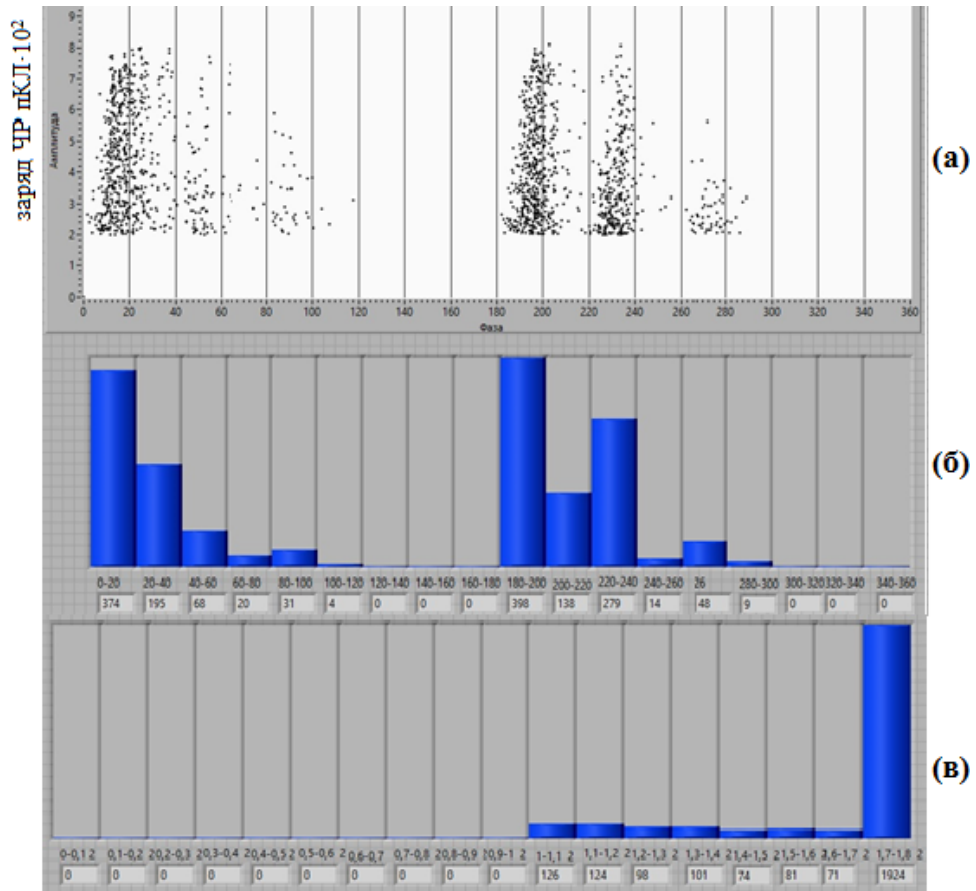


Рис. 3.5. Амплитудно-фазовая и количественно-фазовые характеристики ЧР для дефектного изолятора №7 (группа 3)

3.3. Результаты стендовых измерений характеристик ЧР с помощью электромагнитного и акустического датчиков

Предварительно на стенде с регулируемым источником высокого напряжения электромагнитным датчиком были изучены зависимости характеристик ЧР от значения высокого напряжения (U_{\sim}) на серии полимерных ВИ типа ЛК 70/35, ранее изученных контактным методом (раздел 3.2). Как следует из результатов измерений, представленных в табл. 3.1, для неработоспособного и работоспособного ВИ, они соответствуют данным, полученным контактным способом. Более того, данные по сдвигам фазовых углов возникновения ЧР, полученные методом ГОСТ Р55191-2012 при изменении U_{\sim} , соответствуют данным, полученным предложенным способом с использованием только номинального значения U_{\sim} .

Таблица 3.1 – Стендовая проверка разработанного метода. Зависимость характеристик ЧР от величины переменного напряжения (фазовых углов начала ЧР (ФН))

U , кВ	20	20	25	25	30	30	35	35
$\Delta\phi$	60° – 80°	240° – 260°	50° – 70°	230° – 350°	45° – 55°	230° – 245°	20° – 45°	200° – 240°
$\Delta\phi_{\text{центр}}$	70°	250°	60°	240°	55°	235°	330°	225°
N	57	71	340	344	382	332	397	347
q_{max}	1,7 – 1,8		1,7	1,8	1,7	1,8	1,7	1,8
N_{max}	774		772		677		660	
$\Delta\phi$	ЧР не наблюдались				60° – 80°	240° – 260°	60° – 80°	220° – 245°
$\Delta\phi_{\text{центр}}$					75°	255°	70°	240°
q_{max}					90	50	240	140
N_{max}					50	45	100	70
q					40	30	10	15

Измерения характеристик ЧР в полимерных ВИ выполнялись на лабораторном стенде кафедры ПЭ, позволяющим производить измерения характеристик ЧР как контактным методом согласно, так и комплексным бесконтактным, дистанционным методом. Во втором случае имитируются полевые условия: использование нормативного рабочего напряжения (35 кВ) при расстоянии узконаправленных электромагнитной и акустической антенн от изолятора ~5-7 метров [А12].

В начале измерений электромагнитный и акустический приемники градуируют по чувствительности с учетом расстояния до источника ЧР, используя параметры характеристик (частичный разряд q , средний ток I), полученные контактным методом для бездефектного изолятора того же типа [А12]. При использовании модельного представления ЧР в виде диполя [20], [154], а расстояние z между источником ЧР и приемником, соответствующим дальней зоне, напряженность электромагнитного поля E_d определяется из выражения 1.8. При неизменности L во время измерений, вполне уместно использовать значения E_d как эквивалент q . Измерения, выполненные двумя датчиками на образцах с малыми дефектами, вполне соответствуют друг другу (рис.3.2 и 3.3).

Выполненные более полные измерения характеристик ЧР одновременно электромагнитным и акустическим датчиками в сочетании с визуальным осмотром ПВИ и последующим компьютерным анализом параметров позволил разделить ПВИ по набору наиболее существенных различий на работоспособные и неработоспособные. Диагностическими признаками, отличающими работоспособные ВИ от неработоспособных, нуждающихся в замене, являются следующие: возникновение ЧР с интенсивностью, значительно (в 2-3 раза) превышающей порог безопасности при номинальном рабочем напряжении; сдвиг фазовых интервалов, в которых интенсивность и количество импульсов ЧР наиболее велики, в сторону меньших фазовых углов; увеличение количества более мощных ЧР в общем количестве ЧР за фазовые интервалы, соответствующие наиболее мощным ЧР; наличие локальных ПГП [А9].

Примеры полученных обобщенных характеристик ЧР и перенапряжений представлены на рис. 3.6 и в таблице 3.2, в которой приведены параметры наиболее интенсивных ЧР, составляющие ~ 10% от общего количества ЧР в каждом фазовом интервале [А9]. К работоспособным относятся ВИ № 1-5, а к неработоспособным – ВИ № 6-7. Между группами сдвиг фазы излучений ($\Delta\phi$) составляет 20-30%, возрастание интенсивности (q) достигает 2-3 раз, а количество ЧР увеличивается в 2-3 раза. Различия в величинах параметров ЧР за период регистрации в течение 10 минут не превышало 2-3% для обоих датчиков [А9].

Таблица 3.2 – Параметры характеристик ЧР для серии полимерных ВИ.

№ ВИ	$\Delta\phi$	q , пКл	N	$\Delta\phi$	q , пКл	N
1	45°-65°	60	200	220°-240°	60	1600
2	40°-60°	60	220	225°-235°	50	2000
3	50°-65°	70	200	230°-250°	60	1900
4	50°-65°	60	150	220°-240°	65	1000
5	45°-75°	70	180	230°-250°	75	1700
6	40°-50°	290	250	230°-240°	300	2600
7	35°-45°	270	280	220°-235°	270	2550

Оба вида малых дефектов характеризуются узкими мощностными излучениями интенсивности $N(q)$, причем они совпадают для электромагнитных и акустических датчиков (рис. 3.6), но различаются по параметрам излучения (по фазовым интервалам и интенсивностям ЧР, по формам импульсов, по степени разогрева части стержня). С возрастанием размеров дефекта «стержень-оконцеватель» наблюдалось увеличение фазовых интервалов излучения ЧР, возникли более мощные ЧР, и количество отрицательных ЧР возросло по сравнению с положительными ЧР [А9]. Одновременно наблюдались разогревы части стержней изоляторов на расстоянии порядка 10 см вблизи оконцевателя, примерно на 1-3 °С. По локальному нагреву диэлектрического стержня и форме

характеристик ЧР подобные дефекты были отнесены к дефекту типа «стержень-оконцеватель».

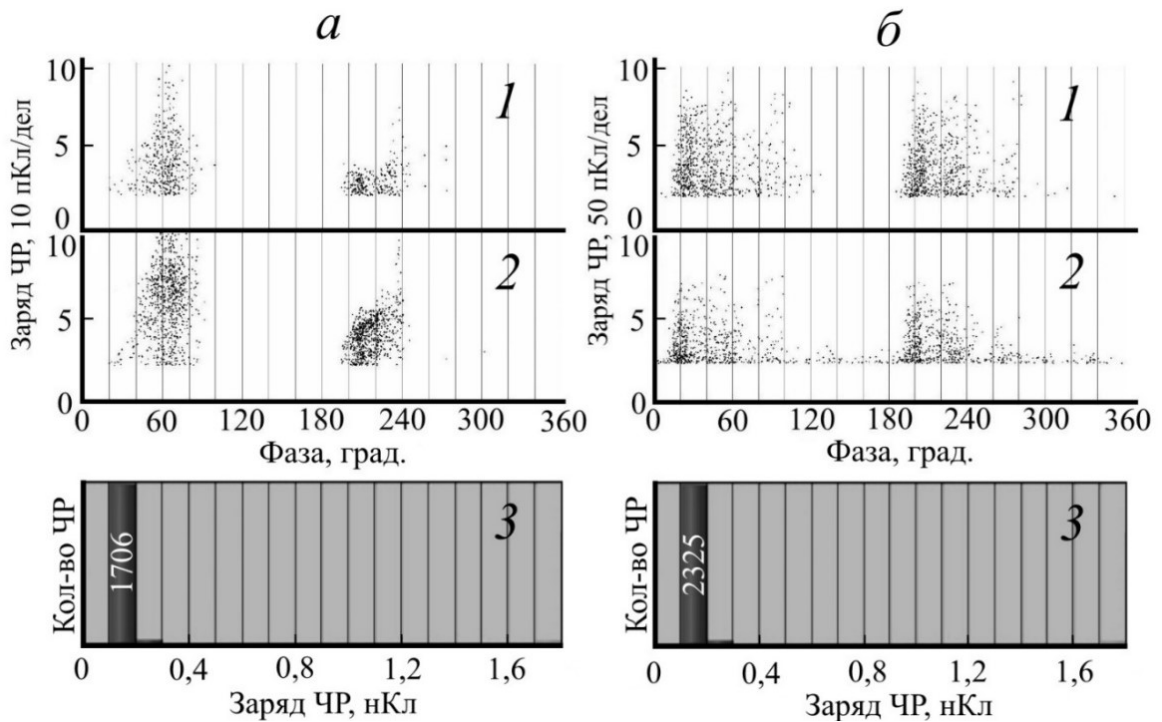


Рис. 3.6. Параметры ЧР, измеренные электромагнитным (1) и акустическим (2) датчиками, для образцов ВИ с малыми дефектами:

a – дефект на стержне, *б* – дефект «стержень-оконцеватель»,

3 – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности.

Более подробное изучение, полученных комплексным методом характеристик ЧР в упомянутых выше ВИ, позволило разделить их на три группы. К первой группе относятся ВИ с минимальным по числу n и интенсивности ($q \leq 20$ пКл) ЧР, расположенных в фазовых интервалах $\Delta\varphi$ 70° – 90° и 220° – 240° , (табл. 3.3) и не изменяющих характеристики ЧР со временем.

Другое, но не менее важное для практики, различие было обнаружено в характеристиках ЧР на самых дефектных полимерных изоляторах. Поскольку для них характерными дефектами являются образование треков на внешней поверхности стержня между ребрами оболочки и эрозии полимера на границе стержня и оконцевателя, то возможность различия этих дефектов весьма

существенна при диагностике. Было установлено, что для дефекта пробоя вдоль стержня характеристики ЧР (интенсивность и число ЧР) примерно одинаковы для положительных и отрицательных полупериодов высокого напряжения (рис. 3.4). В тоже время характеристики ЧР для дефектов на границе стержень-оконцеватель имеют более сложный вид. Как следует из графиков на рисунке 3.5 в отрицательной фазе наблюдаются значительные увеличения числа ЧР по сравнению с положительной. Более того сама структура распределения ЧР в ней имеет несколько максимумов в интенсивности ЧР, который скорее всего можно объяснить наличием следов нескольких разрядов на поверхности стержня.

Таблица 3.3 – Характеристики ЧР для трех групп полимерных ВИ.

Группа	№	U_i , кВ	$\Delta\varphi_+$	$\Delta\varphi_-$	N	qI , пКл	$\Delta\varphi_{\max}$	qI_{\max}	N_{\max}
1	2	35	75°-85°	250°- 265°	85	20	75°-85° 200°-205°	30	10
2	3	28	60°-80°	210°- 240°	210	50	65°-75° 235°-240°	100	15
2	4	23	60°- 80°	210°- 240°	300	55	65°-85° 240°-250°	100	20
2	1	25	60°- 80°	210°- 240°	270	45	60°-80° 245°-245°	110	20
3	5	20	20°- 60°	190°- 240°	350	400	40°-50° 190°-210°	800	30
3	6	20	15°- 60°	190°- 230°	250	370	15°-25° 195°	750	20
3	7	16	25°- 45°	204°- 235°	270	300	30°-40°	600	35

№ – номер изолятора, U_i – напряжения начала возникновения ЧР, $\Delta\varphi_+$ и $\Delta\varphi_-$ – фазовые интервалы ЧР для положительных и отрицательных полуволн высокого напряжения, qI – кажущийся заряд ЧР, N – число ЧР, $\Delta\varphi_{\max}$, ΔqI_{\max} и N_{\max} – интервал, кажущийся заряд и количество максимальных ЧР, превышающих среднее значение за период

Этот факт можно отнести к особенности пробоя газового промежутка между диэлектрическим стержнем и металлическим электродом (оконцеватель). Известно [20], что возрастание ширины газового зазора увеличивает напряженности поля в нем за счет разности диэлектрических проницаемостей диэлектрика и воздуха. Поэтому малые по интенсивности ЧР, возникающие при малых фазовых углах напряжения, свидетельствуют также о малых зазорах на контакте диэлектрик-электрод. Значительно большие размеры дефектов ($\sim 0,1-0,5$ мм) сопровождаются более интенсивными разрядами, возникающих в основном вблизи отрицательных по фазе максимальных напряженностей поля ($\varphi \approx 270^\circ$). Теоретически в этом случае работает эффект полярности пробоя [1], [155].

Кроме того, наблюдалось значительное отличие в распределении числа ЧР в зависимости от интенсивности ЧР для условно-бездефектных и дефектных полимерных ВИ (рис. 3.2 и 3.5) [A12]. Они были отнесены к бездефектным и полностью работоспособным ВИ. Ко второй группе относятся ВИ, содержащие ЧР ($N \leq 300$ и $q \leq 100$ пКл) с максимумами при $\Delta\varphi = 60^\circ-80^\circ$ и $210^\circ-240^\circ$, а также небольшое количество мощных ЧР с $N=20$ при $q=100-150$ пКл, не имевшие макроскопических дефектов, которые были отнесены к условно-бездефектным и работоспособным в настоящее время ВИ. В третью группу вошли ВИ имеющие макроскопические дефекты с размерами порядка нескольких мм и с ЧР, расположенными в фазовых интервалах $20^\circ-60^\circ$ и $190^\circ-240^\circ$ со средней интенсивностью порядка 350 пКл.

Более того, наблюдались отдельные ($N=20$) ЧР с интенсивностью 800 пКл [A12]. Эти ВИ были отнесены к малодефектным и работоспособным, не требующим замены изоляторам. На рис. 3.5 представлены характеристики ЧР, типичные для изоляторов третьей группы. Сравнение параметров фазовых интервалов для наиболее интенсивных и многочисленных ЧР групп 2 и 3, представленных на рис. 3.5 и 3.3 и табл. 3.1 и 3.2, показывает, что существует значительный фазовый сдвиг (более, чем в 2-3 раза) полос ЧР в сторону меньших фазовых углов, как для положительных, так и отрицательных фаз высокого напряжения.

Подобные характеристики ЧР для более дефектных образцов ЛК 70/35 приведены на рис. 3.4, 3.5. Они отличаются значительным сдвигом начала генерации ЧР в сторону меньших фазовых углов и относительно небольшим увеличением интенсивности и количества ЧР. Поскольку при бесконтактной диагностике точность измерения параметров ЧР (q и $N(\varphi)$) уменьшается, то главным параметром становится фазовый сдвиг начала генерации и увеличение количества мощных ЧР (рис. 3.4, в, и 3.5, в).

Ниже представлены результаты первого обследования технического состояния серии фарфоровых ВИ, находящихся в эксплуатации, с помощью разработанного комплексного метода. Всего было обследовано 38 ФИ типа ИОС 110/400 на подстанциях «Западная» и «Водозабор». Типичной особенностью таких подстанций является значительный разброс времени ввода ФВИ от 1974 до 2012 годов, отсутствие каких-либо документированных данных об их состоянии на данный момент [А7].

Измерения набора характеристик ЧР от каждого из изоляторов выполнялись двумя выносными антеннами с усилителями электромагнитных (частота 540 МГц) и акустических (40 кГц) импульсных сигналов ЧР. Расстояние от датчиков до ФВИ составляло порядка 6 метров. Использование узконаправленных антенн позволяло выделять сигналы ЧР от конкретных изоляторов. Фазовое рассогласование сигналов ЧР, за счет различия скоростей распространения акустических и электромагнитных волн, устранялось путем точного измерения расстояний с помощью лазерного дальномера [А7].

Дополнительно к ранее разработанной методике измерений с помощью высокочастотного осциллографа регистрировалась форма и ширина отдельных импульсов ЧР [А7].

Представленные на рис. 3.7, 3.8 характеристики ЧР относятся к малодефектным образцам, но образец №2 (рис.3.8) отличается несколько большей дефектностью, чем образец №3 (рис.3.7), что проявляется в увеличении полос интенсивности излучения ЧР на рис. 3.7, в и 3.8, в.

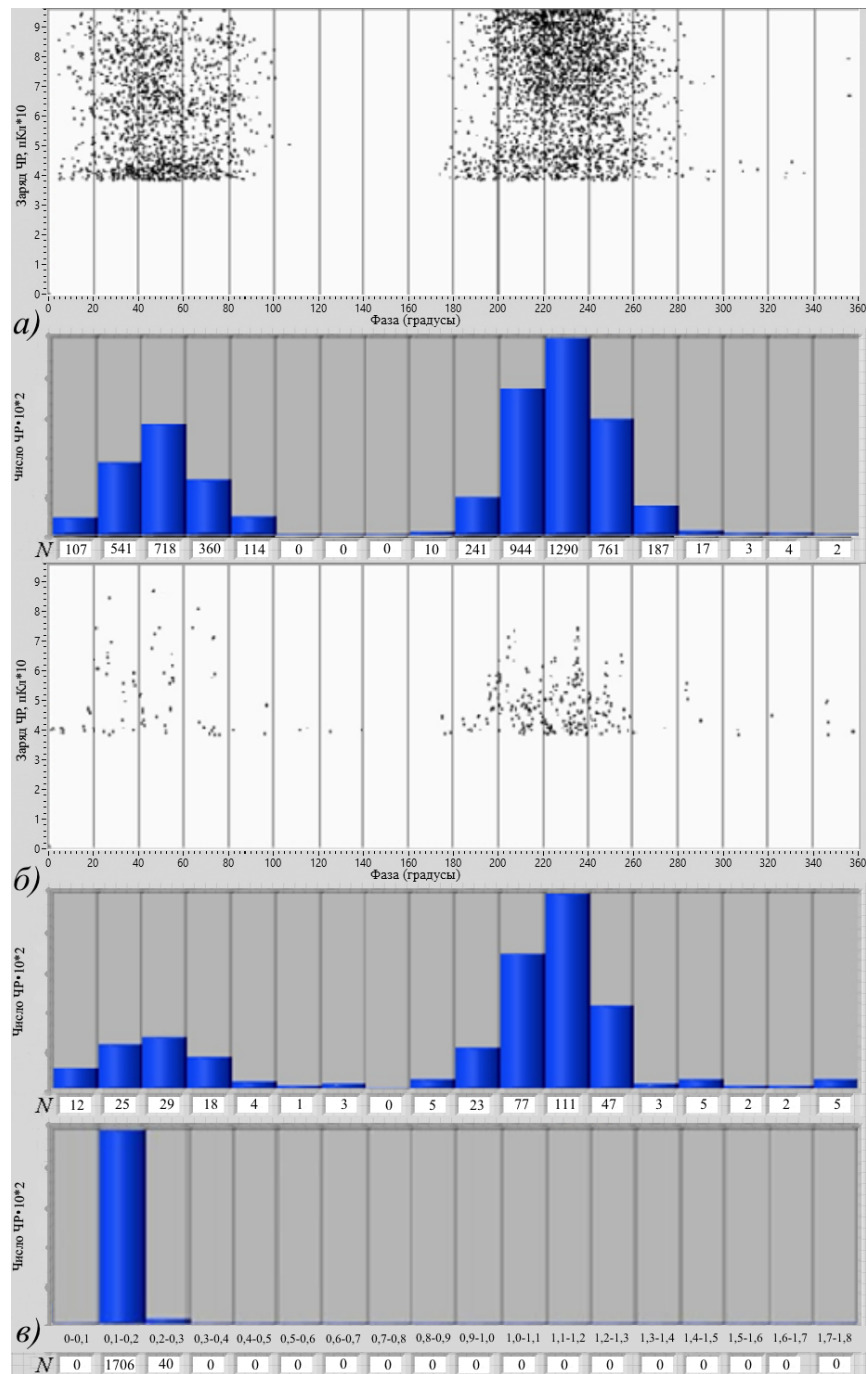


Рис. 3.7. Характеристики ЧР для работоспособного малодефектного ФВИ № 3:
а – амплитудно-фазовые характеристика и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным датчиком; *б* – амплитудно-фазовые характеристика и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные акустическим датчиком; *в* – зависимость количества ЧР от интенсивности (дефект на стержне)

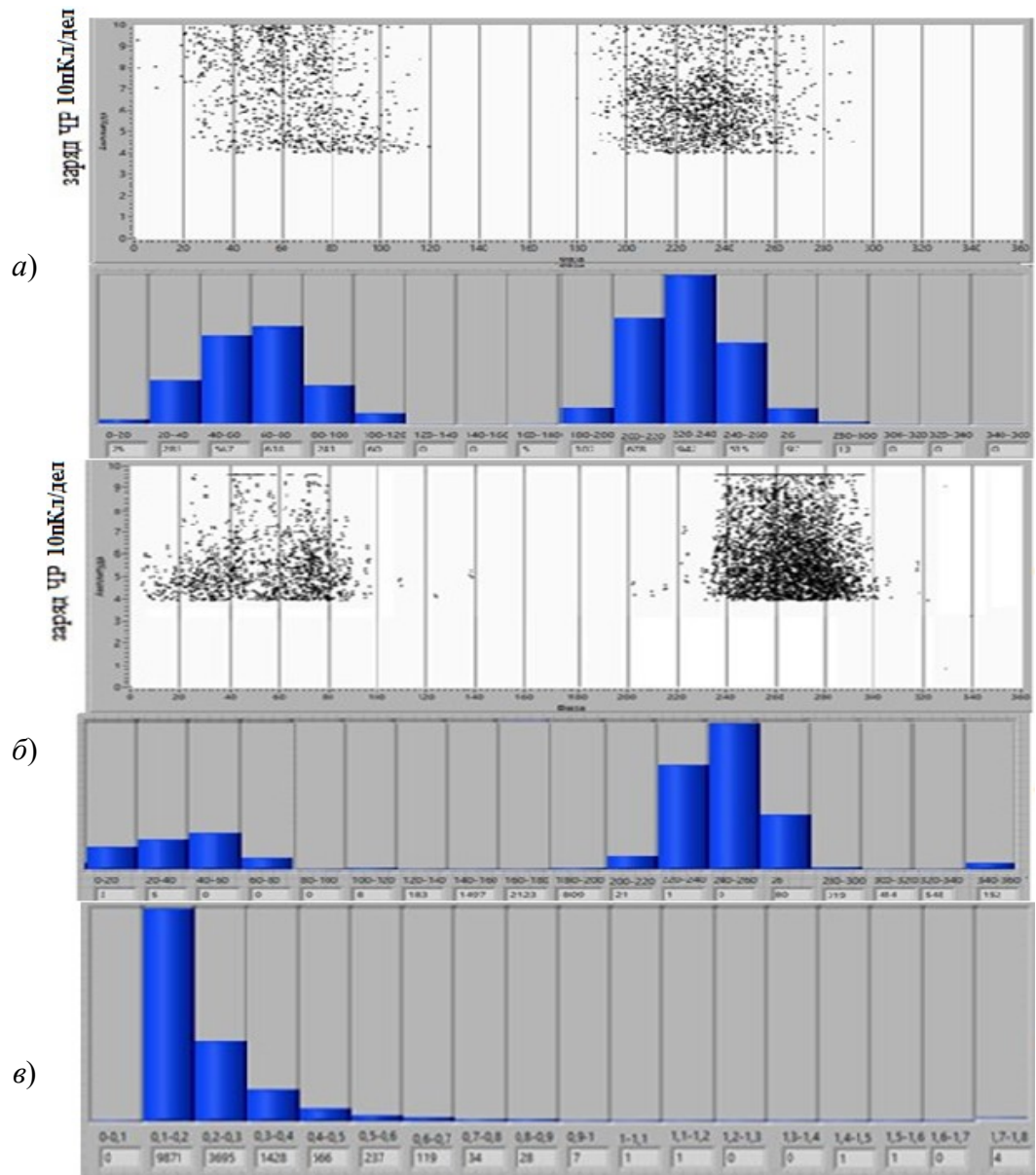


Рис. 3.8. Характеристики ЧР для работоспособного, малодефектного ФВИ №2:
а – амплитудно-фазовые характеристика и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным датчиком; *б* – амплитудно-фазовые характеристика и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные акустическим датчиком; *в* – зависимость количества ЧР от интенсивности (дефект «стержень-оконцеватель»)

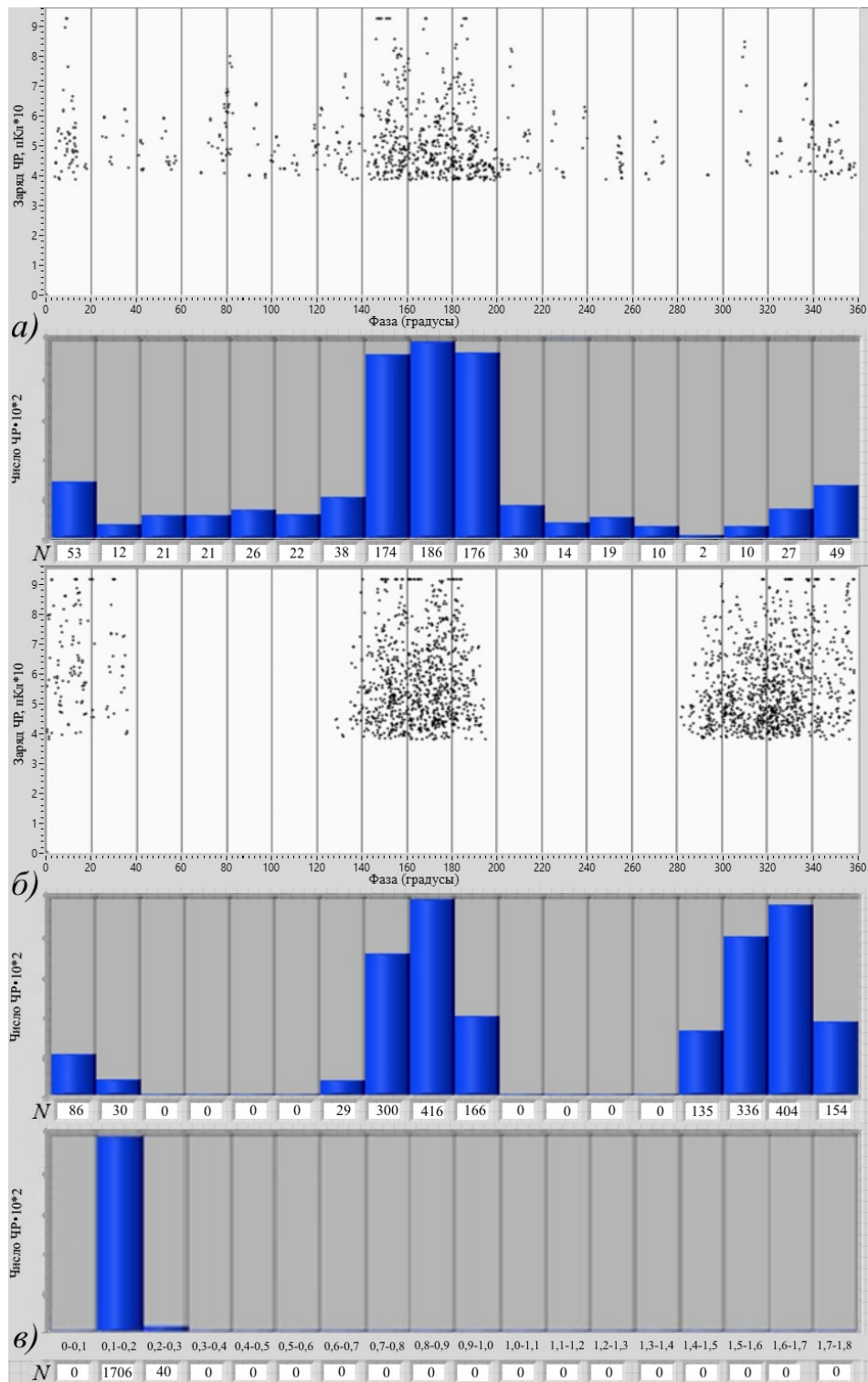


Рис. 3.9. Характеристики ЧР для ФВИ № 2, содержащего дефект «стержень-оконцеватель»: *а* – амплитудно-фазовые характеристика и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным датчиком; *б* – амплитудно-фазовые характеристика и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные акустическим датчиком; *в* – зависимость количества ЧР от интенсивности

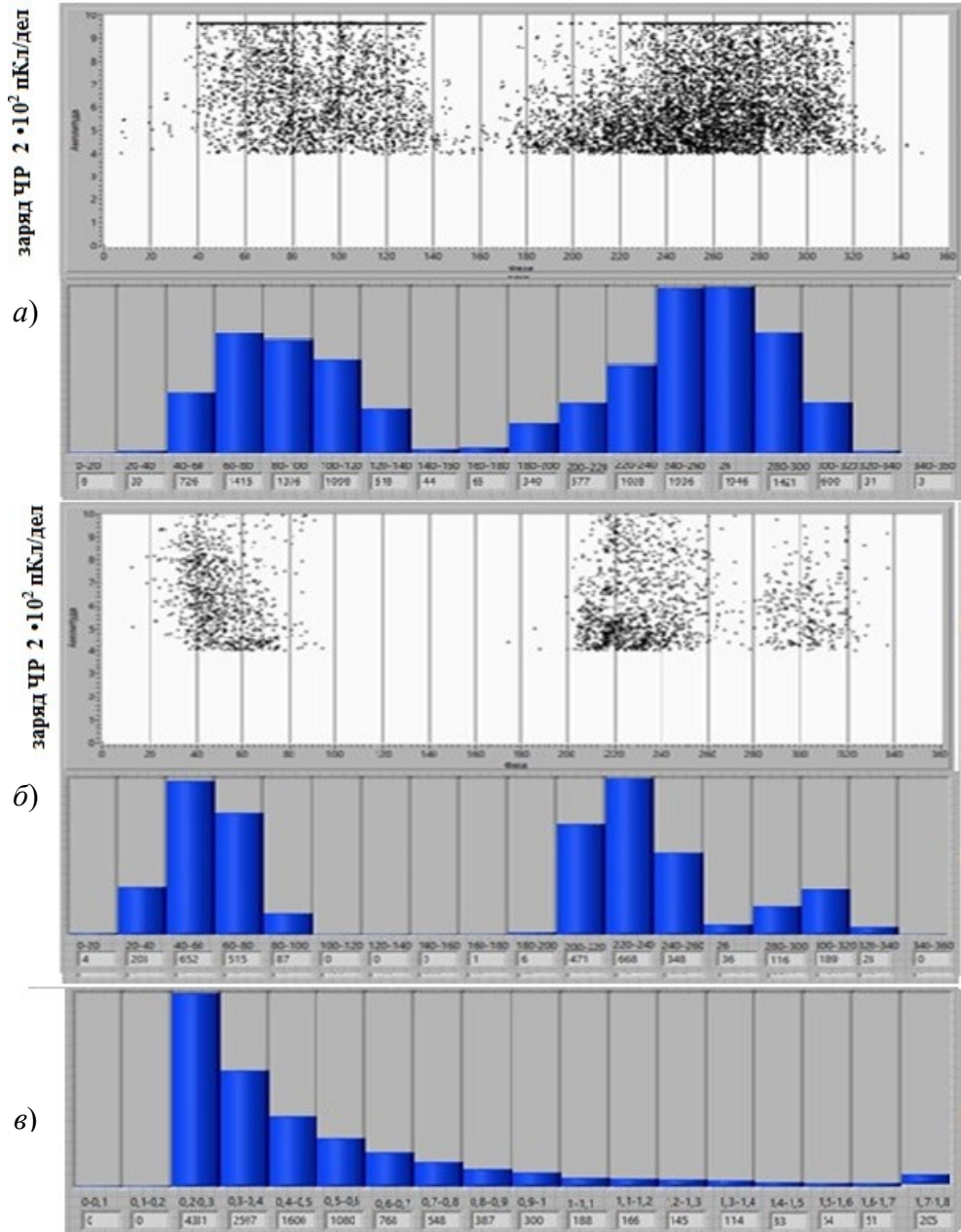


Рис. 3.10. Характеристики ЧР для более дефектного изолятора №6, чем ВИ на рис.3.7; *а* – амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным датчиком; *б* – амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные акустическим датчиком; *в* – зависимость количества ЧР от интенсивности

Измеренные характеристики ЧР в зависимости от фазы приложенного напряжения для образцов ФИ с малыми дефектами также, как и для ПИ мало отличаются для обоих видов дефектов (рис. 3.7, 3.8). Однако для больших дефектов

фазовое распределение ЧР для обоих дефектов приобрело значительные различия (рис. 3.9).

В соответствии с результатами предварительного изучения эффектов ЧР, было установлено, что наибольшей диагностической информативностью при дистанционном контроле обладают (по степени значимости) такие параметры как: изменение фазовых интервалов генерации ЧР ($\Delta\phi$), соответствующие наиболее мощным ЧР; их интенсивность ($q_{\text{мощ}}$) и количество за фазовый интервал ($N_{\text{мощ}}$); распределение количества ЧР по интенсивности, в сравнении с бездефектными и полностью работоспособными изоляторами [А7], [А10].

Выполненный нами анализ особенностей набора характеристик ЧР, позволил установить значительные различия в фазовом распределении интенсивности и количества импульсов ЧР для исследованных ВИ (табл. 3.4) [А13]. Часть характеристик ЧР имели типичное распределение, соответствующее ранее рассмотренным дефектам в виде трещин в модельных образцах (Глава 2) из полимера и электротехнического фарфора или дефектов на поверхности стержней ФВИ и ПВИ [А7].

Наше обследование позволило разделить ФВИ на 3 группы по степени дефектности, а, следовательно, – и работоспособности. К первой группе относятся полностью работоспособные ФВИ с минимальной интенсивностью ($q < 200$ пКл) и количеством ($N < 500$) ЧР, расположенных в фазовых интервалах вблизи 90° и 270° (рис.3.7). Ко второй группе – условно работоспособные и не требующие замены ФВИ, содержащие ЧР с $q \leq 300$ пКл и $N \leq 1000$ и $\Delta\phi$ в интервалах $50^\circ\text{--}80^\circ$ и $220^\circ\text{--}250^\circ$ действующего фазового напряжения (рис.3.8). К третьей группе отнесены ФВИ, сохраняющие работоспособность только в ограниченный интервал времени и требующие особого внимания и даже замены при ближайших регламентных обследованиях. Они отличаются резким по сравнению с первыми двумя группами, увеличением интенсивности мощных ЧР (до 2 нКл), количеством (в 2–5 раз) и сдвигом $\Delta\phi$ интервалов ЧР по отношению к фазовым периодам высокого напряжения [А16].

Таблица 3.4 – Параметры характеристик ЧР для трех групп ФВИ.

Параметры	Группа	1		2		3	
	методы	э-м	ак	э-м	ак	э-м	ак
$\varphi/\Delta\varphi$	Фазы						
	0°-180°	60°-80°	60°-80°	50°-70°	50°-70°	30°-50°	30°-50°
	180°-360°	240°- 260°	240°- 260°	230°- 250°	220°- 240°	210°- 240°	210°- 240°
q , пКл	0°-180°	180	130	270-280	220-240	210-240	210-240
	180°-360°	220	230	240-250	260-280	650	680
N	0°-180°	500	400	800	950	2000	3000
	180°-360°	200	600	900	1000	2200	2900
$\varphi/\Delta\varphi_{\max}$	0°-180°	0	0	0	0	40-60	40-60
	180°-360°	0	0	0	0	220-240	220-240
q_{\max}	0°-180°	0	0	0	0	2 нКл	1,8 нКл
	180°-360°	0	0	0	0	2 нКл	1,8 нКл
N_{\max}	0°-180°	0	0	0	0	100	100
	180°-360°	0	0	0	0	80	80

$\Delta\varphi$ - фазовые интервалы генерации ЧР; q – кажущийся заряд; N - количество ЧР за полупериод, знаки max обозначают параметры ЧР с интенсивностью выше 100 пКл.

Было установлено, что по параметрам ЧР большинство обследованных изоляторов относятся к первой (8) и второй (25) группам и только пять ФВИ к третьей группе (рис.3.10). В целом, нужно констатировать, что предложенный набор характеристик ЧР позволяет достаточно точно разделять работоспособные (1 и 2 группы) от ограниченно работоспособных изоляторов (3 группа), поскольку, если параметры ЧР первых двух групп различаются на 50-80%, то различие их от третьей группы превышало по интенсивность мощных ЧР в 5-8 раз [А16].

Более углубленный анализ параметров характеристик ЧР показал возможность на их основе определения типа дефекта и даже место его расположения. Как ранее было установлено [23], [24] для ФВИ наиболее характерны поверхностные трещины в диэлектрическом стержне и неплотные контакты между стержнем и фланцами (оконцевателями). В первом виде дефектов электрические пробои (перекрытия) возникают за счет повышения напряженности

E в воздушном зазоре по сравнению с напряженностью E_0 в диэлектрике [A16], определяемым как

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\varepsilon}{\frac{d}{d_0}(\varepsilon - 1) + 1} \quad (3.1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость фарфора, d – ширина зазора, d_0 – длина диэлектрика.

В реальных условиях размер зазора может изменяться в пределах от 1 до 20 мкм, а d_0 порядка 100 см и выше, E/E_0 будет пропорционально ε [A16].

Нами на основе проведенных экспериментов было предположено, что поскольку ЧР в основном возникают вследствие процессов ионизации воздушного зазора, то их появление определяется размерами трещины [A16], [156], [157]. Равномерное распределение количества и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения поверхности зазора в приложенном поле, что вполне удовлетворяет характеристикам ЧР для двух первых групп ФВИ. Небольшая интенсивность ЧР вполне соответствует малым размерам трещин, которые незначительно влияют на электрофизическое состояние ФВИ.

Резкая фазовая асимметричность ряда характеристик ЧР, так же, как и значительно большая интенсивность в третьей группе позволило связать некоторые мощные ЧР (МЧР) с дефектами между стержнем и оконцевателем [A16].

Электрический пробой в этом дефекте, как это уже рассматривалось теоретически [21] и экспериментально [24] на модельных образцах, имеет более сложный вид, чем при поверхностном пробое трещины. В данном случае пробой контакта, состоящего из электрода, зазора и стержня, происходит в воздушном зазоре за счет нормальной к зазору компоненты поля путем излучения электронов из электрода (катода). В результате электронной бомбардировки поверхности

диэлектрического стержня, на последней образуется индуцированное положительно заряженное поле ионов с плотностью до $10^{-6} - 10^{-5}$ Кл/см, которое успевает изменить знак при изменении фазы приложенного напряжения на π . Таким образом, момент возникновения и интенсивность ЧР определяются знаком и напряженностями приложенного и индуцированного полей. Как показали предварительные расчеты и измерения именно после перехода приложенного поля в отрицательную фазу может возникать условие суммирования обоих полей, что сопровождается генерацией самых мощных ЧР. Интенсивность ЧР так же зависит от площади и ширины зазора между электродом и диэлектрическим стержнем. Поскольку в условиях длительной эксплуатации эти параметры имеют случайный и неконтролируемый характер, то именно интенсивность и количество несимметричных по фазовым полупериодам ЧР может определяться параметрами дефекта (рис.3.9). Более того, при длительной эксплуатации подобного дефектного контакта в следствие электронно-тепловых процессов [58] происходит ускоренное старение и даже повреждение диэлектрика, что в конечном итоге снижает электрическую плотность изолятора [A16].

3.4. Диагностический электрооптический метод регистрации напряженностей электрических полей

В настоящее время в условиях активно развивающейся электроэнергетической отрасли становится все более актуальной проблема регистрации электрических полей промышленной частоты (50-60 Гц), являющихся частью сверхнизкочастотного диапазона радиочастотного спектра, наиболее распространенной как в производственных условиях, так и в быту. На производстве эти поля генерируются таким оборудованием, как линии электропередачи, открытые распределительные устройства, токопроводы, различные высоковольтные аппараты, трансформаторы, высоковольтные вводы, устройства защиты и автоматики, сборные соединительные шины, коммутаторы и т. д. Все эти устройства оказывают сильное негативное влияние не только на электронную

технику, но, самое главное, – и на окружающих людей. Воздействие на организм человека может приводить к нарушениям в работе нервной и сердечно-сосудистой систем, к изменениям в составе крови. Степень воздействия в первую очередь зависит от интенсивности и продолжительности излучения. Длительные воздействия приводят к патологиям различных органов. В соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами [158], [159], предельно допустимый уровень напряженности поля на рабочих местах обслуживающего персонала при воздействии в течение 1 ч за смену – 60 кВ/м [A15].

Как уже отмечалось выше, начиная с конца XX века, стал постепенно изменяться взгляд на диагностику технического состояния высоковольтного оборудования – от стендового контроля с выводом оборудования из эксплуатации к дистанционному контролю оборудования под рабочим напряжением. Однако до сих пор для реального обследования высоковольтных изоляторов предусмотрен только контактный электрический способ измерения параметров частичных разрядов, что закреплено и в новых стандартах [3], [4]. Согласно мировым данным по использованию дистанционных методов инспекции воздушных линий электропередачи и открытых распределительных устройств подстанций, больше чем 40 % компаний продолжают, в основном, осматривать оборудование визуально. Инфракрасная диагностика и наблюдения приборами ночного видения применяются примерно 15 % предприятий. Только несколько предприятий используют радио и ультразвуковой контроль [A15].

Таким образом, представлялось крайне важной возможность бесконтактного обнаружения источников электрических полей для определения степени их влияния на окружающее пространство [159], [160]. Кроме того, регистрация локальных перенапряжений в высоковольтных изоляторах может указывать на присутствие дефектов изоляции, которые, в конце концов, становятся причиной повреждений и даже разрушений изоляционных элементов. Именно поэтому необходимо контролировать возникновение локальных перенапряжений в процессе эксплуатации высоковольтной изоляции. А это наиболее удобно

осуществлять дистанционно и бесконтактно, так как в этом случае нет необходимости вывода оборудования из эксплуатации. Однако до последнего времени, несмотря на актуальность поставленной задачи, степень разработанности подобных способов контроля крайне мала. И, хотя уже существуют отдельные попытки их создания [161], [162], они до сих пор не нашли широкого применения в высоковольтных системах. Недостаточная разработанность дистанционных бесконтактных методов контроля перенапряжений в высоковольтной изоляции побудила нас продолжить исследования в этом направлении. Таким образом, целью наших дальнейших изысканий стало создание способа бесконтактного дистанционного измерения электрических полей на различных видах высоковольтной изоляции, в котором были бы устранены недостатки предыдущих разработок. Другими словами, была необходима разработка комплексного метода и соответствующего ему приборного обеспечения для непрерывной бесконтактной диагностики технического состояния на всех этапах эксплуатации высоковольтных изоляторов, начиная с момента включения их в электрическую сеть [A15]. Результатом исследований должно было стать обеспечение возможности регистрации момента возникновения преддефектного состояния за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля и измерения напряженности электрического поля в этих областях с последующим выделением дефектов.

Разработанный электрооптический способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтной изоляции [A15], [A21] заключается в следующем. По изменению коэффициента отражения лазерного пучка от электрооптического датчика контроля напряженности электрического поля определяются локальные области с повышенной напряженностью этого поля (поскольку изменение коэффициента отражения пропорционально напряженности электрического поля). Также с помощью электрооптического датчика производится измерение локальных напряженностей электрического поля. Датчик предварительно градуируют в калиброванном переменном электрическом поле.

Блок-схема разработанного устройства бесконтактной дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов представлена на рис. 3.11. Главный измерительный элемент устройства – электрооптический датчик (4) размещается непосредственно в высоком переменном электрическом поле, поскольку выполнен без использования металлических элементов. Волоконный световод также защищен от воздействия электрического поля [A15].

Электрооптический датчик представляет собой сегнетоэлектрический кристалл, на поверхности которого сформирована периодическая доменная структура (ПДС). Для повышения чувствительности и разрешающей способности при локации напряженности поля используются резонансные свойства ПДС для данной длины волны лазерного излучателя [A1, A2, A15].

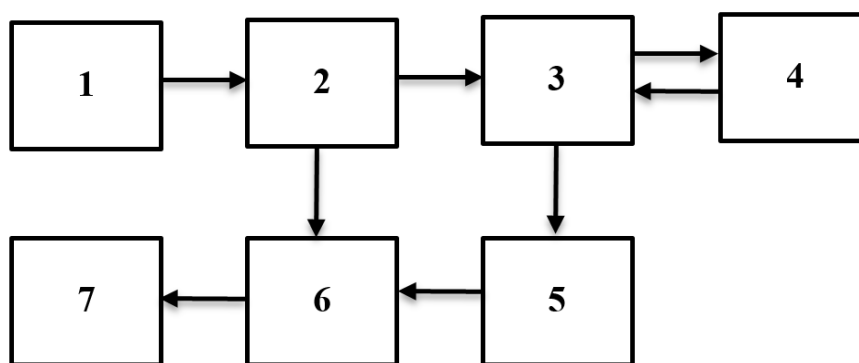


Рис. 3.11. Блок-схема устройства:

1 – лазерный излучатель, 2 – поляризационный дискриминатор, 3 – волоконный световод, 4 – электрооптический датчик, 5 – фотоприемник, 6 – узкополосный усилитель и компаратор, 7 – персональный компьютер

В ходе измерений для всех диагностируемых высоковольтных изоляторов определяют средние значения напряженности переменных электрических полей, соответствующие нормальному рабочему напряжению. Также определяют предельные границы напряженности электрических полей, при которых еще не происходит электрический пробой или перекрытие изоляторов [A15].

Для сканирования поверхности высоковольтных изоляторов электрооптический датчик размещают на диэлектрической штанге и соединяют через поляризационный дискриминатор (2) волоконным световодом (3) с лазерным излучателем (1), а также с фотоприемником (5). Датчик приближают к изолятору и проводят сканирование поверхности. Оператор при этом находится на безопасном расстоянии от высоковольтного изолятора и касается только диэлектрической штанги. Полученные данные регистрируются с помощью специально разработанного программного обеспечения, в котором записывается пространственное положение электрооптического датчика относительно поверхности изолятора и соответствующая данной точке напряженность электрического поля. Также с помощью компьютерной программы производится измерение нормальных и тангенциальных компонент напряженности электрического поля. Далее пространственное распределение повышенных, нормальных и тангенциальных к поверхности напряженности электрического поля сравнивается с ранее сохраненными эталонными значениями напряженности для полностью исправного высоковольтного изолятора. Общая схема измерений напряженности электрического поля представлена на рис. 3.12 [А15].

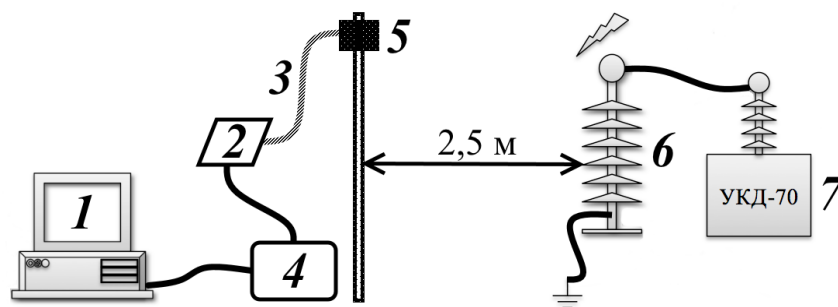


Рис. 3.12. Общая схема измерений напряженности электрического поля:

1 – персональный компьютер, 2 – лазерный излучатель и поляризационный дискриминатор, 3 – волоконный световод, 4 – блок управления, включающий фотоприемник и узкополосный усилитель с компаратором, 5 – электрооптический датчик, размещенный на диэлектрической штанге, 6 – высоковольтный изолятор, 7 – установка для испытания диэлектриков УКД-70

Физический принцип работы электрооптического датчика основан на эффекте изменения показателя преломления лазерного пучка, проходящего через периодическую доменную структуру, находящуюся в электрическом поле с напряженностью E . Этот эффект носит название «линейный электрооптический эффект» или «эффект Поккельса» [A15].

Условие максимального отражения (или прохождения) лазерной волны с длиной λ_0 от ПДС в этом случае выполняется при равенстве

$$\lambda_0 = 2 n D \text{ (отр.)}; \lambda_0 = (2 n + 1) D \text{ (пр.)} \quad (3.2)$$

где n – показатель преломления, D – период ПДС [A15].

Электрическое поле напряженностью E , приложенное к ПДС, создает, вследствие линейного электрооптического эффекта (рис.3.13), изменение показателя преломления и, следовательно, сдвиг резонансной частоты ПДС, что соответствует изменению резонансной длины волны [163]

$$\lambda_m = (\lambda_0 - \lambda_E) = n^3 r D E, \quad (3.3)$$

где r – электрооптический коэффициент, λ_E – длина волны в приложенном электрическом поле.

Таким образом, максимальный коэффициент отражения R лазерной волны от ПДС, убывает с увеличением λ_m [163].

Изменение коэффициента отражения R можно представить в виде

$$\Delta R = (dR / dE) E. \quad (3.4)$$

Из этого выражения следует

$$E = \lambda_m (n^3 r D)^{-1}, \quad (3.5)$$

а значит

$$dR / dE = (dR / d\lambda_m) n^3 r D. \quad (3.6)$$

В общем виде зависимость значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны можно представить в виде графика (рис. 3.13) [163]. Если длину волны лазерного излучения λ_m настроить на середину склона спектральной кривой отражения, соответствующей значению $R_{max}/2$, то переменное электрическое поле будет создавать соответствующее изменение коэффициента отражения ΔR . Использование практически линейного отрезка $dR/d\lambda_m$ позволяет в линейном масштабе определять значения поля E .

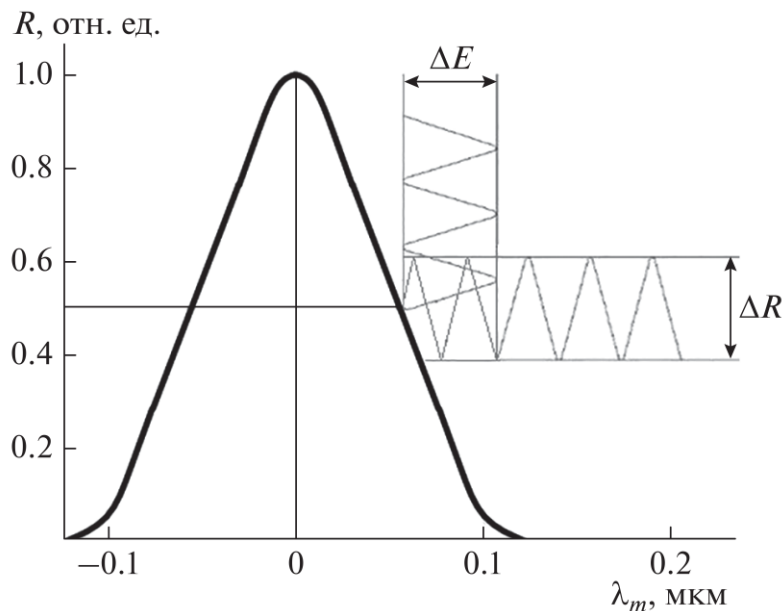


Рис. 3.13. Зависимость значения коэффициента отражения R от изменения резонансной длины волны

Используя предложенный метод дистанционного бесконтактного измерения напряженности электрического поля, нами была выполнена диагностика состояния

группы реальных высоковольтных полимерных изоляторов ЛК 70/35. Эксперименты проводились на стенде кафедры «Промышленная электроника» КГЭУ. Состояние изоляторов проверялось путем сканирования электрооптическим датчиком вдоль стержня изолятора на расстоянии 2,5 м [А15].

В ходе предварительных экспериментов были выявлены несколько дефектных изоляторов с поврежденным контактом стержень-электрод, а также ряд изоляторов, находящихся в преддефектном состоянии. На рис. 3.14 приведено распределение напряженности электрического поля вдоль образца для дефектного (а) и бездефектного (б) полимерных изоляторов типа ЛК70/35. Небольшое увеличение потенциала вблизи оконцевателей обоих образцов можно объяснить отсутствием специальных экранов для выравнивания поля по всей длине [А15].

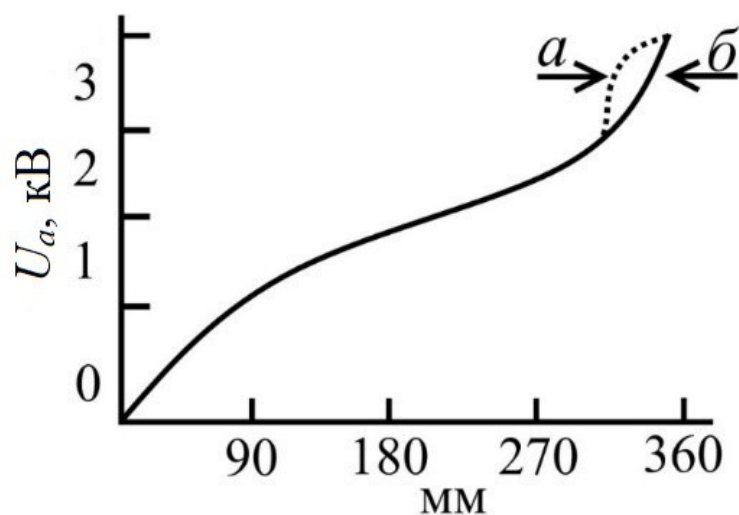


Рис. 3.14. Распределение потенциала между оконцевателями дефектного (а) и бездефектного (б) изоляторов. Изменение поля на дефекте изображено пунктиром

Таким образом, можно полагать, что представленный способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов, основанный на использовании фотонного кристалла в качестве электрооптического датчика, позволяет определять момент возникновения преддефектного состояния изоляторов за счет выявления областей с повышенной напряженностью электрического поля. Измерение напряженности электрического поля в этих

областях позволяет прогнозировать возможное место образования дефектов в процессе эксплуатации [A15].

Затем разработанный комбинированный метод был опробован на серии полимерных изоляторов типа ЛК 70/35 [A3, A10]. Особое внимание было обращено на образцы, имевшие один из дефектов: повреждения оболочки стержня и повреждение контакта «стержень-оконцеватель». Выполненный нами анализ особенностей набора характеристик ЧР, позволил установить значительные различия в фазовом распределении интенсивности и количества импульсов ЧР для исследованных ВИ. Часть характеристик ЧР имели типичное распределение, соответствующее ранее рассмотренным дефектам в виде трещин в модельных образцах из электротехнического фарфора или дефектов на поверхности стержней ФВИ и ПВИ (рис. 3.15) [A7].

Электрический пробой в другом виде дефекта изолятора (группа 3), как это уже рассматривалось теоретически [164] и экспериментально [94] на модельных образцах, имеет более сложный вид, чем при поверхностном пробое трещины. ЧР на дефекте «стержень-оконцеватель» характеризуются уширением и сдвигом фазовых интервалов излучения, увеличением их количества в отрицательных полупериодах напряжения, изменением формы ЧР. В данном случае, пробой контакта, состоящего из электрода, зазора и стержня, происходит в воздушном зазоре за счет нормальной к зазору компоненты поля, путем излучения электронов из электрода (катода). В результате электронной бомбардировки поверхности диэлектрического стержня на последней образуется индуцированное заряженное поле ионов с плотностью до 10^{-6} – 10^{-5} Кл/см, которое успевает изменить знак при изменении фазы приложенного напряжения на 180° [A7].

Таким образом, момент возникновения и интенсивность ЧР определяются знаком и напряженностями приложенного и индуцированного полей, когда их сумма превышает поле электрического разряда. Как показали расчёты и измерения, именно после перехода приложенного поля в отрицательную фазу возникает условие суммирования обоих полей, что сопровождается генерацией самых мощных ЧР, а при разности приложенного и индуцированного полей, –

уменьшением общего поля и затягиванием фазовой полосы излучения ЧР [А7, А13].

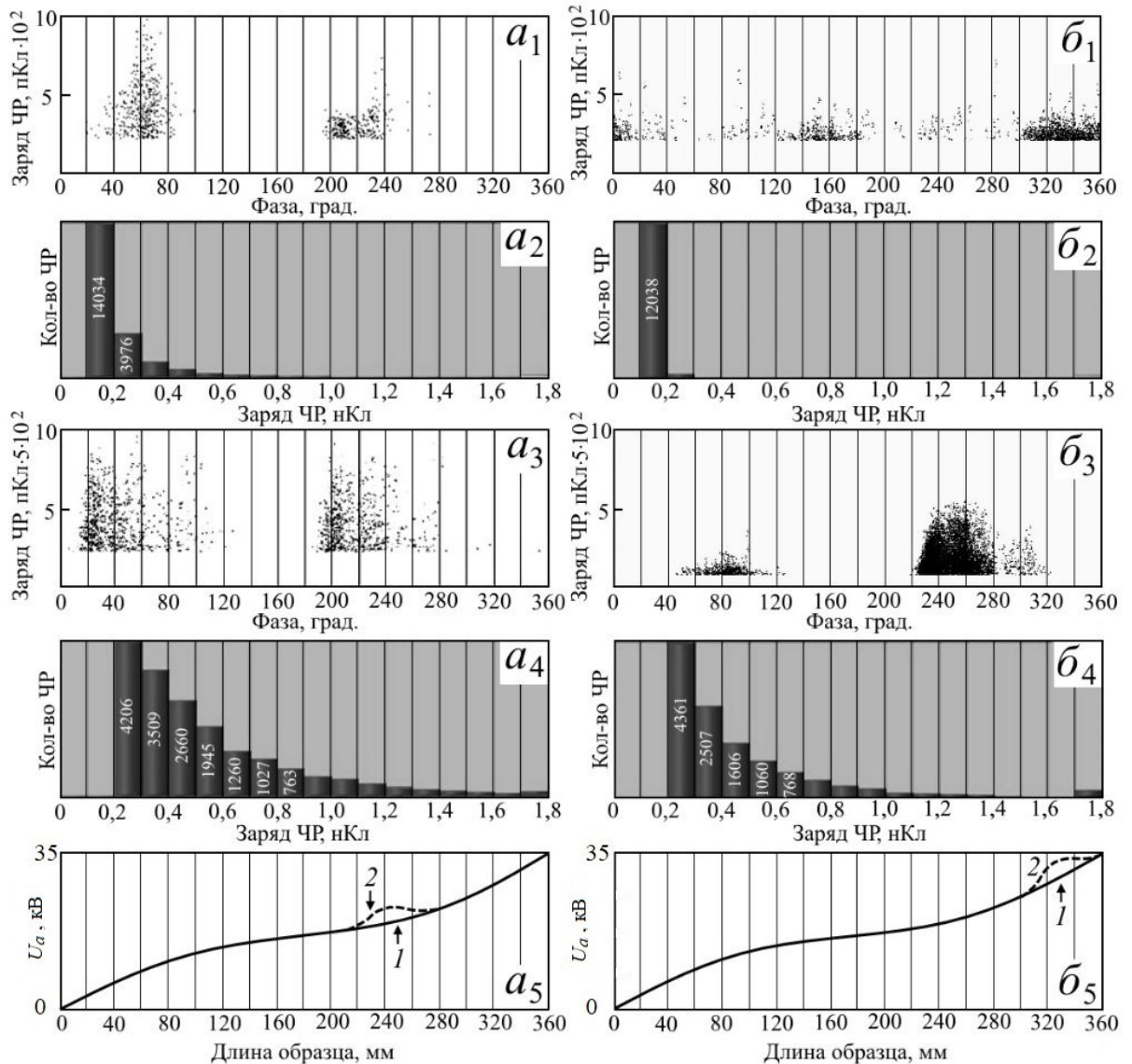


Рис. 3.15. Параметры ЧР (1 – 4) и распределение потенциала электрического поля на дефекте (5) в полимерных ВИ, измеренные соответственно электромагнитным и электрооптическим датчиками: *a* – для образцов с дефектами на стержне, *б* – с дефектами «стержень-оконцеватель»; *a*₁, *a*₂ и *б*₁, *б*₂ – для малых дефектов; *a*₃, *a*₄ и *б*₃, *б*₄ – для больших дефектов; *a*₅, *б*₅ – пространственное распределение потенциала

Интенсивность ЧР так же зависит от площади и ширины зазора между электродом и диэлектрическим стержнем. Поскольку в условиях длительной

эксплуатации эти параметры имеют случайный и неконтролируемый характер, то именно интенсивность и количество несимметричных по фазовым полупериодам ЧР может определяться параметрами дефекта. Более того, при длительной эксплуатации подобного дефектного контакта, вследствие электронно-тепловых процессов [58], происходит ускоренное старение и даже повреждение диэлектрика, что в конечном итоге снижает электрическую прочность изолятора [А7].

Следует отметить, что индуцированное поле E_i вследствие ЧР так же влияет на характеристики ЧР, смещая в сторону больших фазовых углов окончание интервалов излучения ЧР, но так как процессы генерации ЧР при смене знака приложенного напряжения симметричны, поскольку $E_i < E_a$, при малых размерах дефекта, то интенсивность и количество ЧР мало изменяются. Различие формы импульсов положительных и отрицательных ЧР связано с тем обстоятельством, что первые создаются индуцированными в плазме воздушного промежутка положительными зарядами, а отрицательные импульсы ЧР в основном инициируются более быстрым потоком индуцированных электронов [А7].

Изложенные результаты выполненного обследования технического состояния ВИ с помощью разработанного двухканального метода в стендовом и полевом вариантах доказали возможность дистанционно диагностировать степень работоспособности ВИ в условиях их эксплуатации и обнаруживать вид и место расположения наиболее опасных дефектов. Это стало возможным при добавлении к ранее установленным нами диагностическим признакам дистанционного контроля, отличающим исправные ВИ от дефектных, дополнительных признаков, позволяющих определять вид и место расположения дефектов. К ним относится значительное расширение и изменение фазовых интервалов излучения ЧР, увеличение количества и интенсивности ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, уменьшение ширины отрицательных импульсов ЧР, наличие больших локальных напряженностей электрических полей [А7].

3.5. Усовершенствованный способ дистанционной диагностики

В процессе изучения большого количества полимерных и фарфоровых изоляторов, рассчитанных на различные рабочие напряжения, наряду с обычными по виду амплитудно-фазовыми и количественно-фазовыми характеристиками ЧР стали появляться и более сложные по фазовой зависимости характеристики. Они отличались наличием больших по интенсивности ЧР вблизи фазовых углов 0° и 180° , а также различием амплитудно-фазовых характеристик, полученных электромагнитным и акустическим датчиками. Эти различия затрудняли определение вида и места расположения дефектов, особенно в процессе эксплуатации.

Стала все более очевидной необходимость в расширении как методов детектирования ЧР, так и сочетанием ряда методов. Одновременно с нашими исследованиями в России и за рубежом происходило развитие методологии диагностики модельных образцов, имитирующих дефекты высоковольтного энергетического оборудования с использованием более сложного набора диагностических параметров. Это привело к созданию новых ГОСТ 2012 года и международного стандарта, которые не полностью удовлетворили потребностям дистанционной диагностики, что и побудило нас создать усовершенствованную систему диагностических методов и параметров для контроля ВИ. Его основу составляют два устройства – универсальный испытательный стенд и автоматизированная система мониторинга (Глава 5).

Как известно из теоретических и экспериментальных исследований, основными видами дефектов в высоковольтных изоляторах являются поверхностные трещины (для фарфора) или объемные полости (для полимеров) в диэлектрическом стержне. Другим видом дефектов являются неплотные контакты между стержнем и оконцевателями. Дефекты в узлах сочленения стержня с оконцевателем наиболее опасны, поскольку электрическое поле в воздушном зазоре микроскопического размера может существенно превосходить среднюю напряженность поля по образцу, эмиссия с катода (электрода) также будет

значительно увеличивать ток через дефект и тем самым уменьшая порог электрического пробоя. Поскольку в контакте стержень-оконцеватель, содержащим микроскопическую воздушную прослойку возникает высокая напряженность поля вблизи поверхности стержня, то при длительной эксплуатации происходит ускоренное старение и разложение диэлектрической среды, снижающие электрическую прочность изолятора. Поэтому важно разделять эти основные типы дефектов и места их расположения на изоляторе [A7].

Одной из наших задач являлось создание способа бесконтактной диагностики технического состояния находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов. Техническим результатом должна была являться возможность определения наличия опасного дефекта, его вида и места расположения, а также оценки степени его влияния на работоспособность изолятора. Наличие дефектов устанавливается путем определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения среднего количества и интенсивности импульсов частичных разрядов, которые превышают допустимый порог для их возникновения для конкретного типа изоляторов.

В разработанном нами способе бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов [A22], осуществляется детектирование электромагнитным приемником импульсных сигналов частичных разрядов, их индикация и компьютерная обработка с целью определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений количества и интенсивности импульсов частичного заряда, которые превышают допустимый порог для возникновения дефектов или их развития по сравнению с эталонным изолятором [A16]. Кроме того, дополнительно определяют распределение количества частичных разрядов по интенсивности для положительного и отрицательного полупериодов высокого напряжения, а о наличии и виде наиболее опасных дефектов судят по расширению фазовых интервалов излучения частичных разрядов и резкому увеличению количества частичных разрядов в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами.

При этом дополнительно определяют ширину и форму одиночных положительных и отрицательных импульсов частичных разрядов и по их различиям (увеличению ширины отрицательного импульса) устанавливают вид и место дефекта.

Вид и место расположения наиболее опасных для нормального функционирования изоляторов определяют по трем предлагаемым в данном способе диагностическим признакам:

- значительному уширению фазовых интервалов излучения частичных разрядов;
- резкому увеличению количества частичных разрядов в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами;
- значительному отличию формы одиночных импульсов частичных разрядов для положительных и отрицательных сигналов.

Определение количества импульсов и значений интенсивности ЧР (в единицах заряда), превышающих допустимый безопасный уровень при эксплуатации и форма импульсов ЧР для каждого типа изоляторов выполняется путем сравнения с подобными характеристиками изолятора того же типа, принятого за эталон.

Выводы к главе 3

1. Путем выполнения измерений и аналитического сравнения различных наборов характеристик ЧР на разработанных и изготовленных установках, использующих контактный и бесконтактный дистанционный методы на образцах полимерных и фарфоровых изоляторов разработаны методологические основы мониторинга технического состояния различных видов высоковольтных изоляторов.

2. Установлено, что параметры характеристик ЧР позволяют получать более обширную информацию о текущем техническом состоянии ВИ и прогнозировании

его дальнейшего остаточного срока службы, в том числе о процессах зарождения и развития дефектов.

3. Разработан и осуществлен новый электрооптический метод дистанционного измерения напряженности высоких электрических полей с повышенной напряженностью, что позволит определять возможное место образования дефектов в процессе эксплуатации диэлектрических элементов.

4. Разработан более эффективный по сравнению с ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) и дополняющий их полученным патентом способ дистанционной диагностики, позволяющий определять техническое состояние ВИ, выявлять наличие, вид и место расположения наиболее опасных для нормального функционирования ВИ дефектов по установленному набору диагностических параметров ЧР.

5. Установлена роль динамических процессов перераспределения индуцированных предыдущими ЧР электрических полей в области дефекта в развитии дефектного состояния ВИ.

4. МОЩНЫЕ ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РОСТ ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

4.1. Особенности образования и регистрации мощных частичных разрядов

В последнее десятилетие особое внимание в электроэнергетике, как в России, так и за рубежом, было обращено на проблему возрастания числа аварий в высоковольтном оборудовании, возникших из-за повреждений высоковольтных изоляторов, особенно с повышением рабочего напряжения ($U_a > 100$ кВ) [А8]. Анализ аварий на подстанциях и открытых распределительных устройствах показал, что повреждения ВИ в большинстве случаев вызваны не только естественным старением в приложенном электрическом поле, но и перенапряжениями, а также развитием первоначальных дефектов в процессе эксплуатации ВИ. Вследствие этого, в последние годы разрабатывались различные методы бесконтактной диагностики ВИ с целью выявления дефектов на ранней стадии их развития [6], [7]. При дистанционной диагностике с использованием метода ЧР, с увеличением расстояния между датчиками и ВИ уменьшается чувствительность, и регистрируются сигналы только от крупных дефектов. Это обстоятельство было подтверждено нами во впервые выполненных обследованиях ВИ на подстанциях ОАО «Сетевая компания» с помощью двухканального дистанционного метода с использованием электромагнитного и акустического датчиков [А12], а также при дистанционной диагностике полимерных ВИ акустическими и тепловизионными датчиками [А8], [11].

Более того, в ряде недавних теоретических работ [71], [97], [165], [166], [137], [80], [167], [168], [168], [169], [170] моделировалась возможность возникновения больших напряженностей ЭП, индуцированных ЧР на дефектах в диэлектриках [А8]. По предварительным оценкам, подобные индуцированные напряженности полей могут превосходить по напряжённости значения ЭП в дефектных полостях

ВИ при нормальном рабочем напряжении и создавать мощные ЧР (МЧР), вызывающие разрастание дефектов.

В качестве модельных объектов в работах [91], [97], [98], [165] рассматривались только простейшие структуры в виде полимерных блоков, содержащих заполненные воздухом полости.

Изучение физических процессов, сопровождающих ЧР, началось ещё в конце XX века [93], [171] с создания общих моделей разрядов через газовые полости между электродами [172], [155], [173]. Например, модели замкнутой полости [174] на основе использования закона Пашена, устанавливающего связь между напряжением зажигания заряда U_s , давлением газа p в промежутке между электродами и размером d промежутка

$$U_s = p \cdot d \quad (4.1)$$

Позднее общая модель разрядов в газах была уточнена именно для ЧР в объеме или на поверхности для диэлектрических материалов [174], [175]. В ходе расчетных экспериментов и модельных экспериментов были установлены виды разрядов в зависимости от значения U_s в формуле Пашена. Для малых значений $p \cdot d$ электронно-лавинная стадия пробоя может переходить в стримерную, а затем в искровую стадию с увеличением напряженности приложенного поля. Однако было предположено, что в определенных условиях может возникать переход от стримерного разряда к разряду Таунсенда [176], что подтверждается с большой степенью вероятности в модельных экспериментах на сформированных полостных дефектах в полимерах при относительно малой напряженности приложенных полей [A19], [65]. Однако с повышением и напряженности полей и размеров дефектов в подобных модельных экспериментах последних лет стали проявляться более сильные эффекты, связанные с возникновением и последующим накоплением большого количества зарядов от предыдущих ЧР, которые создают индуцированные напряженности полей, значительно превосходящих приложенное

поле [177]. Поэтому в наиболее значительных публикациях последних пяти лет, имеющих обзорный характер [91], [145], [146], делается вывод о многопараметричности процессов и механизмов генерации, распространения и погасания ЧР в газовых полостях диэлектриков. Основное внимание обращено именно на изменение проводимости диэлектрических полостей дефекта, его размеров и давления газа в полости дефекта. Причем изменение проводимости во время ЧР может изменять (увеличивать) интенсивность ЧР на порядок, так же, как и изменение размеров полости или давления приводит к росту интенсивности ЧР [A19].

В наших экспериментах практически невозможно следить за изменением параметров газа в полости дефекта в процессах ЧР. Более того, выполненное ранее изучение зависимости изменения заряда в ЧР действительно указало на зависимость $q_{\text{ЧР}}$ от параметров газовой смеси в полости дефекта [76]. Однако в более поздних подобных экспериментах была установлена более сильная зависимость $q_{\text{ЧР}}$ от параметров самого дефекта для мощных ЧР [A19].

Таким образом, можно констатировать, что до настоящего времени даже в модельных экспериментах, выполненных в Англии, США, Японии, Китае, России (Новосибирск), не удалось, как утверждают сами авторы, получить непротиворечивую картину комплекса физических процессов во время мощного частичного разряда. Следует подчеркнуть, что большинство предыдущих исследований физических процессов, сопровождающих ЧР, выполнялось на модельных образцах полимеров на одном из двух видов смоделированных дефектов [A19].

Главной целью нашей работы была разработка методологии диагностирования рабочего состояния различных видов высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации, способной предупреждать возникновение больших дефектов, которые могли бы нарушить функционирование системы изоляторов подстанций и линий электропередачи [A19]. Разработанная система мониторинга во многом основана на обнаруженном эффекте мощных ЧР,

создающих накопление индуцированных электрических зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов, которые образуют электрические поля с напряженностью, превосходящей напряженность приложенных полей к ВИ. Ранее этот эффект наблюдался и изучался только в модельных экспериментах. Следует подчеркнуть, что индуцированные предыдущими мощными ЧР напряженности полей на границах больших дефектов значительно превосходят, как это уже установлено модельными экспериментами и нашими результатами на реальных ВИ [А3], возможные изменения напряженности полей первичных ЧР в том числе и при переходах потока заряженных частиц при ЧР от стримерного к Таунсендскому механизму в диэлектрических полостях [А19], [174], [155], [178].

К настоящему времени уже появились работы, в которых были предложены и рассмотрены несколько физических моделей формирования МЧР и их влияния на деградацию диэлектрических элементов высоковольтного энергетического оборудования. Основное внимание было обращено на новое поколение полимерных диэлектриков, нашедших широкое применение в конденсаторах, трансформаторах, кабелях и других высоковольтных устройствах [11]. Гораздо меньше внимания было обращено на экспериментальное изучение возникновения МЧР и их влияния на развитие дефектов в реальных высоковольтных диэлектрических элементах. В экспериментальных работах, судя по имеющимся результатам в доступных нам публикациях, основное внимание было обращено на дефекты в виде плоских полостей или заполненных газом сфер [73], [179], [180], [143], [181], [182], [183]. Практически отсутствуют работы по изучению МЧР в современных высоковольтных изоляторах [А19].

Эти обстоятельства стали главной причиной проведения нами уже во втором десятилетии этого века цикла экспериментальных исследований МЧР на реальных ВИ в процессе эксплуатации. Главными задачами было изучение зависимостей параметров МЧР от характеристик вызывающих их дефектов, а также разработка методик одновременного бесконтактного детектирования МЧР электромагнитным, акустическим и другими методами [А19]. Особая сложность подобной разработки физических моделей процессов излучения МЧР состояла в том факте, что в

реальных ВИ дефекты в отличие от модельных образцов имеют более сложную конструкционную форму. Поэтому основное внимание было обращено на наиболее опасные при эксплуатации дефекты в виде протяженных треков или полостей в диэлектрическом стержне и плоских полостей на границе раздела «стержень-оконцеватель». Именно такие дефекты, как было установлено в процессе наших экспериментов [A10, A12], являются главными причинами возникновения МЧР [A19].

Поскольку ранее компьютерная симуляция процессов распространения ЧР в диэлектрических воздушных полостях большей частью не сопровождалась их экспериментальным подтверждением, то целью нашей работы стало изучение влияния ЧР на физическое состояние обнаруженных ранее дефектов в ВИ [7], [8]. Для выполнения поставленной цели, в разработанный нами измерительный комплекс был добавлен блок бесконтактного измерения локальных изменений напряженности и полей ЧР, основанный на электрооптическом эффекте с применением представленного фотонного кристалла в качестве датчика напряжённости приложенного поля (описан в Гл. 3). Для большей достоверности при оценке вида и параметров дефектов была усовершенствована физическая модель формирования импульсов ЧР, в зависимости от вида и расположения дефектов в реальных ВИ. Также была дополнена компьютерная программа, позволяющая наиболее полно анализировать характеристики ЧР при их детектировании одновременно электромагнитным и акустическим датчиками, а также выделять наиболее мощные ЧР. Была разработана многоступенчатая программа и измерительный комплекс для изучения влияния дефектов на работоспособность ВИ, включающая первоначальное обнаружение локальных областей ВИ с повышенными напряженностями поля, измерение набора характеристик ЧР двумя датчиками, определение вида и места расположения основных дефектов ВИ, оценку влияния мощных ЧР на динамику дефектов в ВИ [A8].

Испытания в стендовом варианте электрооптического метода показали, что разрешающая способность по пространственному обнаружению напряженности

ЭП, определяемая длиной и периодом доменов в ПДС, составляет порядка 0,5-2 мм, а точность измерения напряженности – не менее 50 В/см. Электрооптический датчик позволяет не только определять локальные напряженности приложенного ЭП, но и регистрировать их динамические изменения в зависимости от фазы переменного напряжения $\Delta E/\Delta \varphi$, соответствующие характеристикам ЧР, измеряемым электромагнитным и акустическим датчиками [A16, A10].

Таким образом, разработанный комплексный метод диагностики ВИ впервые позволил определять вид, место расположения и степень влияния дефектов на работоспособность ВИ [A8, A16] как в стендовом, так и в полевом вариантах.

Как уже отмечалось ранее (Глава 1) при функционировании ВИ наиболее опасны дефекты на контакте между стержнем и оконцевателем (электродом), а также и на стержне. В первом случае дефект можно представить в виде полости, заполненной воздухом и ограниченной с одной стороны диэлектрической поверхностью, а с другой – металлической поверхностью (рис. 1.3). Во втором случае – полостью, ограниченной двумя диэлектрическими поверхностями (рис. 1.4). В обоих видах дефектов можно приближенно считать, что превышение поля в полости (E_K) по отношению к приложенному полю в диэлектрике (E_a) E_K/E_a пропорционально отношению диэлектрических проницаемостей ϵ_d/ϵ_b [A8].

Первоначально для дистанционного исследования процессов взаимодействия приложенного поля E_K с дефектом были визуально отобраны полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации при плановом обследовании и имевшие дефекты вида «контакт стержень-оконцеватель» и «стержень». Для полевых исследований были выбраны фарфоровые ВИ ИОС 110/400, находящиеся под рабочим напряжением 110 кВ. Поскольку до настоящего времени на электрических подстанциях по-прежнему эксплуатируется большое количество фарфоровых изоляторов, то мы выполнили сравнительное изучение особенностей МЧР в обоих видах ВИ [A3, A6, A19].

4.2. Измерение параметров мощных частичных разрядов

С помощью электромагнитного и акустического датчиков бесконтактно были изучены характеристики ЧР, в том числе МЧР, на стенде кафедры ПЭ КГЭУ (ЛК70/35) и на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания» в фарфоровых (ИОС110/400) изоляторах [А19].

На основе измерений было установлено, что необычные свойства ЧР начинают проявляться уже начиная с интенсивностей $q \geq 1,5-2$ нКл, а их максимальная интенсивность может достигать 5-7 нКл. Причем до интенсивностей ЧР $q \leq 3$ нКл большинство параметров характеристик ЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками, совпадают с точностью до 70-90 %, за исключением абсолютных значений интенсивности q и количества N [А9].

С учетом приведенных выше обсуждений мы разделили наборы параметров ЧР в исследованных образцах на три группы (табл. 4.1), различающиеся по интенсивности 1,5 нКл, 1,5 – 2,5 нКл и выше 3 нКл. Подобное разделение вполне очевидно, поскольку только начиная со второй группы возникает влияние индуцированных зарядов предыдущих ЧР на формирование МЧР и начинается проявление различий в детектируемых сигналах ЧР электромагнитным и акустическим датчиками [А9].

К наиболее существенным различиям наборов параметров ЧР и МЧР, приведенных в табл. 4.1, которые могли бы на наш взгляд служить основой для разработки системы диагностических параметров для оценки технического состояния ВИ в процессе эксплуатации, относятся следующие [А9]:

- Возникновение МЧР вблизи нулевых значений приложенного высокого напряжения U_a (то есть при фазах $0^\circ-180^\circ-360^\circ$), рис.4.1.

- Увеличение количества МЧР в отрицательных полупериодах U_a по отношению к положительным полупериодам (рис.4.2). Если для первых двух групп образцов это соотношение N_+/N_- близко к единице, то для третьей группы $N_- / N_+ > 1$, и оно возрастает с увеличением дефектности.

- Увеличение суммарного кажущегося заряда МЧР с возрастанием количества МЧР (рис.4.3).

- Увеличение интенсивности МЧР с ростом размеров дефектов (рис.4.4).

Таблица 4.1 – Параметры ЧР, детектируемые электромагнитным и акустическим датчиками в полимерных изоляторах

Группы		1) $q \leq 1,5$ нКл		2) $1,5 \leq q \leq 2,5$ нКл		3) $q \geq 2,5$ нКл	
Виды дефектов		Малые		Средние		Большие	
Датчики		Эл.магн.	Акуст.	Эл.магн.	Акуст.	Эл.магн.	Акуст.
q , пКл	+	10-20	10-20	20-50	50-200	200	1000
	-	10-20	10-20	50-500	100-500	500	2000
N	+	15-25	15-25	10-30	50-100	100-150	100-200
	-	15-25	15-25	30-50	100-500	500	3000-5000
$\Delta\phi$	+	60°-100°	60°-100°	40°-100°	30°-140°	20°-100°	20°-160°
	-	240°-280°	240°-280°	200°-300°	200°-320°	200°-300°	200°-340°
$\phi_{нач}$	+	60°-40°	60°-40°	30°-40°	30°-40°	20°-30°	20°-30°
	-	220°-240°	220°-240°	210°-220°	210°-220°	190°-200°	190°-200°
$N_{общ}$		$10^4 - 1,9 \cdot 10^4$		$5 \cdot 10^3 - 10^4$		$3 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$	$10^3 - 3 \cdot 10^3$
N_{max}						30-150	50-250
$N_{max} / N_{общ}$						$0,8 \cdot 10^{-2}$	$3,36 \cdot 10^{-2}$

$\Delta\phi$ – фазовые интервалы излучения ЧР; ϕ – фаза начала излучения ЧР для положительных и отрицательных полупериодов; q – кажущийся заряд; $N_{общ}$ – количество ЧР за период измерений; N_{max} – количество ЧР с $q > 1,8$ нКл за период измерений в 18 с.

Следует отметить, что приведенные выше особенности характеристик ЧР и МЧР в той же или иной форме также были обнаружены и обсуждены при изучении дефектов в виде сфер или вытянутых трехмерных эллипсоидов в образцах полимерных материалов в Великобритании [95], Китае [91] и США [137]. Ниже будет приведено сравнение результатов нашего изучения ряда параметров МЧР [A14] с параметрами дефектов в реальных ВИ с результатами, полученными на модельных образцах [A19].

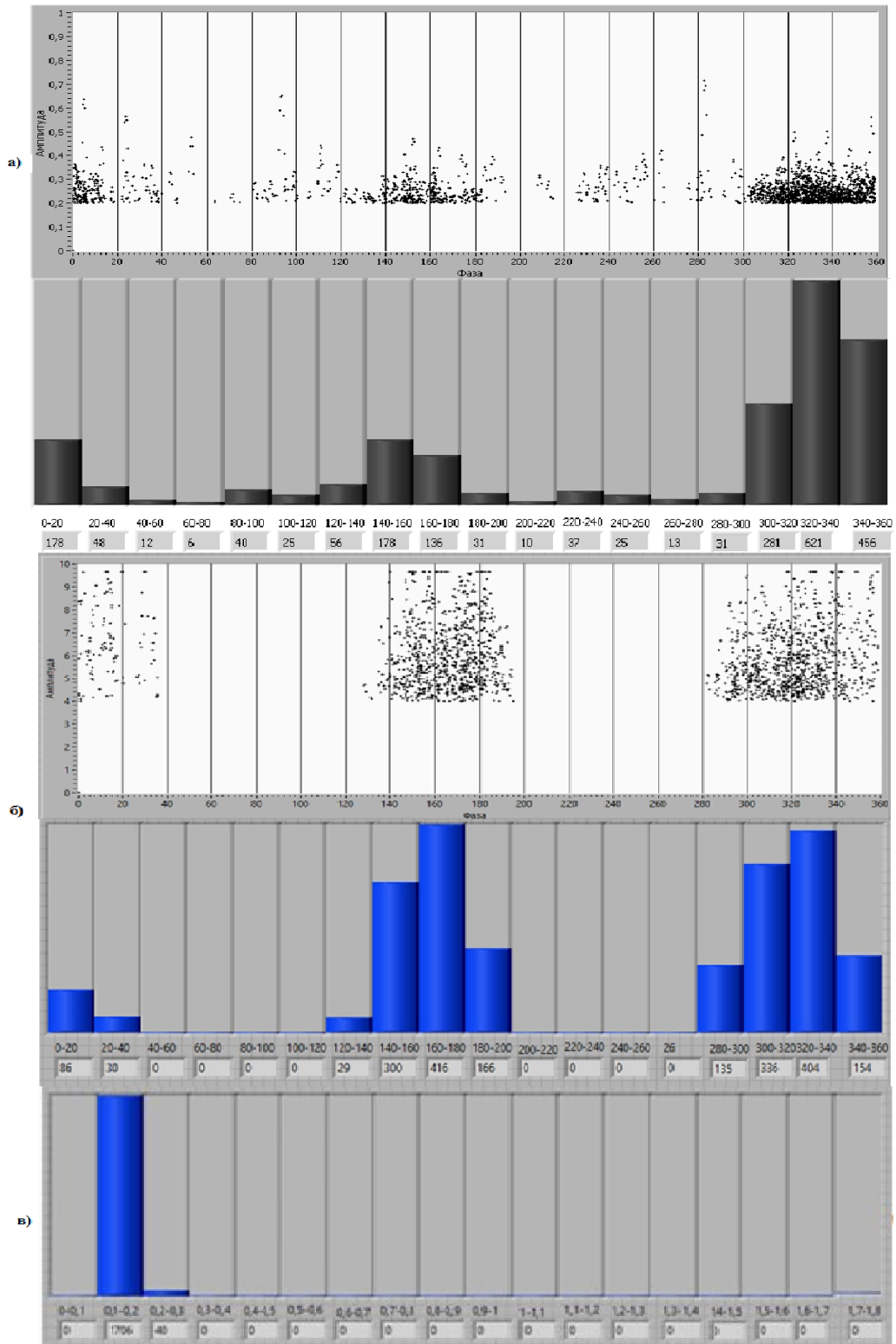


Рис. 4.1. Пример необычных амплитудно-фазовых и количественно-фазовых характеристик, детектированных электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками для ПВИ №9 (дефект «стержень - оконцеватель»), в – количество ЧР в зависимости от интенсивности

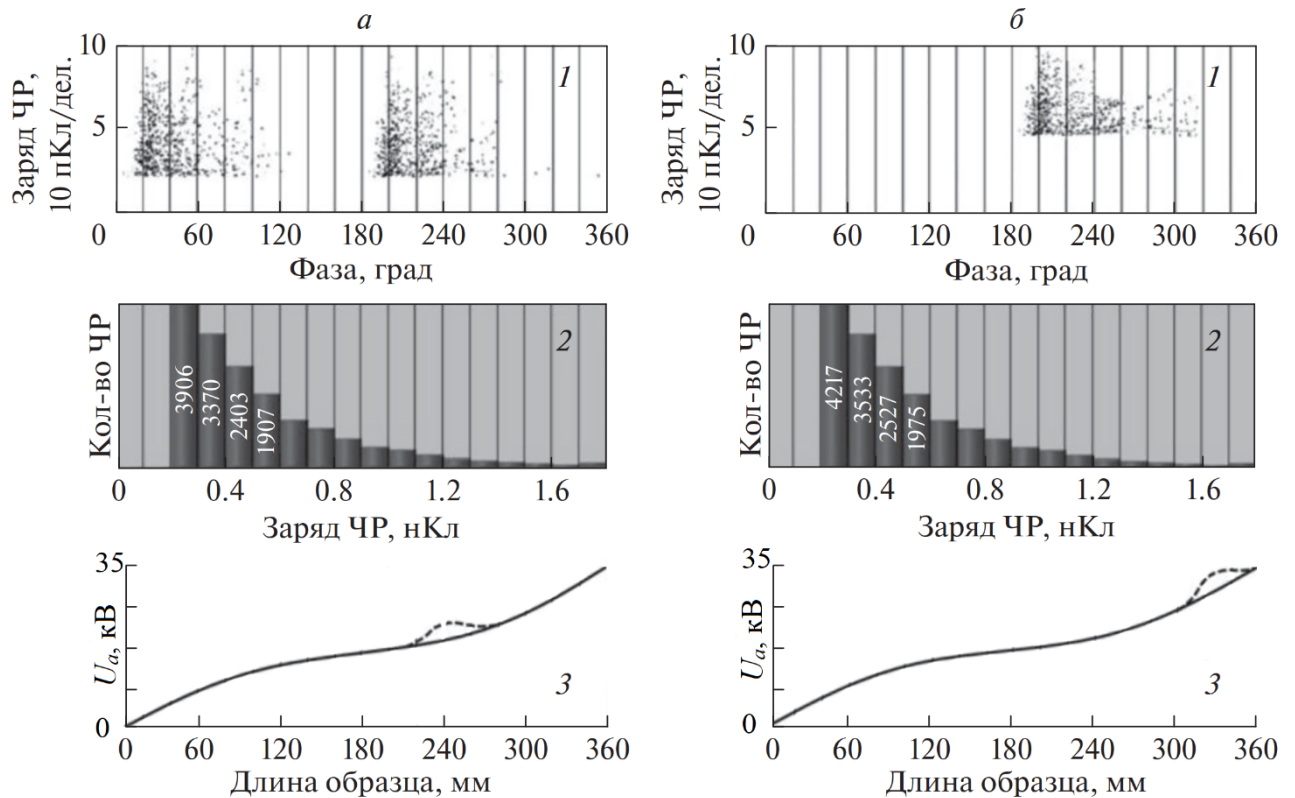


Рис. 4.2. Параметры ЧР, измеренные электромагнитным датчиком (1), для образцов ВИ с большими дефектами: *a* – дефект на стержне, *б* – дефект «стержень-оконцеватель», 2 – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности, 3 – пространственное распределение индуцированного потенциала (для дефектного изолятора показано пунктиром)

Было обнаружено, что для малых дефектов ($d \leq 300$ мкм) в ВИ интенсивность ЧР не превышает 100 пКл (табл. 4.1) и мало зависит от величины d . Однако с ростом размеров дефектов выше 0,4-0,6 мм начинается резкий подъем интенсивности возникающих МЧР [А19]. Количество МЧР ($q \geq 2$ нКл) значительно возрастало с ростом размера дефекта (табл. 4.2, рис. 4.3), а затем при $d \leq 2$ мм рост количества МЧР практически прекращается (рис. 4.4).

Такое резкое изменение интенсивности и количества МЧР наиболее характерно для дефектов типа «стержень-оконцеватель». Оно вполне соответствует приведенной в работах [95], [137] зависимости интенсивности МЧР от радиуса сферической полости в диэлектрике [137]. Однако там представлены только некоторые физические процессы, относящиеся к зависимости $q(d)$ для дефектов сферической формы [А19].

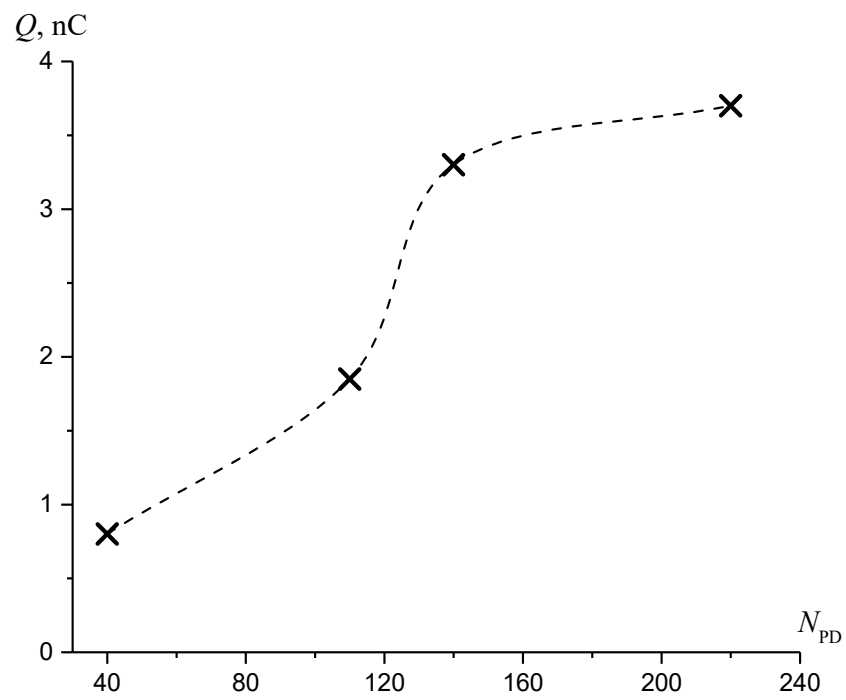


Рис.4.3. Зависимость суммарного кажущегося заряда Q от количества МЧР

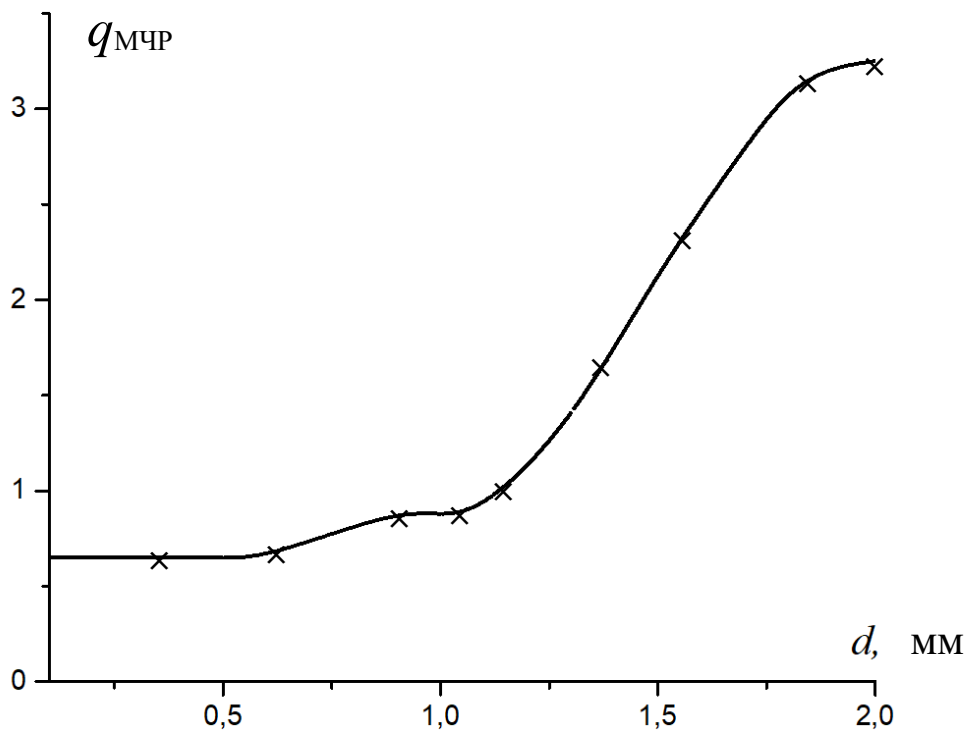


Рис.4.4. Зависимость усредненного кажущегося заряда q_{MCR} от размера дефекта «стержень-оконцеватель»

Таблица 4.2 – Параметры МЧР в образцах с ростом дефектов за период измерения в 18 сек

	№3	№4	№5	№6
ΔN_{\max}	36	82	205	109
N_{\max}	4380	4300	4300	3000
$\Delta N / N_{\max}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
$N_{\text{общ}}$	1400	620	1400	200
N_{-}	1300	940	2900	2300
N_{+} / N_{-}	1,05	0,65	0,48	0,09

4.3. Особенности излучения частичных разрядов в высоковольтных изоляторах

Поскольку в известной нам литературе не удалось найти рассмотрение особенностей излучения ЧР именно в реальных ВИ, и более того нами были обнаружены ряд особенностей и отличий в измеренных одновременно двумя методами параметров ЧР и особенно МЧР, то была сделана попытка более подробно обсудить физические процессы возникновения различных видов ЧР в ВИ.

Частичный разряд по определению [93] относится к предпробойной стадии искрового разряда и представляет собой возникновение и быстрое развитие тонкого плазменного канала в газовом промежутке между двумя электродами с высокой интенсивностью заряженных частиц – электронов, положительных и отрицательных ионов. По существу, ЧР имеет стримерный характер, распространяется вдоль газовой полости со скоростью $10^6 - 10^7$ м/с, превышающей скорость распространения электронов в свободном пространстве под действием электрических полей. Различие в скоростях распространения стримеров, образованных электронами и ионами, приводит к расплыванию потока и

расширению его площади. Последнее обстоятельство может приводить к увеличению его заряда, создающего на диэлектрических поверхностях дефекта индуцированное электрическое поле. Распространение зарядового стримера сопровождается излучением импульсов электромагнитных волн в диапазоне частот $10^7 - 10^{11}$ Гц. По современным представлениям [93], [174], волну пространственного заряда, возникающую в свободном пространстве полости с увеличением напряженности поля, можно рассматривать как трансформацию первичного стримера в области дефекта в частичный разряд. Последний по определению является результатом возникновения локального повышения напряженности приложенного поля в области дефекта, превышающей электрическую прочность ВИ в данном месте [A18].

Стримерная теория электрического пробоя газов [174], [155] так же позволяет объяснить возникновение импульсов акустических колебаний, сопровождающих ЧР [A18]. Этот процесс происходит за счет резкого возрастания площади проводящего канала стримера в разрядном промежутке, при котором возрастает давление на границах стримера с возникновением ударных волн. В свою очередь, совокупность ударных волн порождает импульсы акустических волн, в период прохождения импульсов ЧР через поверхность дефекта детектируемых пьезоэлектрическими датчиками. Как показали эксперименты [53], импульсы ЧР, детектируемые акустическими датчиками с резонансной частотой 150 кГц, имеют быстрорастущий передний фронт с длительностью менее 10 нс, а затем удлиняются датчиками и переходят в плавно спадающий фронт ($\Delta t \leq 100$ мкс). Длительность переднего фронта определяется временем скачка давления в головной части стримера и зависит от условий накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта. Как следует из характеристик МЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками (рис. 4.5), интенсивности и количество в последнем случае значительно превосходят, а именно для сверхбольших дефектов акустические измерения позволяют получить более точные данные о параметрах дефектов, чем электромагнитные измерения [A18].

Причиной этого факта является то обстоятельство, что акустические импульсы возникают в основном в период прохождения импульса ЧР вдоль диэлектрической поверхности дефекта. В образцах с относительно малыми дефектами влияние индуцированных предыдущими ЧР полей E_i на диэлектрических поверхностях на общее поле в дефекте незначительно и фазовое распределение интенсивности и количества ЧР определяется напряженностью приложенного поля в области дефекта fE_a . Поэтому характеристики ЧР в таких образцах (рис. 4.1), измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, близки по своим параметрам [A19].

При увеличении размеров дефекта (третья группа образцов) возрастает влияние индуцированных полей E_i , наведенных предыдущими ЧР на диэлектрических поверхностях дефекта, а суммарное поле E_d внутри полости дефекта представляется в виде геометрической суммы напряженностей полей

$$E_d = fE_a + E_i, \quad (4.2)$$

где E_a – напряженность поля, приложенного к электродам ВИ, f – фактор изменения напряженности приложенного поля, зависящий от геометрии полости дефекта и соотношения диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрического стержня.

Этот эффект наиболее сильно сказывается на дефекте между стержнем и оконцевателем изолятора. При ЧР вначале возникает разряд с распространением стримера в полости параллельно приложенному полю, а затем он сменяется разрядом вдоль диэлектрической поверхности, перпендикулярной E_a .

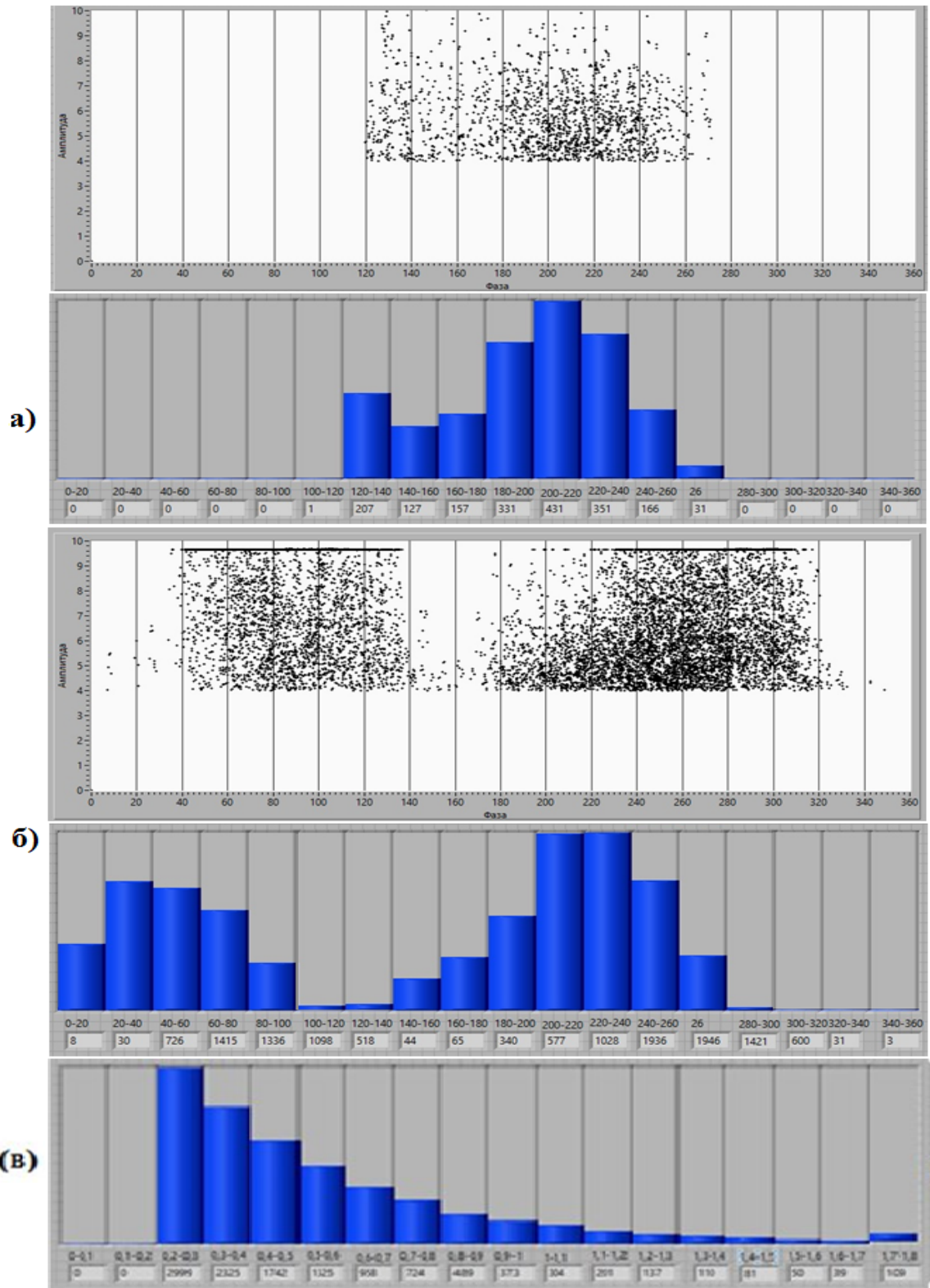


Рис.4.5. Амплитудно-фазовая и количество-фазовая характеристики ЧР, детектируемых электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; в – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности ЧР в образце ФВИ

В последнем случае нормальная компонента E_a прижимает дрейфующие заряды к поверхности диэлектрика, что приводит к повышению температуры и проводимости канала поверхностного разряда. При этом будет возрастать или уменьшаться на определенных фазах приложенного напряжения интенсивность МЧР, а также ширина и количество импульсов МЧР [A19].

Таким образом, можно было предположить, что использование акустического детектирования ЧР при контроле дефектов позволяет более точно определять общее количество ЧР, МЧР, и их фазовое распределение, а электромагнитное детектирование успешно оценивать интенсивность и количество МЧР и обычных ЧР, а, следовательно, вид и размеры малых дефектов. Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости использования обоих способов детектирования ЧР для более полного обследования работоспособности ВИ в процессе эксплуатации [A19].

4.4. Обобщенная физическая модель образования мощных частичных разрядов

К настоящему времени были разработаны только несколько физических моделей, описывающих распространение стримеров в газовых прослойках дефектов в виде сфер или трехмерных эллипсоидов [137]. В их основе лежит закон Пашена и предложенное положение о зависимости интенсивности q МЧР от общей поверхности полости дефекта [93], [155]

$$q = \pi \varepsilon_0 \varepsilon b^2 [1 + \varepsilon_r (K (a/b) - 1)] E_{чр}, \quad (4.3)$$

где ε_0 и ε_r - соответственно диэлектрические проницаемости газа и диэлектрика; a и b – продольный и поперечный размеры полости дефекта; значения K -фактора инверсной поляризации были эмпирически определены в работе [93]: $K \approx 1$ ($a/b \ll 1$), $K = 3$ ($a/b \sim 1$), $K \approx 4 a/b$ ($1 < a/b < 0$) [A17].

Это выражение было использовано в работах [91], [94] при изучении особенностей ЧР в модельных полимерных образцах. Однако в этих работах мало было уделено внимания таким одновременным процессам в газовом промежутке, как возрастание скорости распространения стримера с увеличением длины разрядного промежутка с соответствующим повышением напряженности поля в полости E_i и одновременным уменьшением напряженности приложенного к полости поля fE_a . Хотя ранее было предположено [93], что этот эффект эмпирически можно представить в виде

$$U_d = B d^n, \quad (4.4)$$

где коэффициент B определяет зависимость напряжения пробоя от величины разрядного промежутка d и давления газа в полости дефекта (Закон Пашена) [A17].

В таком приближении при малых $d \leq 1$ мм коэффициент n приближается к 1, а для больших $d > 1$ мм величина n уменьшается до 0,5-0,7. Качественно предложенная зависимость была обнаружена нами для образцов первой, частично второй групп и в модельных образцах [137]. Причем в обоих экспериментах значительное изменение в зависимости $q(d)$ наблюдалось вблизи $d \approx 1$ мм [A20].

Значительно меньшее внимание ранее было обращено на особенности распространения ЧР на втором этапе вдоль диэлектрической поверхности дефекта, причем в отмеченных выше работах не рассматривалось распределение плотности зарядов на диэлектрической поверхности и их изменение в течение периода приложенного напряжения. Некоторое качественное обсуждение процессов распространения ЧР через полость в диэлектрике, ограниченной одной с одной стороной электродом, было выполнено в работах [57], [94], [A14]. В этих работах было показано, что увеличение площади канала распространения импульса на поверхности диэлектрика приводит к задержке его затухания и изменению общей мощности. По-видимому, это обстоятельство и является главной причиной расхождения между результатами по количеству, интенсивности и фазовому

распределению МЧР, полученных с помощью электромагнитных и акустических датчиков, а также переходу ЧР от стримерного к разряду Таунсенда [A20].

Еще одно расхождение в характере генерации МЧР для дефектов плоской формы, изученных нами в реальных ВИ, и дефектов сферической формы, изученных в ряде зарубежных исследований [98], [137], состоит в том, что в сферических дефектах релаксация ЧР осуществляется путем взаимодействия электронов и ионов от двух противоположных отрезков поверхностей сферы дефекта. Наибольшая интенсивность МЧР достигается в том случае, когда возрастает радиус сферы, и напряженность поля возрастает по сравнению с напряженностью приложенного напряжения в 8 раз, максимального кажущегося заряда МЧР в 13 раз с одновременным уменьшением общего количества ЧР так же за период в 2,6 раза при увеличении радиуса сферы от 0,55 до 1,175 мм [A20], [95].

В реальных ВИ релаксация зарядов МЧР осуществляется путем их рассеяния на диэлектрических поверхностях дефектов. Поэтому увеличение или уменьшение заряда МЧР во многом будет зависеть от процесса распределения индуцированного заряда на поверхности, который сам зависит от ряда параметров – проводимостью поверхности, размерами. Эти параметры имеют противоречивое влияние на индуцированное на поверхности поле E_i . Увеличение проводимости приводит к возрастанию скорости перемещения зарядов вдоль поверхности и разрастанию площади зарядов на поверхности. Этот эффект, как показано в работе [164], создает повышение зарядов на поверхности и увеличение интенсивности МЧР. Он наиболее характерен для распространения стримеров, образованных положительными ионами, как было показано на модельных образцах [164], [166] и нами на реальных ВИ. Уширение формы импульсов положительных ЧР в спадающей части связано с расширением площади стримера на поверхности. При этом не наблюдалось подобного уширения отрицательных импульсов ЧР [A20].

Следует подчеркнуть особенности различия фазовых интервалов генерации МЧР для дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель». В первом случае накопление индуцированных ЧР и МЧР возникает поочередно на обеих граничных поверхностях дефекта. Во втором случае – только на одной

диэлектрической границе полости, поскольку второй границей является металлический электрод. Эта особенность отражается на фазовом распределении МЧР [A20].

В определенном приближении и упрощении согласно приведенному выше выражению (2) для зависимости интенсивности ЧР от формы полости в виде эллипсоида первый тип дефекта можно отнести к виду $a > b$, а дефект «стержень-оконцеватель» к виду $a < b$ [A20]. Это наше предположение уже нашло экспериментальное подтверждение [A5].

Выполненный анализ группы параметров характеристик МЧР показал, что возможный набор диагностических параметров технического состояния ВИ может быть основан на ряде фазозависимых характеристик мощных частичных разрядов, поскольку последние являются одними из главных источников ускоренного развития дефектов. Конкретно при первичном контроле дефектности ВИ такими диагностическими параметрами могут быть значения коэффициентов отношения количества МЧР к общему количеству ЧР за определенный интервал измерений и коэффициент отношения количества ЧР в положительном и отрицательном полупериодах приложенного высокого напряжения [A20].

4.5. Физическая модель процесса излучения частичных разрядов в дефекте «стержень-оконцеватель» высоковольтного изолятора

Обнаружение значительных расхождений (200-300%) в характеристиках фазоворазрешенных ЧР при рабочих напряжениях $U_a \geq 100$ кВ стало причиной осмысления полученных результатов и обоснования разработанной комплексной методики обследования ВИ на подстанциях с $U_a = 110$ кВ. Поскольку одним из наиболее опасных дефектов в процессе эксплуатации является нарушение контакта «стержень-оконцеватель» вблизи металлических электродов, то именно этот дефект и его детектирование исследованы нами подробно.

Уже более 20 лет на основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований высоковольтных диэлектрических материалов считается установленным, что ЧР имеет стримерный характер в полостном дефекте. Стримерный тип ЧР возникает при минимальном значении приложенного к ВИ электрического поля E_a , соответственно при выполнении критерия напряженности

$$E_a = (E/p)_{кр} p \left[1 + \frac{B}{(p \cdot d_{пол})^n} \right] \quad (4.5)$$

где $(E/p)_{кр}$ – давление при критическом поле, когда $\alpha=\eta$; α – коэффициент ионизации; η – коэффициент присоединения электронов к ионам, p – давление газа в полости дефекта, $d_{пол}$ – размер полости вдоль поля E_a , B и n – константы.

Если полость дефекта заполняется воздухом, то $(E/p) = 25,2 \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $B = 8,6 \text{ м}^{0,5} \cdot \text{Па}^{0,5}$, $n = 0,5$, что соответствует закону Пашена

$$U_a = 24,4 (p_0 \cdot d_{пол}) + 6,73 \sqrt{p_0 \cdot d_{пол}}, \quad p_0 = \frac{p}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{293}{T} \quad (4.6)$$

U_a – определяется напряжением начала ЧР в полости.

Естественно ЧР возникают с определённым временем задержки, зависящим от скорости накопления свободных электронов в процессе их ионизации ($\tau_{лаг}$), причем вероятность генерации ЧР также определяется $\tau_{лаг}$.

Из общей теории распространения стримеров поле начала стримерных ЧР $E_{СТР}$ определяется как

$$E_{СТР} = \chi E_{кр} \quad (4.7)$$

где χ характеризует параметры газа, диэлектрической поверхности и полярности самого стримера и температуры.

Генерируемые и распространяющиеся ЧР в области дефекта создают на диэлектрических поверхностях полости дефекта дополнительные заряды q_s , образующие индуцированное поле E_i . Общее поле на дефекте имеет вид

$$E = E_a + E_i = \frac{\Delta U_a + \Delta U_i}{d_{\text{пол}}} \quad (4.8)$$

Длина стримера в основном определяется размерами дефекта $d_{\text{пол}}$, а также зависит от критического поля $E_{\text{кр}}$ и параметров дефекта:

$$d_{\text{СТР}} = (\lambda / \gamma) \cdot d_{\text{пол}} \cdot E \quad (4.9)$$

Значение напряжения начала ЧР $U_0^{\text{нач}}$ можно представить в виде

$$U_0^{\text{нач}} = (E/p) [pd_{\text{геом.деф.}}] / \nabla U_0, \quad (4.10)$$

где $\nabla U_0 = E_0 / U_0$ – уменьшенное основное поле на дефекте.

Наибольшее внимание в наши дни привлечено к процессам перехода стримера из газового промежутка дефекта на диэлектрические поверхности, перпендикулярные каналы стримера и приложенного поля E_0 . При наличии двух диэлектрических поверхностей дефекта на них возникают индуцированные заряды от ЧР

$$\pm q = g \pi \varepsilon_0 \Delta U_{\text{чр}}. \quad (4.11)$$

Коэффициент g определяет степень однородности ЧР, проходящего через полость. В целом $\pm q$ определяет поверхностное распределение зарядов на поверхности, сохранившихся от предыдущих ЧР.

В зависимости от геометрической формы полости в виде эллипсоида с длинной осью a и короткой b электрические заряды на диэлектрических поверхностях представляется в соответствии с выражением 4.3, а упрощенно в виде выражения

$$q(a/b, \varepsilon_r) = \frac{1}{2} \cdot \frac{a/b}{(a/b)^2} \cdot [1 + \varepsilon_r(K(a/b) - 1)]. \quad (4.12)$$

Для дефекта типа «стержень-оконцеватель»

$$q = \pm \frac{1}{3} \cdot \pi \varepsilon_r a b^2 \varepsilon_0 K \Delta E \Delta \lambda_0. \quad (4.13)$$

Временной процесс развития ЧР начинается с генерации свободных электронов на металлическом электроде (катод). Под действием приложенного поля они движутся к аноду, увеличивая свою энергию и генерируя новые электроны и ионы от нейтральных молекул газа в полости. После определенного периода движения облако электронов и ионов достигает диэлектрической поверхности анода. Далее вследствие малости заряда электроны поглощаются вблизи соударения стримерного потока с диэлектрической поверхностью, а положительные ионы с низкой дрейфовой скоростью перемещаются вдоль поверхности, образуя в конечном виде зарядовое поле на диэлектрической поверхности. Как показали эксперименты последних лет с использованием эффекта Поккельса, распределение индуцированных зарядов на поверхности зависит от фазы приложенного высокого напряжения в модельном дефекте «стержень-оконцеватель» в полимере (полиэтилен) с размером полости 5 мм, толщиной 0,15 мм. При углах фазного напряжения 0° - 180° наблюдались только отдельные ЧР с размерами, соответствующие диаметру стримера. Однако в

отрицательном полупериоде возникает объединение отдельных зарядов в общий заряд, площадь которых ограничена размерами полости.

Распределение зарядов по диэлектрической поверхности, развитие плотности ЧР на поверхности приводят к двум эффектам – плотность электронов в радиальном и аксиальном направлениях уменьшается с увеличением количества поверхностных зарядов на поверхности. Возрастающая часть импульса ЧР определяется развитием стримера (потока электронов), в то время как дрейф ионов ответственен за падающую часть импульса ЧР. В главном представлении, остаточные заряды воздействуют на разрядные процессы посредством изменения электрического поля и перемещения дополнительных электронов, следовательно, внося вклад в токовые импульсы.

Таким образом, в процессе перераспределения индуцированных зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта участвуют как заряды от предыдущих ЧР, так и индуцированные заряды данного ЧР. Причет также возникает перераспределение зарядов ионов между глубокими и мелкими ловушками в приповерхностном слое диэлектрика. Однако до сих пор не нашло объяснения обнаруженный нами эффект возникновения различий в характеристиках ЧР, измеряемых одновременно электромагнитным и акустическим датчиками при интенсивностях ЧР выше 3 нКл. Причиной этому обстоятельству является то, что измерения характеристик ЧР одновременно двумя методами выполнялись при более низких интенсивностях ЧР [184], [185], когда не возникает накопление зарядов на диэлектрических поверхностях. По нашему предположению, накопление и распределение зарядов от предыдущих ЧР является главной причиной расхождения данных при измерении характеристик ЧР электромагнитным и акустическим датчиками для ЧР с $q \geq 3$ нКл. После достижения стримеров диэлектрической поверхности площадь ЧР резко увеличивается, ограничиваясь размерами дефекта, этот процесс сопровождается быстрым изменением интенсивности ЧР. Причем, как уже отмечалось выше, начальное увеличение интенсивности ЧР синхронно совпадает с возрастанием площади ЧР на поверхности диэлектрика, а затем начинается процесс уменьшения

интенсивности ЧР на поверхности синхронно с ЧР. Интенсивность ЧР на плоскости может в несколько раз (до 10 раз и более) превышать значение $q_{\text{ЧР}}$ для частичного разряда в стримерном канале ЧР.

На основании проведенных экспериментов на дефектах в ФВИ предложена более полная физическая модель, подтверждающая различие в процессе прохождения импульса ЧР через газовую полость, а затем через диэлектрическую поверхность дефекта (рис.4.6). На первом этапе ЧР в виде стримера распространяется вдоль приложенного электрического поля и состоит из свободных электронов, а также из положительных и отрицательных ионов. На втором этапе ЧР могут распространяться на всю плоскость диэлектрического стержня изолятора, в то время как на первом этапе стример занимает только часть сечения газовой полости. Однако увеличение размера полости дефекта, приводящее к повышению скорости распространения стримера и количества индуцированных электронов, также повышает интенсивность мощных ЧР [А23].

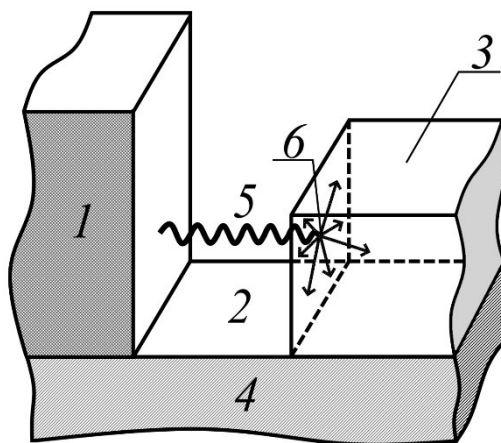


Рис. 4.6. Конфигурация дефекта между фланцем и оболочкой ВИ:

1 – металлический фланец, 2 – полость дефекта, 3 – защитная диэлектрическая оболочка, 4 – стеклопластиковый стержень, 5 – стример, 6 – распространение ЧР по диэлектрической поверхности дефекта

Поскольку скорость движения электронов на порядок превышает скорость ионов, то стримеры состоят в основном из электронов. На втором этапе поток

заряженных частиц ЧР переходит на диэлектрическую поверхность дефекта и может значительно расширяться в пределах всей поверхности дефекта. На этом этапе возникают остаточные заряды, образованные положительными и отрицательными ионами. За счет повышения интенсивности ЧР на поверхности возникает дополнительное оптическое излучение в ультрафиолетовой области до момента рекомбинации положительных и отрицательных ионов на диэлектрической поверхности [A23].

Значительное возрастание интенсивности ЧР в отрицательной части каждого периода приложенного напряжения вызвано, на наш взгляд, несколькими факторами (рис. 4.7): возрастанием площади самого ЧР на диэлектрической поверхности, накоплением зарядов от предыдущих ЧР, а также возрастанием поверхностной проводимости. Именно их совокупность создает стохастичность в параметрах последовательности ЧР. Особенно важным в таком процессе является возникновение мощных ЧР ($q \geq 5-10$ нКл) при сложении в фазовом интервале ($180-240^\circ$) напряженностей приложенного и индуцированного поля предыдущих ЧР [A23].

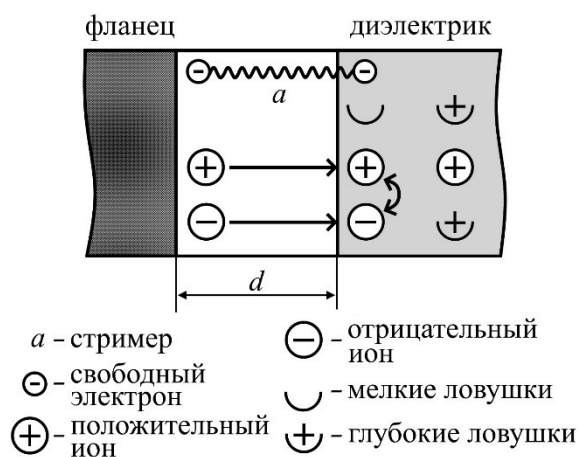


Рис. 4.7. Диаграмма перемещения индуцированных зарядов в полости дефекта

Увеличение интенсивности и количества ЧР, детектируемых акустическим датчиком, с одновременным уменьшением тех же параметров ЧР, детектируемых электромагнитным датчиком, вызвано на наш взгляд изменением процесса

генерации акустических волн в рассмотренных выше условиях. Во втором случае при распространении подобного электромагнитного импульса вдоль поверхности диэлектрика вследствие акустоэлектронного взаимодействия возникают акустические волны с интенсивностью, пропорциональной дрейфовой скорости носителей заряда v_d . При таком процессе коэффициент электронного усиления ультразвука γ_e пропорционален соотношению скоростей

$$\gamma_e = \alpha_e (v_d / v_s - 1), \quad (4.14)$$

где α_e – коэффициент электронного акустического поглощения в отсутствие дрейфа носителей заряда, v_s – скорость звука.

Поскольку в данном случае скорость v_d значительно превышает v_s , то как указано в [186] могут создаваться значительные интенсивности акустических волн.

Постепенное возрастание таких мощных ЧР, по-видимому, является главной причиной ускоренного старения изоляции высоковольтных энергетических систем. Поскольку такие мощные ЧР возникают не более одного за период приложенного высокого напряжения, то их обнаружение было практически невозможным при использовании усредненных методов регистрации вследствие стохастичности их характеристик [A23].

Это обстоятельство и создает различие интенсивности ЧР, детектируемых электромагнитным (канальный ЧР) и акустическим (плоскостной ЧР) датчиками. Такой вывод подтверждается теоретическими расчетами, выполненными на модельных образцах дефектов [146].

Исследование возможностей перехода от стримерного к таунсендовскому механизму и обратно при ЧР выполнялось в двух временных интервалах 80-90 годов XX века и 10-20 годов XXI века. В результате на основе ряда модельных экспериментов было установлено, что на газовые полости между двумя металлическими электродами характерен с возрастанием интенсивности ЧР

переход от таунсендовского к стримерному механизму, а для дефекта также в виде полости, но с диэлектрическими слоями между металлическими электродами наоборот может возникать переход от стримерного к таунсендовскому механизму [176]. Поскольку при использовании контакта металл-диэлектрик ионизационный потенциал в полости значительно выше для диэлектрической поверхности, чем для металлических электродов, и, по-видимому, можно с определённой уверенностью полагать, что в наших экспериментах с большими дефектами и $q \geq 3$ нКл так же наблюдался переход от стримерного механизма к таунсендовскому. Как впервые было обнаружено в работе [65], именно с этим переходом связано значительное уменьшение со временем длительного приложения электрического поля интенсивности ЧР для полостных дефектов в полимере, их уширение, что не характерно для стримерного механизма ЧР.

4.6. Схема электрофизических процессов в ЧР

На основе полученных данных по фазовым характеристикам ЧР и напряженности ЭП были построены более полные схемы электрофизических процессов (рис. 4.8), происходящих в полостях обоих дефектов в течение одного периода приложения высокого напряжения, в которой представлены изменения поля E_a в полости, поля E_i на диэлектрических поверхностях полости, индуцированного частичными разрядами, и фазовые интервалы генерации ЧР [A20].

До начала излучения импульсов ЧР поле E_a в полости однородно (рис. 4.8). С ростом поля E_a , начиная с нулевой фазы, до достижения условия $E_a \geq E_H$ (0° - 50°), где E_H – поле электрического пробоя, начинается излучение малых ЧР. Оно сопровождается накоплением зарядов на диэлектрических поверхностях полости, которые образуют поле E_i , противоположное по знаку приложенному полю E_a . Поле E_i возрастает с каждым последующим ЧР, пока не превысит поле E_a , что

приводит к прекращению излучения ЧР и дальнейшего роста поля E_i . Причем вследствие малой электропроводности диэлектрика, поле E_i сохраняется до следующего ЧР. После смены фазы приложенного напряжения при 180° поля E_a и E_i становятся одинаковыми по знаку, и их векторное сложение $(E_a + E_i) > E_n$ приводит к излучению МЧР (180° - 240°) [A9].

В отличие от малых ЧР, мощные разряды происходят от той поверхности полости, на которой возникают сверхбольшие напряженности ЭП. Такой мощный разряд возможен при большом размере поверхности полости, что и подтверждается в экспериментах. На схеме (рис. 4.8) возникновение отрицательного МЧР соответствует резкому изменению поля E_t при $\varphi \approx 240^\circ$.

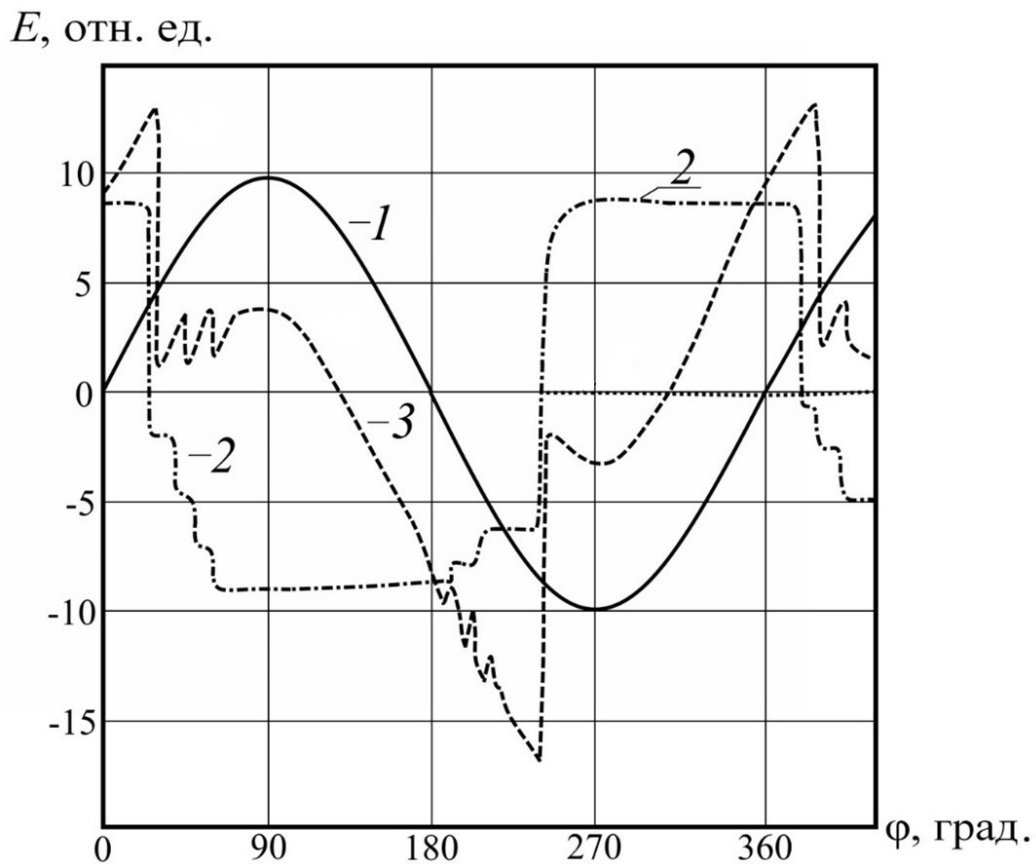


Рис. 4.8. Диаграмма распределения ЭП в полости дефекта в зависимости от фазы приложенного ЭП (E_a): 1 – приложение поля E_a в полости дефекта, 2 – поле индуцированных зарядов E_i на диэлектрических поверхностях полости, 3 – суммарное поле в полости $E_t = E_i \pm E_a$

Для дефекта с одной диэлектрической поверхностью (контакт стержень-оконцеватель) процесс излучения МЧР на этом фазовом цикле ($\varphi < 270^\circ$) заканчивается, а для дефекта с двумя диэлектрическими поверхностями при дальнейшем увеличении фазовых углов происходит накопление зарядов и образование поля E_i противоположного знака (фазовый интервал 240° - 360°). Этот процесс заканчивается возникновением положительного МЧР уже в фазовом интервале следующего цикла приложенного напряжения (0° - 50°) [A9].

В соответствии с предложенной нами схемой в каждом цикле поля E_a с началом малых ЧР возрастает скорость генерации индуцированных электронов в процессе разряда, что приводит к более ранней фазе начала излучения ЧР и соответствующего поля зарядов на поверхности без изменения их полярности. МЧР, наоборот, возникают при смене поляризации максимального поля E_t внутри полости. Причем с ростом размера полости увеличение разрядного промежутка приводит к возрастанию числа и скорости индуцированных электронов, а, следовательно, – к большей интенсивности МЧР и их количества в каждом цикле высокого напряжения [A9].

Интерес к изучению характеристик ЧР в различных материалах, используемых в основном в качестве элементов изоляции, не прекращался начиная со второй половины XX века, причем периодически возрастал с учетом применения новых материалов, как это было с возрастающим использованием полимеров, так и с повышением напряженности электрических полей. Уже в конце XX века появились первые экспериментальные работы по изучению влияния ЧР на развитие дефектов в основном сферической или цилиндрической формы [137], [187]. В то же время появились и первые теоретические расчеты по взаимодействию электрических разрядов, генерируемых ЧР на диэлектрических поверхностях дефектов. На рис. 4.9 и 4.10 представлены формы импульсов МЧР для обоих видов изученных дефектов [A20].

Для дефекта на поверхности стержня форма практически одинакова для положительных и отрицательных импульсов ЧР (рис. 4.9) [А20]. Однако при наблюдении ЧР на дефекте вида «стержень-оконцеватель» (рис. 4.10) форма импульсов различна для положительных и отрицательных импульсов.

При развитии положительного или отрицательного ЧР внутри воздушного зазора возникает дрейф индуцированных зарядов к поверхности диэлектрика при совместном влиянии приложенного поля и пространственного поля, индуцированного предыдущим ЧР. Вследствие высокой дрейфовой скорости электронов возникает быстрое, стримерного типа, развитие отрицательных ЧР. Электрическое поле внутри воздушного промежутка быстро затухает, когда электроны достигают диэлектрической поверхности. В результате передняя часть отрицательного импульса ЧР ограничена коротким временем порядка нескольких наносекунд, более длинная растущая часть положительного импульса ЧР обусловлена более медленной дрейфовой скоростью положительных индуцированных ионов. Затухающая задняя, более медленная, часть как положительного, так и отрицательного ЧР обусловлена перемещением индуцированных зарядов вдоль диэлектрической поверхности [А9].

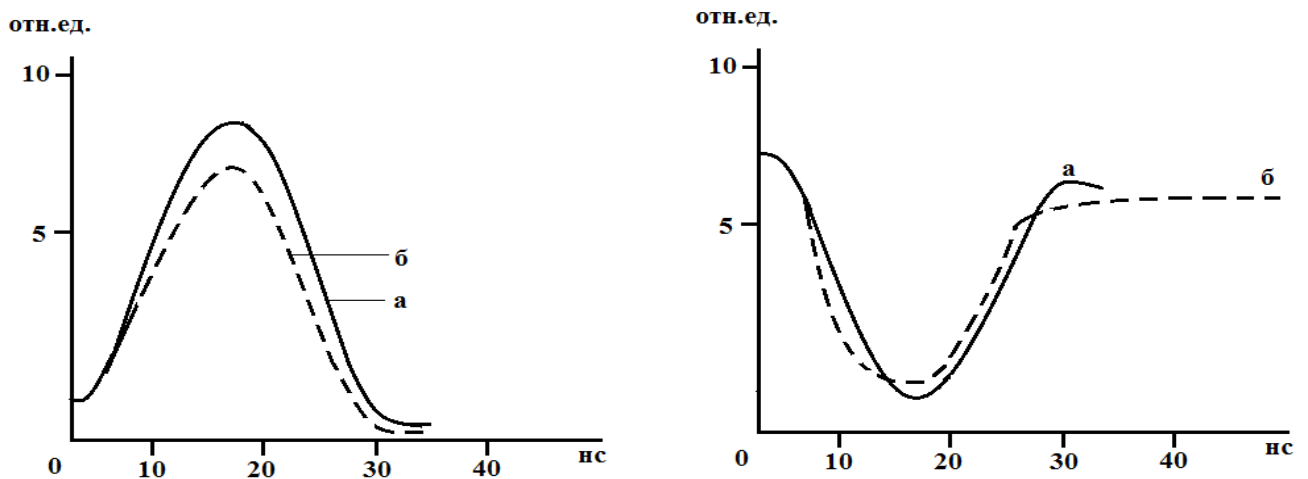


Рис. 4.9. Форма импульсов ЧР на дефекте стержня:

a – теоретическая, *б* – экспериментальная

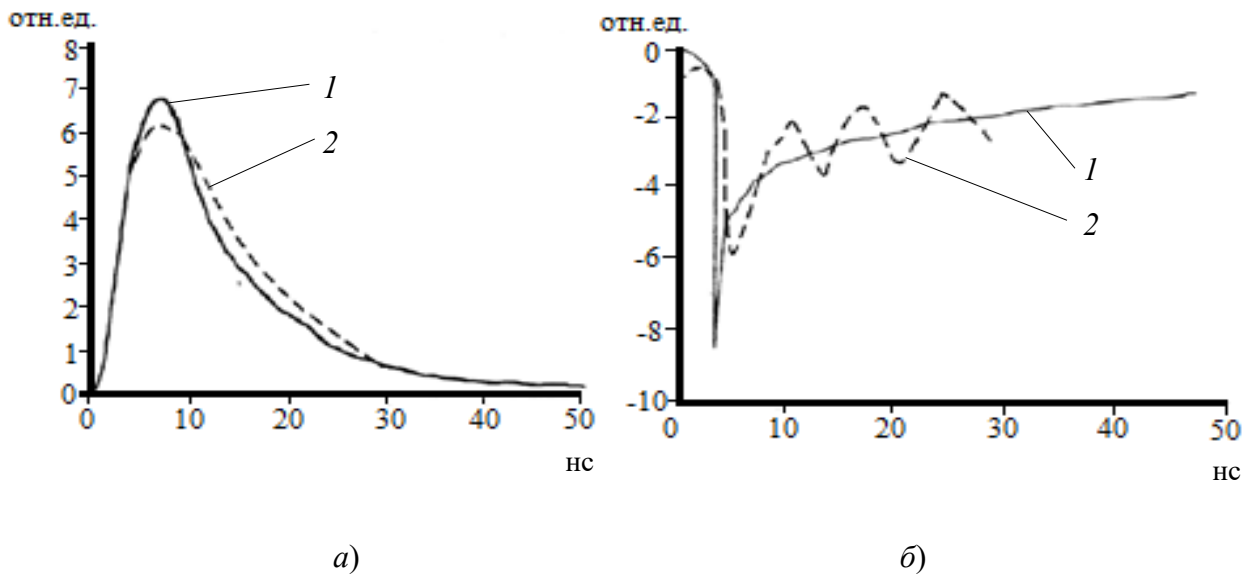


Рис. 4.10. Форма положительных (а) и отрицательных (б) импульсов ЧР на дефекте «стержень – оконцеватель»: 1 – теоретическая, 2 – экспериментальная

Процесс распространения МЧР через полость дефекта сопровождался расширением площади канала стримера в несколько раз для положительных импульсов. Было установлено, что при каждом расширении так же значительно возрастала амплитуда заряда МЧР, что вполне соответствовало форме импульсов на рис. 4.10. Этот экспериментальный результат вполне соответствует ранее разработанной модели распространения импульсов через дефекты в диэлектриках эллипсоидальной формы [93]. В этой модели предполагалась квадратичная пропорциональность заряда q стримера диаметру b электромагнитного импульса

$$q(a/b, \varepsilon_2) \approx \pi \varepsilon_2 b^2 E_c \quad (4.15)$$

Разработанная нами схема генерации МЧР [A20] нашла подтверждение в феноменологической модели процесса генерации и последующего распространения первичного разряда в полости дефекта. Как оказалось, в реальных условиях излучения ЧР в высоковольтных изоляторах, как полимерных, так и фарфоровых, имеет более сложный характер [A20] и до сих пор серьезно практически не изучался [137]. По существу, нами была сделана первая попытка

объяснения генерации мощных ЧР в реальных высоковольтных энергетических системах.

4.7. Взаимодействие частичных разрядов с электрическими зарядами в плоскостных дефектах диэлектриков в сильных электрических полях

В конце XX – начале XXI века в результате ряда теоретических и экспериментальных работ по процессам и механизмам старения различных диэлектрических материалов, находящихся долгое время в сильных электрических полях, например, ВИ, было установлено решающее влияние частичных разрядов на деградацию и дефектообразование [188], [176], [189], [190], [76], [164]. Было показано, что главным фактором влияния ЧР является образование дополнительных зарядов и соответствующих им электрических полей на диэлектрических поверхностях дефектов, индуцированных предыдущими ЧР. Накопление таких индуцированных зарядов в значительном временном интервале может создавать ускоренное старение диэлектрического материала ВИ. В связи с этим обстоятельством возник большой интерес к механизмам генерации и распространения ЧР в полостях дефектов, заполненных воздухом или каким-либо другим газом. Еще ранее были выполнены первые попытки определения механизмов разрядных процессов в газовых полостях, окруженных диэлектрическими слоями [188], [176], [189], [190], [76]. На основе модельных экспериментов было предположено, что с повышением напряженности приложенного поля и понижении поверхностного электросопротивления диэлектрических слоев может возникать переход от наиболее распространенного в таких системах стримерного механизма к таунсендовскому механизму распространения ЧР [176]. Причем, если стримерный механизм создается узким зарядовым пучком индуцированных электрическим полем свободных электронов, сразу после возникновения ЧР он обладает высокой скоростью распространения до 10^7 В/см. Таунсендовский поток, образованный совместным перемещением вторично индуцированных электронов и положительных ионов различного вида,

возникает позднее, поскольку для его начала необходимо накопление достаточного количества ионов. Он распространяется вдоль полости на два порядка медленнее, т.е. обычной дрейфовой скоростью заряженных частиц (ионов). Таунсендовский поток значительно уширен по сравнению со стримерным.

К концу второго десятилетия в большинстве исследований использовались модельные дефекты, сформированные в виде сферических полостей в диэлектриках [164], [94], [142], [145], и только в двух группах ученых по нашим сведениям использовались плоскостные дефекты между одной или двумя диэлектрическими поверхностями [91], [146], [191], [166]. В этих работах более подробно изучался только один (стримерный) механизм распространения ЧР вдоль полости дефекта, что вполне объяснимо малыми размерами ($d \leq 1$ мм) использованных модельных дефектов, поэтому не были обнаружены главные особенности возникновения механизма Таунсенда, сформулированные в работе [176]: уменьшение поверхностного сопротивления диэлектрических поверхностей и увеличение размеров дефектов. Однако уже в начале второго десятилетия появились работы, в которых отмечались ряд необычных особенностей ЧР: обнаруженные влияния ЧР на заряженность диэлектрических стенок в модельных дефектах, изменение ширины разрядных импульсов в полимерных материалах. И снова стали возникать ссылки на первичные работы по таунсендовскому механизму [172] и особенно к результатам Моршиузом [176], [190] с сотрудниками на модельном плоском дефекте в виде газового промежутка между двумя плоскими диэлектриками и соответствующими электродами. Поскольку в работах Моршиуза в полости с толщиной 1 мм при малом приложенном поле наблюдались только ЧР с шириной импульсов – нескольких наносекунд. Их фазовое положение соответствовало $2 \cdot 10^7$ Ом/с, что вполне удовлетворяло стримерному механизму. Однако при повышенном электрическом поле во временном интервале до 20 минут происходило уменьшение сопротивления поверхностей дефекта от 10^{15} до 10^{11} Ом/мм², что приводило к увеличению ширины ЧР до 1-2 мкс. Эти факты по мнению авторов статьи [176] соответствует

переходу от стримерного к таунсендовскому механизму, поскольку удовлетворяет условию Таунсенда [172], позволяющему оценивать значение дополнительного разрядного тока i_T при вырывании положительными ионами электронов из катода

$$i_T = i_0 \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]}, \quad (4.16)$$

где α – число ионизаций за один цикл ЧР, d – размер полости вдоль приложения электрического поля, γ – количество индуцированных электронов, i_0 – ток, создаваемый первичными индуцированными электронами.

Таким образом, уменьшение поверхностного сопротивления диэлектрических слоев приводит к значительному увеличению тока i_T , что обеспечивает диффузный механизм распространения ЧР в широком зарядовом пучке (Таунсендовский механизм)

$$T_{\text{width}} = d / V_T, \quad (4.17)$$

где V_T – скорость распространения ионов в электрическом поле.

Следует подчеркнуть, что упомянутые работы последних лет [94], [142], [145], [91], [146], [191], [166] в отличие от предыдущих [142], [145] были выполнены на плоских дефектах, как в работе Моршиуза (рис. 1.3, 1.4), в которых индуцированные на дефектах электрические поля направлены перпендикулярно приложенным полям, а не параллельно им. Вследствие этого обстоятельства не возникает геометрического сложения напряженностей приложенных и индуцированных полей в области дефекта.

Поскольку до настоящего времени абсолютное большинство экспериментов по изучению процессов генерации и распространению ЧР выполнялось в мире на модельных дефектах, сформированных на поверхности или в объеме различных диэлектрических материалов, то мы стали изучать подобные эффекты на реальных

дефектах в высоковольтных ВИ, сформированных при длительном воздействии высокого напряжения в условиях эксплуатации. Изучались особенности плоских дефектов на диэлектрическом стержне и контакте «стержень – оконцеватель».

Одним из главных выводов по результатам измерений набора характеристик ЧР на фарфоровых и полимерных ВИ стало подтверждение ранее установленного на модельных дефектах факта, что возникновение мощных частичных разрядов на больших дефектах ($d \geq 1$ мм) связано с накоплением электрических зарядов и соответствующих им индуцированных электрических полей за счет зарядов предыдущих обычных ЧР на дефекте. Было установлено, что такое формирование индуцированных полей в полости дефекта характерно не только для полимерных, но и фарфоровых ВИ. Причем для малых дефектов ($d \leq 1$ мм) индуцированные ЧР поля малы по сравнению с приложенным нормированными электрическими полями. Однако с ростом размеров дефектов ($d \geq 1$ мм) и повышением интенсивности соответствующих им ЧР выше 2 нКл начинается изменение общего поля в полости ($E_a + E_i$). При повышении интенсивности МЧР до 4-6 нКл возникало значительное изменение формы, ширины и скорости распространения положительных МЧР, при неизменности тех же характеристик для отрицательных импульсов (рис. 4.10 и рис. 4.11). Значительно изменялось фазовое распределение МЧР. Если для обычных малых ЧР оно определяется фазовым распределением напряженности E_a , то для образцов с $q \geq 3-4$ нКл фазовое распределение соответствует фазовому максимуму напряженности индуцированного в полости дефекта поля E_i [A20].

Таким образом, процесс генерации и распространения МЧР вдоль дефектной полости отличается двумя особенностями от распространения обычных ЧР. Для малых ЧР ($q \leq 2$ нКл) этот процесс в простейшем случае для дефекта между электродом и диэлектрическим стержнем, разделенным газовой полостью с $d \geq 1$ мм, состоит в стримерном процессе распространения сверхскоростного импульса ЧР в виде пучка индуцированных электронов приложенным полем.

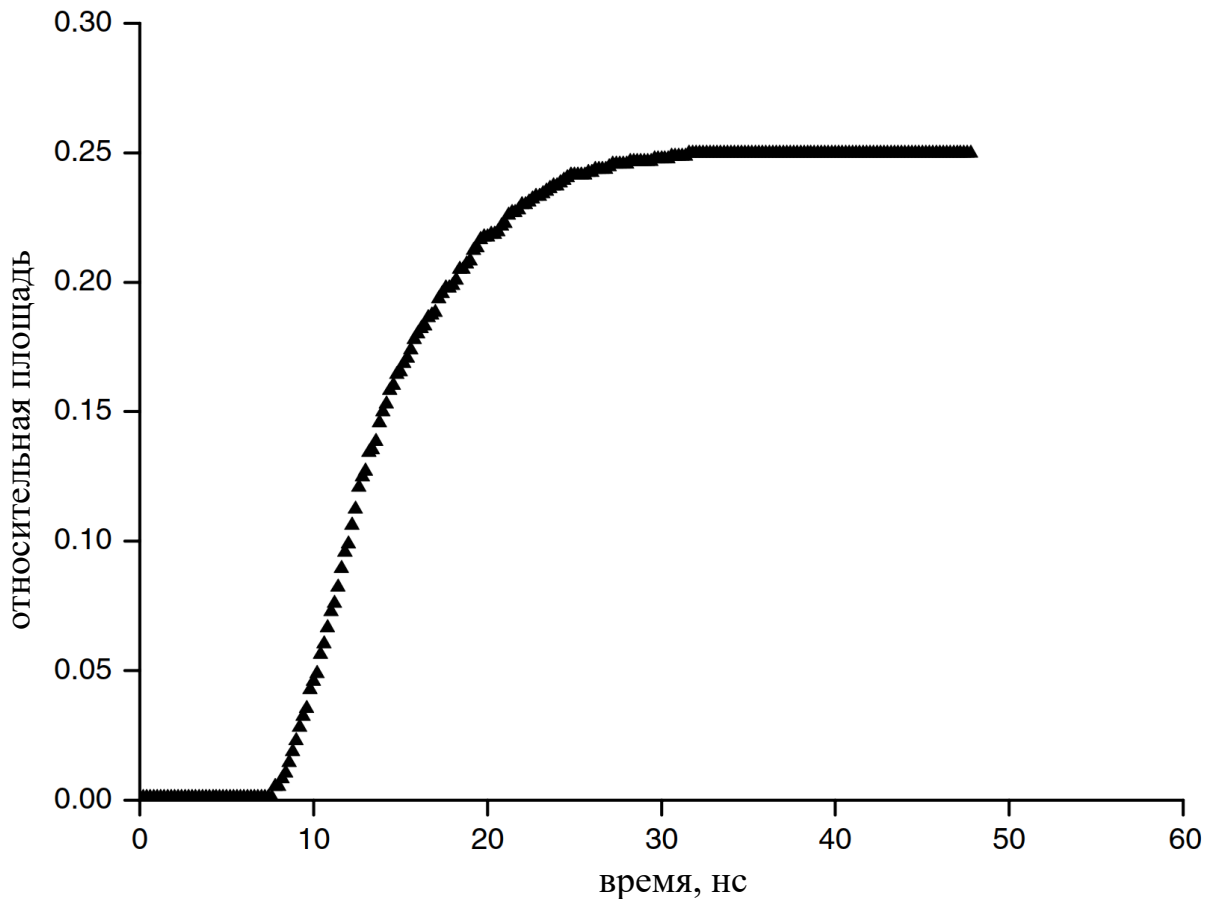


Рис. 4.11. Расширения области разряда при положительном МЧР [164]

Таким образом, процесс генерации и распространения МЧР вдоль дефектной полости отличается двумя особенностями от распространения обычных ЧР. Для малых ЧР ($q \leq 2$ нКл) этот процесс в простейшем случае для дефекта между электродом и диэлектрическим стержнем, разделенным газовой полостью с $d \geq 1$ мм, состоит в стримерном процессе распространения сверхскоростного импульса ЧР в виде пучка индуцированных электронов приложенным полем. При достижении потоком электронов и ионов диэлектрических поверхностей плоского дефекта возникают на последней индуцированные заряды, создающие дополнительное электрическое поле на дефекте. При увеличении количества и интенсивности первичных ЧР возникает дополнительный процесс распространения электронов и ионов вдоль диэлектрической поверхности, перпендикулярно вектору напряженности приложенного поля. По мере накопления на диэлектрической поверхности положительных ионов (30-40 минут), этот процесс может стать преобладающим и быть причиной перехода ЧР от

стримерного к таунсендовскому механизму, особенно при понижении электрического сопротивления. Этот процесс соответствует изменению ширины и формы ЧР. При стримерном механизме распространения ЧР через полость дефекта импульсы ЧР имеют почти симметричную форму и ширину порядка 8-10 нс, а для таунсендовского механизма ширина импульса возрастает до 30 нс и преобладает асимметричность. Возрастающая часть импульса относится к распространению ЧР вдоль газового промежутка в полости (рис. 4.10), а затухающая часть – к распространению ЧР вдоль диэлектрической поверхности. В затухающей части ЧР возникает значительное расширение площади потока за счет увеличения проводимости, сопровождающееся большим увеличением их количества. Накопление зарядов на диэлектрической поверхности также приводит к значительному повышению электропроводности поверхностных слоев полости дефекта.

Из результатов нашего изучения набора характеристик ЧР на реальных ВИ в процессе эксплуатации под рабочим напряжением следует, что одной из главных причин ускоренного старения ВИ является возникновение и рост определенных дефектов, сопровождающийся резким увеличением интенсивности ЧР (для образцов с малыми дефектами – рис. 4.10 *a*, для образцов с большими дефектами – рис. 4.5 *a*) и сменой механизма их взаимодействия с полостью дефекта. Однако в замкнутых полостях дефектов в виде сфер или трехосных эллипсоидов вследствие рекомбинации положительных и отрицательных зарядов на диэлектрической сфере наблюдается только один стримерный механизм распространения импульсов ЧР [145].

4.8. Определение видов дефектов и места их расположения в ВИ в процессе реальной эксплуатации

Как отмечалось в разделе 4.1, часть обследованных ФВИ (группа 3, табл. 4.1, 4.2) имеет более сложный вид характеристик, отличающихся от первой и второй групп как по значениям количества и интенсивности ЧР, так по их согласованию с

фазовым распределением приложенного напряжения к каждому изолятору в трехфазной системе. С использованием выше рассмотренной в главе 1 теоретической модели формирования сигналов ЧР в дефекте электрод - воздушный промежуток - диэлектрик, мы постарались найти удовлетворительное истолкование полученных нами экспериментальных результатов. Тем более, что ранее дистанционные исследования реальных ВИ по известным нам литературным данным не проводились. Предварительное обследование серии ПВИ на подстанции «Челны водоканал» с помощью акустического и тепловизионного датчиков позволило обнаружить ряд необычных характеристик ЧР. В частности, как показано на рис.3.5, ЧР наблюдались в интервале фазовых углов высокого напряжения 0° - 20° ; 120° - 200° и 320° - 360° , что не характерно для обычных дефектов на стержне. Одновременно на том же ПВИ наблюдались с помощью тепловизора *Testo 890* разогрев части стержня изоляторов вблизи оконцевателя на расстояние порядка 10 см примерно на 1-3 °С. По локальному нагреву диэлектрического стержня и форме характеристик ЧР подобные дефекты были отнесены к дефекту типа стержень – оконцеватель, но полностью расшифровать амплитудо - фазовую характеристику тогда нам не удалось [А9]. Для некоторых ФВИ наблюдались еще более непонятные на первый взгляд характеристики ЧР.

Для глубокого анализа необычных характеристик ЧР третьей группы ФВИ был использован ранее разработанный способ бесконтактной дистанционной диагностики ВИ [21], по которому одним из главных признаков дефектности было повышение количества и интенсивности ЧР за дискретный фазовый интервал и наличие мощных ЧР. Поэтому мы на первом этапе анализа расположили ФВИ по установленным ранее признакам увеличения дефектности, а затем исследовали другие особенности характеристик ЧР каждого из ФВИ третьей группы (табл. 3.3 Главы 3). Анализ характеристик ЧР ФВИ в группе 3 удобнее начать с рассмотрения параметров ЧР в образцах более близких к соответствующим группам 1 и 2 (рис 4.5) [А10, А21] и имеющим относительно малые дефекты.

Следует отметить, что представленные характеристики ЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками для образцов ПВИ №9 (рис.3.6) и

ФВИ №3 (рис.3.7) вполне соответствуют друг другу. Так же близки фазовые углы начала и окончания генерации ЧР, как и фазовые интервалы генерации положительных и отрицательных импульсов ЧР. Однако значительное превышение количества отрицательных импульсов ЧР по отношению к положительным, сдвиг фазовых интервалов генерации ЧР относительно максимумов приложенного напряжения позволяют предварительно отнести источник генерации ЧР к дефекту вида «стержень-оконцеватель» в ФВИ. Следует подчеркнуть, что характеристики ЧР на рис. 3.8, хотя и близки по параметрам, но резко отличаются от подобных характеристик для дефектов на стержне примерно равной интенсивности, представленных на рис. 3.4, 3.5 (Глава 3) в ПВИ и рисункам 3.6, 3.7 (Глава 3) в ФВИ. Эти обстоятельства дали возможность применить к характеристикам ЧР этих образцов модифицированную нами и изложенную в главе 1 модель «полости в диэлектрике, ограниченной с одной стороны электродом».

В этом случае рассмотрение влияния взаимодействия приложенного высоковольтного поля E_a и индуцированного ЧР поля E_i , приводящих к генерации новых ЧР, и представленного на графиках (рис. 4.8), удобно начинать с нулевой фазы (φ) приложенного поля E_a , руководствуясь разработанной схемой (рис. 4.12).

Итак, на первом этапе приложенного поля E_a ($0^\circ \leq E_a(\varphi) \leq 45^\circ$) возникновение положительных ЧР можно объяснить существованием поля отрицательных зарядов E_i на поверхности диэлектрика, сохранившихся после предыдущего ЧР: при условии, что суммарное поле $E_t = (E_a + E_i)$ превышает поле пробоя E_B . Вследствие поляризации воздушного промежутка новыми положительными ЧР на поверхности диэлектрика будут накапливаться положительные заряды, частично компенсирующие суммарное поле E_t , что значительно уменьшает с ростом $\varphi > 20^\circ$ количество ЧР. При дальнейшем увеличении фазовых углов ($\varphi > 90^\circ$) поле E_a уменьшается, так же уменьшается и поле E_i , что удерживает количество положительных ЧР на низком уровне [A20]. Затем, начиная с фазы $\varphi = 120^\circ$, поле накопленных положительных зарядов на поверхности диэлектрика начинает

превосходить не только поле E_a , но и поле пробоя E_B ($E_t = E_i - E_a > E_B$). С этого момента начинается генерация отрицательных ЧР.

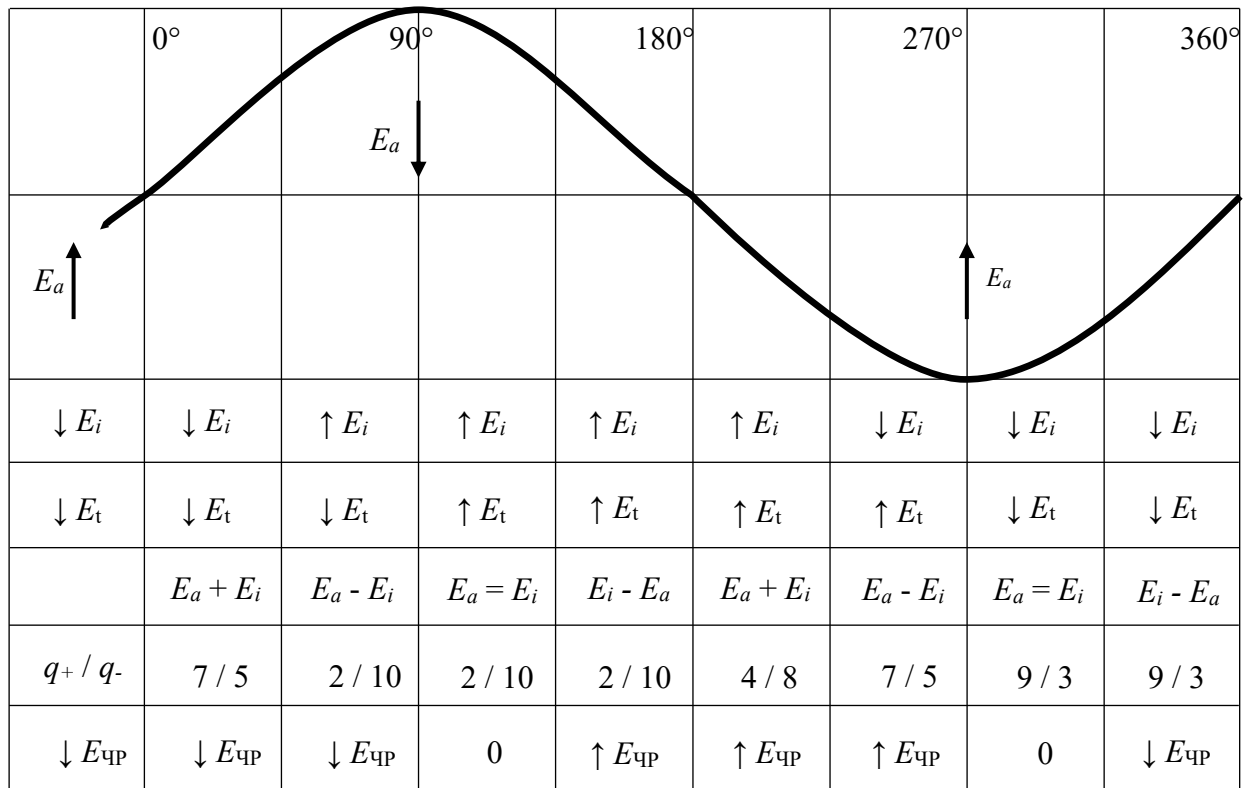


Рис. 4.12. Схема фазового распределения напряженности приложенного поля E_a

Процесс генерации ЧР продолжается до достижения приложенным полем значений напряженности, соответствующей фазовым углам $\varphi = 220^\circ$. Поскольку в этом фазовом интервале $180^\circ - 220^\circ$ напряженности E_a и E_i складываются $E_t = -(E_a + E_i)$, то интенсивность и количество отрицательных ЧР будет значительно превосходить подобные значения для других фазовых интервалов приложенного напряжения, что и наблюдалось в наших измерениях [A20]. В то же время вследствие накопления отрицательных ионов и свободных электронов за счет частичных разрядов на поверхности диэлектрика, начинает уменьшаться общее поле E_t и количество отрицательных ЧР резко уменьшается вблизи $270^\circ - 300^\circ$. Затем при дальнейшем увеличении фазы приложенного напряжения $\varphi \geq 320^\circ$

начинается новое возникновение ЧР, вызванное изменением напряженности электрических полей; уменьшением E_a и возрастанием поля отрицательных зарядов, накопленных на поверхности ранее. Общее поле $E_t = (E_i - E_a)$ начинает превосходить поле пробоя E_B и возникают положительные ЧР, продолжающиеся и в начале нового периода приложенного напряжения [A20]. Таким образом, для рассмотренного сейчас дефекта «стержень-оконцеватель» в отличие от предыдущего вида дефекта (рис. 3.8 Главы 3), расположенного на самом стержне, главной причиной возникновения ЧР и соответствующего расположения фазовых интервалов их возбуждения можно считать поле зарядов, индуцированных разрядами на поверхности диэлектрика. Это обстоятельство особенно важно, когда напряженность E_i может превосходить напряженность приложенного поля E_a . Приблизительно индуцированное поле на поверхности диэлектрика в дефекте можно оценивать по интенсивности ЧР вблизи фазовых интервалов приложенного поля, близких к нулевому значению или 180° [A20]. Следует отметить некоторые особенности обследованных нами образцов. Во-первых, это близкое совпадение характеристик ЧР, измеренное с помощью электромагнитного и акустического датчиков, во-вторых, отсутствие ЧР большой интенсивности и наличие узкой полосы мощностных интервалов ЧР (рис. 3.9, в).

Все это свидетельствует о сравнительно малых размерах дефекта, а большая разница в количестве положительных и отрицательных ЧР, различная ширина положительных и отрицательных импульсов (рис. 3.9), значительный сдвиг фаз генерации ЧР позволяют однозначно классифицировать данный дефект.

К подобному дефекту между стержнем и оконцевателем можно отнести сходный по параметрам набор характеристик ЧР в образце № 9, представленный на рис 4.1, если приложить к их анализу приведенную выше модель дефекта. Следовательно, в общих по параметрам ЧР ПВИ и ФВИ мы наблюдали сходный по характеристикам (малый по интенсивности ЧР) дефект вида «стержень – оконцеватель».

Несколько отличающиеся по фазовым интервалам характеристики ЧР представлены для образца № 7 на рис. 3.10. Так небольшое количество положительных ЧР вблизи нулевой фазы приложенного напряжения (рис. 4.13) на наш взгляд связано с более малым полем положительно заряженных зарядов на поверхности диэлектрика, образующего дефект, по сравнению с рис. 3.9.

Это подтверждается и меньшим количеством ЧР в области фазовых интервалов приложенного поля $34^\circ \leq \varphi \leq 230^\circ$. Малые размеры дефекта, характеризующие узкой мощностной полосой генерации ЧР ответственны за малую интенсивность отрицательных ЧР в фазовом интервале $100^\circ - 160^\circ$. Поскольку для этого интервала генерация отрицательных ЧР создается за счет зарядового поля на поверхности диэлектрика [A20].

Как уже рассматривалось выше, нашими измерениями был установлен ряд ранее неизвестных особенностей совместного использования электромагнитных и акустических датчиков. Так, при регистрации ЧР с интенсивностями не выше 1,0-1,5 нКл их фазовые интервалы совпадали с точностью не ниже 90%, а другие отличия касались только интенсивности и количества ЧР, что было вызвано различной чувствительностью датчиков. Однако при детектировании мощных ЧР ($q > 2$ нКл) наблюдались различия в фазовых интервалах МЧР, которые увеличивались с ростом дефектов, ответственных за генерацию ЧР. Примеры таких различий приведены на рис. 4.13 [A20].

На наш взгляд, причиной тому может быть различия в процессах передачи информации от импульсов ЧР к измерительным датчикам. Первичным процессом при возникновении ЧР является генерация импульсов электромагнитного поля стримерного типа и их распространение в полости дефекта. При этом параметры излучения акустических волн управляются характеристиками механической системы.

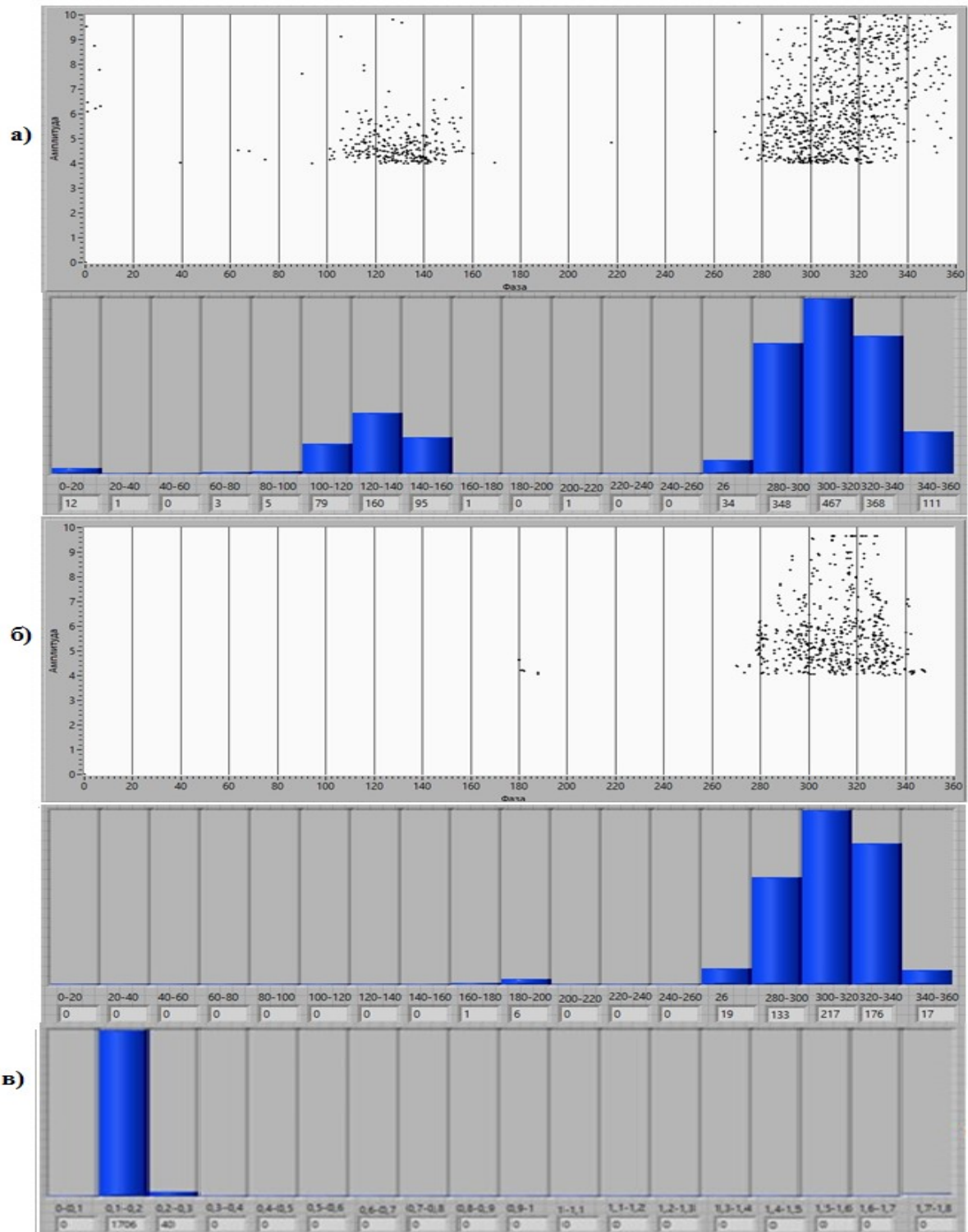


Рис. 4.13. Амплитудно-фазовая и количественно-фазовая характеристики ЧР, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; в – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности ЧР в образце ФВИ № 7

При представлении дефекта в виде сферы малого радиуса r как простейшего случая при условии $r \ll \lambda_a$, где λ_a – длина акустической волны, полная акустическая мощность W_a равна

$$W_a \approx \frac{\rho_c r^2 V_a}{2\pi}, \quad (4.18)$$

где ρ_c – волновое сопротивление, V_a – амплитуда колебательной скорости [A20].

Поэтому изменение размеров дефекта в процессе эксплуатации может существенно влиять на мощность акустического излучения. Вторым не менее важным фактором является изменение электрического поля внутри полости за счет накопления зарядов предыдущих ЧР. При этом также будет изменяться плотность индуцированных зарядов в полости дефекта. Таким образом, предложенный эмпирический метод прогнозирования дальнейшего срока службы предполагает использование двух типов датчиков – высокочастотного электромагнитного и акустического датчиков [A23].

4.9. Влияние МЧР на скорость развития дефектов

Важным элементом в определении диагностических параметров является периодичность их регистрации, которая в основном определяется скоростью развития дефектов. Поскольку сама скорость развития возрастает пропорционально размерам дефектов и приложенным напряжениям, то возникает необходимость в создании физической модели развития дефектов для каждого типа диэлектрических элементов. Сложность решения данной задачи возрастает с использованием для регистрации характеристик ЧР одновременно нескольких датчиков, например, электромагнитного и акустического. Как указывается в ряде работ [56] наиболее быстроразвивающимися являются именно сами ЧР, причем

периодичность регистрации диагностических параметров высоковольтной изоляции с большими дефектами может ускоряться до 2-х часов [A20].

В результате изучения двух видов ВИ с различными рабочими напряжениями нами было установлено, что скорость развития дефектов определяется двумя параметрами: значением приложенного к дефектам напряжения и их размерами. Как уже отмечалось выше, оба параметра характеризуются интенсивностью ЧР, их количеством за определенные фазовые интервалы регистрации измерений. Поскольку при увеличении размеров дефекта при неизменности рабочего напряжения в сети уменьшается напряженность поля в области дефекта, то в этом случае возникает сложная зависимость между ними, приводящая к максимальной скорости развития дефекта [188]. До настоящего времени попытка установить такие интервалы дефектов были сделаны только для сферической формы дефектов в модельных полимерных материалах, но они пока не позволили получить реальные результаты [52]. Поэтому нами предложен эмпирический метод измерения скорости развития дефектов, основанный на измерении ряда характеристик только для МЧР, как главных источников ускорения процессов старения ВИ [A20].

Для более полного обоснования разработанного способа были выполнены измерения набора соответствующих характеристик частичных разрядов на сериях полимерных и фарфоровых высоковольтных изоляторов, содержащих различные виды наиболее опасных дефектов, отличающихся расположением и размерами. Измерения характеристик выполнялись на стенде и на подстанциях с помощью акустического приемника. На рис. 4.14 представлены амплитудно-фазовые характеристики распределения отдельных ЧР для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (*a*) и дефекты на контакте «стержень-оконцеватель» (*б*) [A20].

Верхняя диаграмма (1) соответствует начальному развитию дефектов, не представляющих опасность для работы изоляторов. Диаграммы (2) относятся к более развитым дефектам и содержат мощные ЧР с кажущимся зарядом $q > 2$ нКл. Для дефектов на стержне они расположены симметрично на положительном и отрицательном фазовых полупериодах высокого напряжения. Для дефектов

«стержень-оконцеватель» такие разряды характерны только для отрицательного полупериода. На диаграммах (3) приведены распределения ЧР для образцов с большими дефектами, представляющими опасность для дальнейшей эксплуатации. Для них характерно значительное увеличение количества и кажущегося заряда мощных ЧР, а также расширение фазовых интервалов генерации [А10].

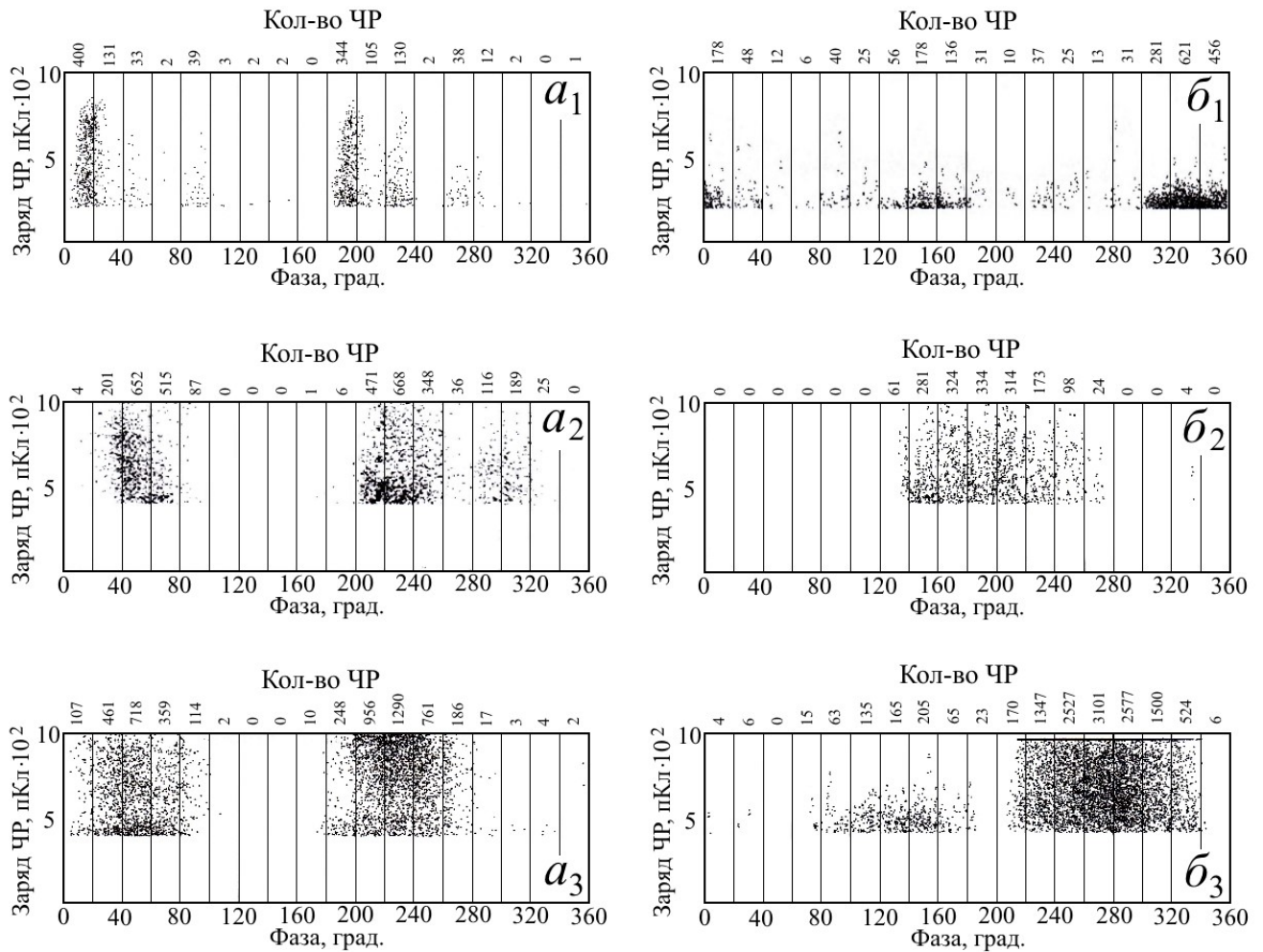


Рис. 4.14. АФХ распределения отдельных частичных разрядов для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (а) и дефекты на контакте стержень-оконцеватель (б):

- 1 – начальное развитие дефектов, 2 – более развитые дефекты, содержащие мощные ЧР,
3 – большие дефекты, представляющие опасность для дальнейшей эксплуатации

Так же были обнаружены сдвиги фазовых интервалов генерации ЧР для дефектных ВИ, находившихся в эксплуатации при обследовании их с интервалом в три месяца (рис. 4.15).

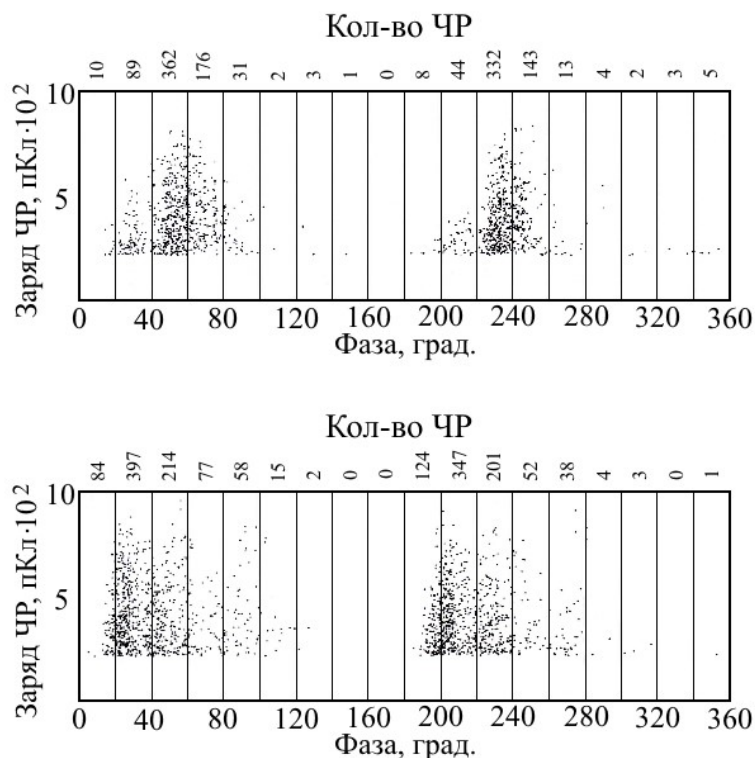


Рис. 4.15. Фазовый сдвиг интервала генерации мощных ЧР в сторону меньших углов.

При этом было установлено возрастание кажущегося заряда и увеличение количества ЧР за один фазовый интервал. Эти факты, согласно разработанной физической модели, свидетельствуют о возрастании размеров дефектов, генерирующих мощные ЧР [А10].

По результатам обследования контактным и дистанционным методами [А6, А41] серии полимерных (ЛК 35/70) и фарфоровых (ИОС 110/400) изоляторов были установлены наиболее важные диагностические параметры, в значительной степени дополняющие подобные параметры, рекомендованные ГОСТ Р55191-2012 [А10].

4.10. Дистанционный мониторинг технического состояния ВИ

Известны бесконтактные способы непрерывного контроля технического состояния высоковольтных изоляторов, позволяющие фиксировать момент пробоя или полного их разрушения, которые получили общее название «индикаторы пробоя изоляторов» [39], [41], [46]. Разработанные в них программы непрерывного

контроля показаний оптических, емкостных, термодинамических датчиков, прикрепляемых непосредственно к каждому изолятору, позволяют только регистрировать резкое изменение проводящего состояния изоляторов и разбраковывать их по принципу: работоспособный – неработоспособный, не контролируя процесс развития дефектов [A10]. К другим недостаткам можно отнести сложность непрерывной передачи информации от каждого датчика, ненадежность работы в жестких климатических условиях и высокая стоимость оборудования.

Нами разработана методика дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов, основанная на выделении наиболее опасных дефектов по ряду диагностических признаков на основе детектирования приемником импульсов мощных частичных разрядов с последующей их компьютерной обработкой с целью определения количества и интенсивности разрядов, превышающих допустимый порог для возникновения дефектов, приводящих к пробое изоляторов в процессе эксплуатации. Основным недостатком этого способа и других подобных однократных способов диагностики является невозможность оценки развития дефектов и последующего их влияния на дальнейшую работоспособность изоляторов, а также сложность измерения ширины и формы линий импульсов отдельных частичных разрядов.

Периодический контроль (мониторинг) за развитием дефектов в изоляторах стал еще более актуальным после обнаружения мощных разрядов, по интенсивности превышающих обычные частичные разряды в несколько раз [A11]. Было установлено, что мощные разряды возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов предыдущими обычными частичными разрядами. Наведенные разряды образуют индуцированные поля (E_i), которые могут значительно превышать приложенные высоковольтные поля (E_a). Мощные разряды возникают при сложении одинаково направленных полей E_i и E_a , что происходит в фазовых интервалах положительного ($0-50^\circ$) и отрицательного ($180^\circ-240^\circ$) полупериодов поля E_a . Количество и интенсивность мощных разрядов

возрастают с увеличением размера дефекта и могут составлять 2-6 разрядов за период каждого цикла высокого напряжения с интенсивностью 2-6 нКл [A20].

Именно такие мощные разряды вызывают деградацию диэлектрических поверхностей, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации изоляторов. Поэтому периодический контроль за характеристиками мощных разрядов является одним из наиболее важных при дистанционном мониторинге состояния высоковольтных изоляторов [A20].

Техническим результатом мониторинговой диагностики является определение таких важных диагностических параметров дефектов как вид, место расположения, размер, скорость развития, степень влияния на дальнейшую работоспособность посредством периодического измерения разработанного набора характеристик частичных разрядов, обеспечивающего получение значений диагностических параметров дефекта.

Это достигается посредством периодического измерения импульсов сигналов частичных разрядов перестраиваемым радиочастотным приемником с узконаправленной антенной и последующей компьютерной обработки сигналов с помощью оригинальной программы. Наличие наиболее опасных дефектов определяется по возникновению мощных разрядов с интенсивностью выше 2-3 нКл, предельные значения которых определяются материалом и видом высоковольтных изоляторов, как это предусмотрено в патенте-прототипе.

Вид и место расположения наиболее опасных дефектов определяется по фазовому распределению мощных разрядов с интенсивностью выше 2 нКл: симметричное их расположение в положительных и отрицательных полупериодах приложенного напряжения характеризует дефекты на оболочке стержня изолятора, а наличие мощных разрядов только при отрицательном полупериоде соответствует дефекту на контакте стержень-оконцеватель [A10].

Скорость развития наиболее опасных дефектов определяется по изменению таких диагностических параметров, как фазовое смещение мощных разрядов в фазовые интервалы с приближением к началу полупериодов (0° и 180°), а также

увеличение интенсивности и количества во временном интервале между двумя последовательными измерениями диагностических параметров дефектов [A10].

По скорости развития наиболее опасных дефектов возможно прогнозирование остаточного ресурса технического состояния изоляторов [A10].

Способ дистанционного мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов осуществляется посредством следующих операций [A10].

– На первом этапе для каждого вида высоковольтных изоляторов с помощью рекомендованного ГОСТ Р55191-2012 контактного и электрооптического методов в стендовом варианте устанавливаются предельные значения параметров характеристик мощных частичных разрядов, не создающие пробоя дефектов изоляторов, но влияющие на скорость развития дефектов.

– На следующем этапе эти установленные контактным способом нормированные диагностические параметры сопоставляются со значениями тех же параметров частичных разрядов, измеренными дистанционно радиочастотным приемником с узконаправленной антенной. Затем импульсные сигналы частичных разрядов, синхронизированные с фазой высокого напряжения, накопленные в течении не менее 18 с., распределяются в соответствии с разработанной компьютерной программой по интенсивности, количеству и фазовым углам, образуя необходимый набор диагностических параметров, характеризующих состояние изолятора на момент данного измерения. Обработанный набор параметров в нормализованном виде сохраняется в базе данных.

– На последнем этапе путем сравнения результатов текущего измерения значений диагностических параметров со значениями тех же параметров, полученными при предыдущих дистанционных измерениях, делается вывод об остаточном ресурсе (сроке службы) изоляторов, а также о периодичности дальнейших дистанционных измерений.

Скорость развития дефектов определяется по возрастанию интенсивности мощных частичных разрядов и фазовому сдвигу интервала их генерации в сторону меньших углов на фазовой диаграмме (рис. 4.12). Диаграммы сняты с интервалом

в 30 дней для одного и того же изолятора, находящегося в работе. Увеличение интенсивности во временном интервале между двумя последовательными измерениями диагностических параметров позволяет судить о скорости развития наиболее опасных дефектов и прогнозировать остаточный ресурс технического состояния изоляторов [А10].

Таким образом, выполненные стендовые и полевые испытания разработанной методики и измерительного комплекса [А14, А6] показали реальную возможность его использования для мониторинга состояния ВИ, находящихся в режиме эксплуатации [А10].

Выводы к главе 4

1. По результатам измерений комплексным дистанционным методом набора характеристик ЧР, выполненным при обследовании ФВИ и ПВИ на подстанциях, установлены три основных диагностических признака, позволяющие определять вид и место расположения наиболее опасных при эксплуатации дефектов. К ним относятся: значительное (в 2-3 раза) увеличение интенсивности ЧР, соответствующих отрицательным полупериодом высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, значительное отличие формы одиночных импульсов ЧР для положительных и отрицательных сигналов для дефектов «стержень-окопцеватель», что не характерно для дефектов на стержне, сдвиг в сторону меньших фазовых углов начала генерации МЧР.

2. Результатом является разработанная усовершенствованная модель описания особенностей параметров ЧР, учитывающая вклад в излучение ЧР помимо приложенного поля, так же и поля, индуцированного разрядами на диэлектрических поверхностях, ограничивающих область дефекта в полимерных и фарфоровых ВИ.

3. Показано, что одной из главных причин ускоренного старения ВИ является возникновение и рост определенных дефектов, сопровождающийся резким

увеличением интенсивности ЧР и сменой механизма их взаимодействия с полостью дефекта.

4. Усовершенствована стримерная модель распространения импульсов МЧР вдоль полости дефекта, в которой учитывается не только генерация высокочастотных импульсов электромагнитных волн, но и одновременная генерация ударных волн, излученных скачком давления в головной части стримера. Именно совокупность ударных волн порождает импульсы акустических волн. Этот процесс в отличие от излучения импульсов электромагнитных волн зависит от условий накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта.

5. СИСТЕМА МОНИТОРИНГОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.1. Концепция системы мониторинга (периодической диагностики) высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации

Как следует из работ последнего времени [91], [95], [192], [193], [194] ЧР является одной из главных причин деградации высоковольтной изоляции, особенно для полимерных элементов, и только мониторинг параметров ЧР позволяет связывать техническое состояние высоковольтного оборудования с диагностическими характеристиками ЧР и дефектами в диэлектрических элементах [195], [196], [197], [198], [199], [200], [201], [202], [203], [204]. Поэтому так важны разработанные уже в XXI веке компьютерные модели электрофизических процессов, протекающих в области дефекта во время ЧР. Таких моделей ЧР на основе компьютерного моделирования наиболее простых дефектов в виде полых сфер или трехмерных эллипсоидов было разработано до настоящего времени более десятка [91]. Они в основном касались таких важных вопросов, как возникновение [137], [136], развитие и угасание ЧР. Причем главным условием достоверности предложенных компьютерных моделей были степени их совпадения с результатами экспериментальных исследований на дефектах в различных полимерах. При этом в экспериментах также формировались и изучались дефекты в основном сферической формы. Более того, практически до настоящего времени отсутствуют серьезные работы по изучению электрофизических процессов в реальных ВИ, где дефекты как правило образуют сложные пространственные конфигурации. Однако, несмотря на ряд упрощений при рассмотрении процессов ЧР в модельных образцах был установлен ряд важных факторов (стохастичность самих разрядных процессов, влияние остаточных зарядов и сформированных из них электрических полей на диэлектрических поверхностях дефекта, влияние газовой среды), которые приводят к ускоренной

поверхностной деградации диэлектрических материалов и соответствующему уменьшению остаточного ресурса.

Поскольку ЧР в значительной степени изменяют (повышают) напряженность приложенных электрических полей в области дефектов и их действие не ограничивается временем самого разряда, то, как следует из выполненных нами предварительных экспериментов на реальных ВИ [А3], возникала необходимость в замене одноразовых инспекций технического состояния на его мониторинг в период всей эксплуатации.

Помимо мониторинга текущего технического состояния ВИ и развития дефектов в них особое внимание было обращено на создание методики прогнозирования дальнейшего развития дефектов и их влияния на срок эксплуатации высоковольтного оборудования. В недавних работах [146] появился даже термин «эффект памяти» (Memory effects). Длительное временное (часы-дни-месяцы) влияние ЧР также стало объектом наших экспериментов в течение нескольких лет.

Вследствие того, что ЧР являются случайным явлением, то есть носят стохастический характер и зависят от приложенного электрического поля [68], [182], [205], [206], [207], [208], [209], [210], то такие диагностические параметры, как фазовый интервал начала и окончания генерации ЧР, интенсивность ЧР, количество ЧР, фазовый интервал максимальных ЧР, интенсивность превышающих среднее значение за период максимальных ЧР, количество превышающих среднее значение за период максимальных ЧР – в первом приближении позволяют судить о техническом состоянии ВИ, а при мониторинге ВИ в течение периода эксплуатации оценивать их остаточный ресурс [А18].

На ПС и ВЛ применяются полимерные, фарфоровые и стеклянные ВИ, которые эксплуатируются в условиях высоких электрических полей, широкого градиента температур и влажности, подвержены загрязнению вблизи промышленных объектов, автомагистралей и пр. Условия эксплуатации могут привести к раннему износу изоляции ВИ, вызывать ее ускоренное старение и, как следствие, сократить срок службы ВИ, элементов ПС и ЛЭП [А18].

Онлайн мониторинг в процессе эксплуатации может снизить риск выхода из строя высоковольтного оборудования из-за повреждений ВИ, так как это позволяет перейти от разового контроля параметров ЧР к непрерывному и контролировать развитие дефектов, а, следовательно, и прогнозировать остаточный ресурс ВИ [A18].

ЧР – это сложное физическое явление, состоящее из локализованного электрического разряда, вызванного частичным пробоем изолирующей среды под воздействием приложенного электрического напряжения. ЧР генерируют электромагнитные и акустические волны, излучают свет и тепло, вызывают химическое разложение изоляционных материалов. Согласно существующим стандартам [3], [4] для контроля технического состояния высоковольтной изоляции используются электромагнитный, акустический, оптический и химический методы. Выбор подходящего метода зависит от типа диагностируемого оборудования и степени его дефектности [A18].

Разработанная автоматизированная система мониторинга технического состояния ВИ на подстанциях и ЛЭП может применяться для диагностики как опорных, так и подвесных ВИ. В первом случае блоки бесконтактного диагностического устройства (БДУ) устанавливаются на площадке подстанции вблизи ВИ. Во втором случае они подвешиваются так же вблизи ВИ на высоковольтных фазных проводах.

Как рассмотрено в Главах 2 и 3, для измерения ЧР используются узконаправленные приемные антенны электромагнитных, акустических и оптических волн различной формы, затем производится триангуляция местоположения события частичного разряда в 3-х измерениях.

Поскольку, как указано в Главе 4, более точно количество и интенсивность МЧР определяется с помощью акустических датчиков, то для измерения параметров ЧР в ВИ с учетом данных Главы 4 при мониторинге предлагалось использование автоматизированных бесконтактных диагностических устройств, блок-схема которых представлена на рис. 5.1. В первом варианте основные измерения в диагностическом устройстве проводятся с помощью акустического

датчика и датчика фазы. Диагностическое устройство устанавливается на фазный провод на заранее определенном расстоянии от точки подвеса провода. Акустический датчик с помощью приемника измеряет акустические сигналы, излучаемые МЧР.

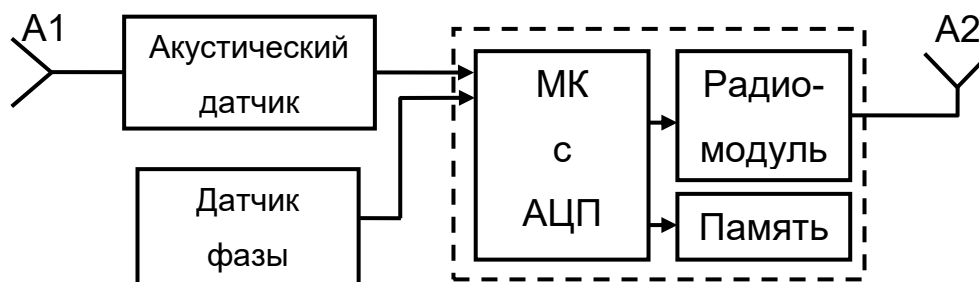


Рис. 5.1. Блок-схема БДУ: А1 – приемник акустического датчика, А2 – антенна для передачи данных для записи и анализа сигналов, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллерный блок обработки

Для измерения акустических импульсов от ЧР применяются частоты от 10 до 80 кГц. После цифровой обработки в АЦП полученные данные с двух датчиков обрабатываются в микроконтроллере и передаются на устройство хранения.

В нашем случае комплекс из трех диагностических устройств (по одному устройству на фазном проводе высоковольтной линии электропередачи) представляет собой приемную антенную решетку (рис. 5.2). Определяется разница во времени прихода (англ. – *TDOA*) между принятыми сигналами на каждом из соответствующих диагностических устройств, что позволяет вывести трехмерное положение источника акустического сигнала путем обработки значений *TDOA*. Три бесконтактных диагностических устройства устанавливаются вблизи каждого ВИ на каждый фазный провод ($D_1 - D_3$) на определенном известном расстоянии от ВИ – r_i , где i – порядковый номер датчика ($i = 1-3$). Датчики могут работать на ЛЭП от 10 кВ и выше, либо на подстанции.

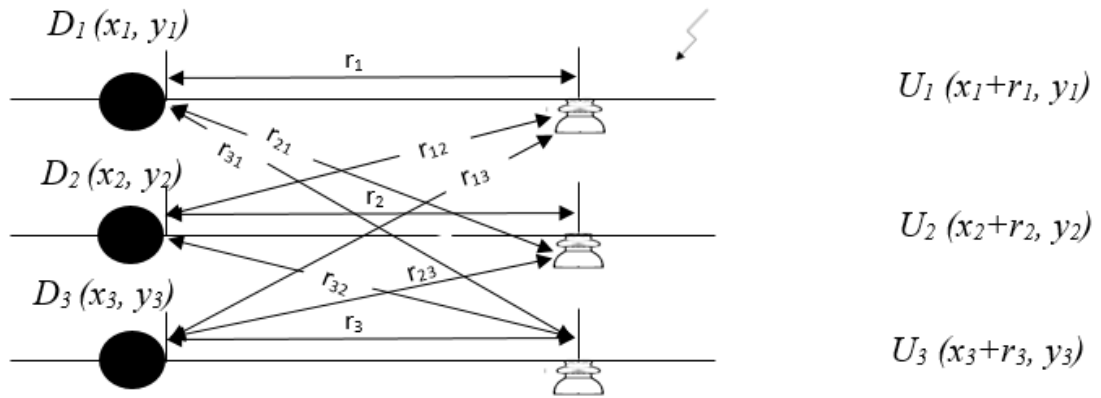


Рис. 5.2. Схема установки БДУ

Метод локализации разряда во времени состоит из двух основных этапов, а именно измерения разницы во времени прибытия сигнала до датчика и решения нелинейных уравнений [А41]. Подобный метод часто используется при локальном позиционировании мобильных устройств. Метод основан на измерении разницы во времени передачи акустического сигнала от ЧР до диагностических устройств, с синхронизацией по времени и заранее известным местоположением.

Знание координат каждого диагностического устройства, установленного на фазном проводе (рис. 5.1), позволяет рассчитать время распространения от акустического импульса источника частичных разрядов до соответствующих диагностических устройств с использованием основной формулы $D = v \cdot t$, где D - расстояние, v - скорость распространения, а t - время распространения. Этот метод описывается выражением

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = (v_e \cdot t_i)^2 \quad (5.1)$$

где (x_i, y_i, z_i) - координаты i -го диагностического устройства в декартовом пространстве, (x, y, z) - истинные координаты события частичного разряда, v_e - скорость акустической волны, t_i - время распространения сигнала ЧР от его источника до i -го датчика.

Так как измерения проводятся в 2-х измерениях, координата z не учитывается и выражение (5.1) принимает вид

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = (v_e \cdot t_i)^2 \quad (5.2)$$

При этом время пролета от источника ЧР до БДУ D_1 равно t , а разница во времени прихода между устройствами D_1 и D_2, D_3 равна τ_{1n} . Для нашего случая для трех БДУ используется система уравнений [A41], [211], [212]:

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= (v_e \cdot t)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= (v_e \cdot (t + \tau_{12}))^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= (v_e \cdot (t + \tau_{13}))^2 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Положение источника частичных разрядов (x, y) может быть вычислено с использованием метода наименьших квадратов:

$$S(X) = \sum_{i=1}^N (Y_i(X))^2 \quad (5.4)$$

В этом случае стандартное определение $Y_i(X)$ выражается в виде

$$Y_i(X) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - (v_e \cdot (t + \tau_{1i}))^2 \quad (5.5)$$

Метод наименьших квадратов является итерационным и дает приближенное решение уравнений, основанное на количестве итераций и начиная с начального значения, которое улучшается на каждой итерации с помощью границы ошибки до тех пор, пока не будет найдено сходимое решение или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций.

После определения количества ЧР, их интенсивности и местоположения, полученное распределение сравнивается с аналогичным для исправных, преддефектных и дефектных изоляторов [A18].

5.2. Система мониторинга высоковольтной изоляции открытых распределительных устройств подстанций

Здесь мы подробно рассматриваем только акустический метод, который основан на регистрации акустических волн в основном от возникающих на поверхностях дефектов МЧР, и относится к методам неразрушающего контроля изоляции [213], [214], [215], [216], [217], [218], [219], [220].

Основной принцип акустического метода заключается в регистрации акустических волн, генерируемых при возникновении ЧР в ВИ, датчиками. В своих системах мы используем пьезоэлектрические и МЭМС ультразвуковые датчики [221], [222]. Выбор рабочей частоты этих датчиков обусловлен частотной зависимостью затухания волн, производственными шумами и электромагнитными помехами окружающего электрического высоковольтного оборудования. Так акустические шумы доминируют в низкочастотной области (20 Гц – 20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания ($f \geq 100$ кГц). В интервале 35 – 45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал/шум ≈ 2 , акустические импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 15 – 25 м [A10], [A18], [223].

ЧР в ВИ возникают на внутренних и поверхностных дефектах [11], [20]. ЧР генерирует нестационарную акустическую волну, создаваемую импульсом тока частичных разрядов, и являются точечным источником акустических волн. Для диагностики ЧР на внутренних дефектах акустическим методом необходимо использовать датчик, имеющий акустический контакт с телом изолятора, так как на границе фарфор/полимер – воздух происходит практически полное отражение акустической волны [144]. При возникновении ЧР на поверхностном дефекте

акустическая волна распространяется сферически, что позволяет регистрировать ее бесконтактно.

Для локализации источника ультразвука от возникающих на дефекте ВИ ЧР была создана система мониторинга (рис.5.3) высоковольтных изоляторов на подстанции открытого типа. Система представляет собой четыре микрофонные решетки, установленные по периметру подстанции (рис. 5.4) [A11].

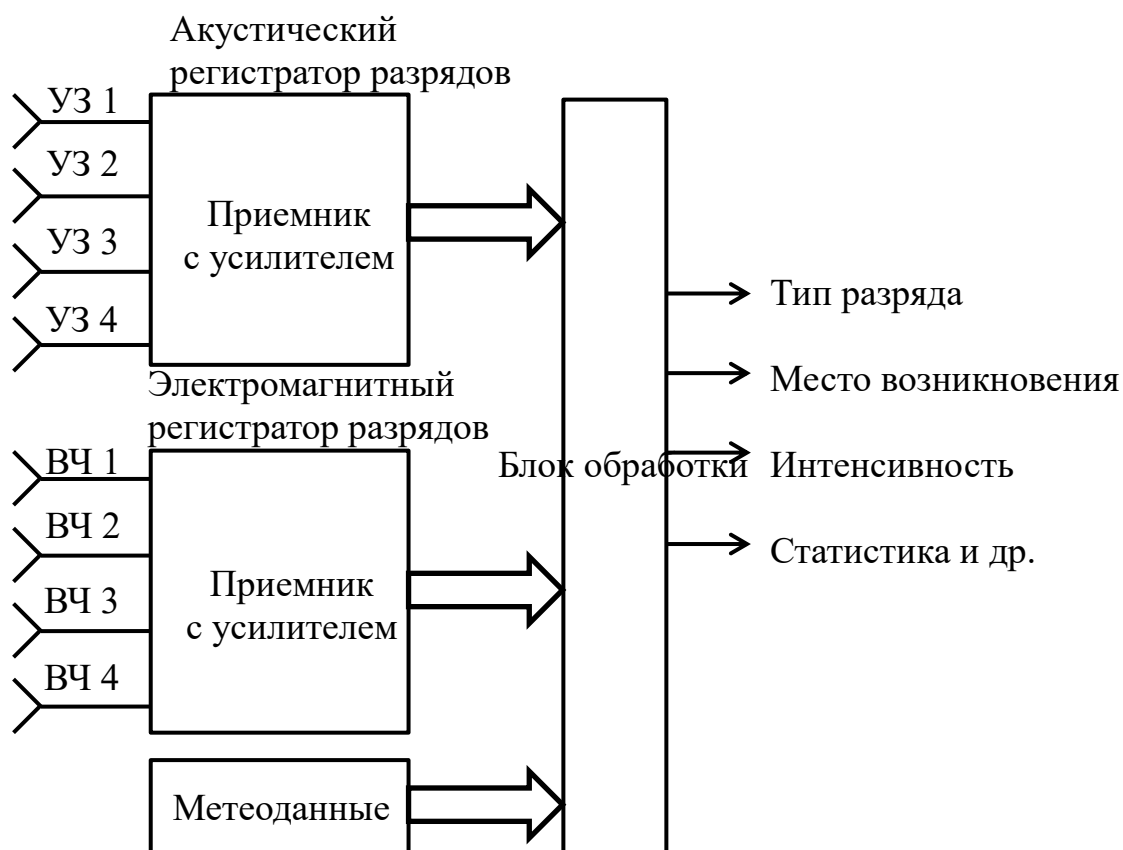


Рис.5.3. Структура системы дистанционного мониторинга состояния высоковольтных изоляторов на подстанции: УЗ – акустический приемник; ВЧ – приемник электромагнитного излучения ЧР

В разработанной системе мониторинга микрофонная решетка состоит из четырех пьезоэлектрических приемников с резонансной частотой 41 кГц. Схема одного канала приведена на рис. 5.5. В схеме предусилителя был использован операционный усилитель *LM324A*, коэффициент усиления сигнала схемы усиления составляет 2000. Такое решение необходимо для сбора аналоговых данных для дальнейшей обработки. Акустическая волна от ЧР возбуждает пьезоэлектрический

кристалл приемника, создавая небольшое переменное напряжение, которое усиливается предусилителем, затем фильтруется. На рис.5.6 приведены усиленные сигналы на каждом приемнике для одного и того же ЧР. Зарегистрированный с помощью ЭМ-датчика сигнал того же ЧР приведен на рис. 5.7 [А11].

Таблица 5.1 – Технические характеристики системы мониторинга ВИ в процессе эксплуатации

Параметр	Типовое значение
Диапазон частот	Электромагнитный канал: 0,5 – 800 МГц
	Акустический канал: 15,1 – 190,7 кГц
Полоса пропускания	Электромагнитный канал: 15 кГц – 15 МГц
	Акустический канал: ± 2 кГц при 6 дБ
Чувствительность	Электромагнитный канал: 10 пКл при соотношении сигнал/шум = 3
	Акустический канал: 65 дБ (1 В/1 мбар)
Программный комплекс	В соответствии ГОСТ Р 8.654-2015
Диапазон измеряемых значений кажущегося заряда q , пКл	от 50 до 20000
Относительная погрешность измерения кажущегося заряда q , %	не более 30
Общая длительность измерения параметров характеристик ЧР	Не ограничивается
Относительная погрешность измерения фазного угла импульса ЧР, %	Не более 3
Единицы измерения фазного угла импульса ЧР	Градусы
Метеоданные	Скорость и направление ветра, относительная влажность, температура воздуха, атмосферное давление

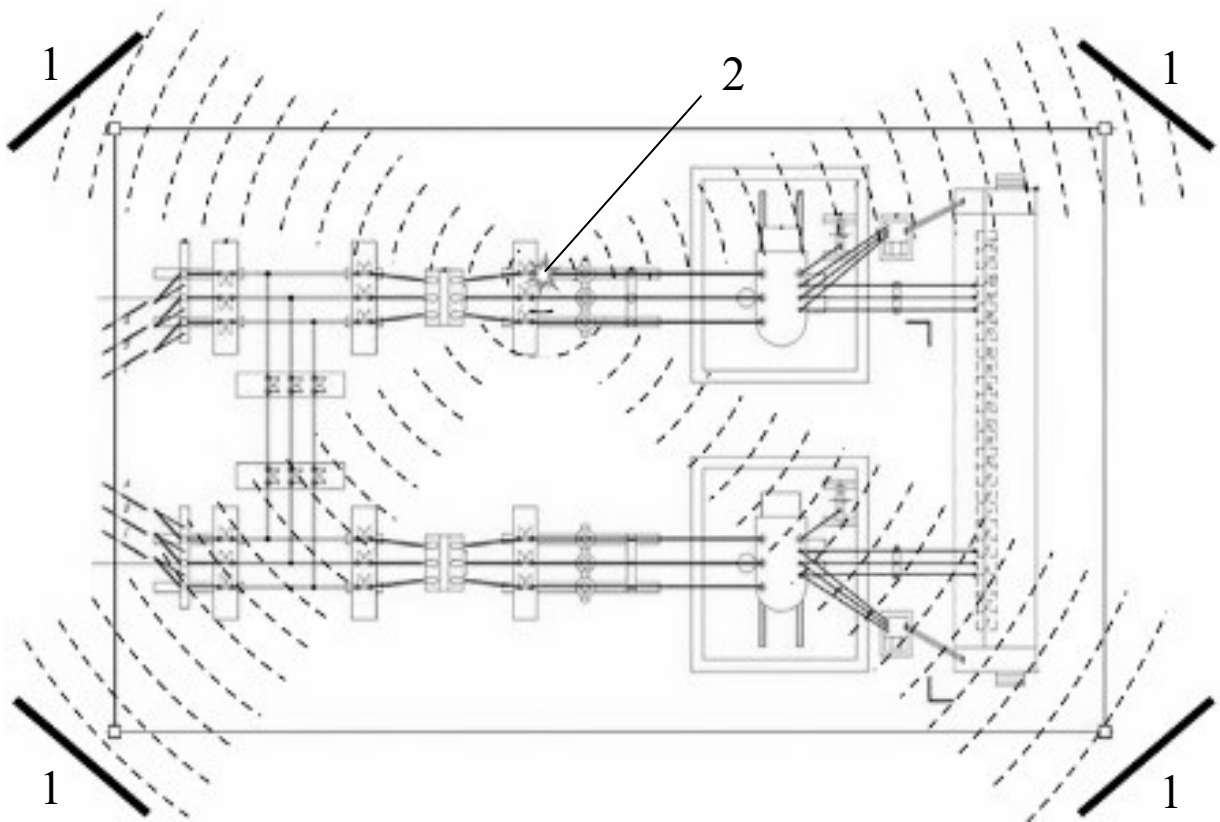


Рис. 5.4. Схема расположения микрофонных решеток на ОРУ подстанции:
 1 – микрофонные решетки; 2 – локализуемый источник ультразвукового излучения

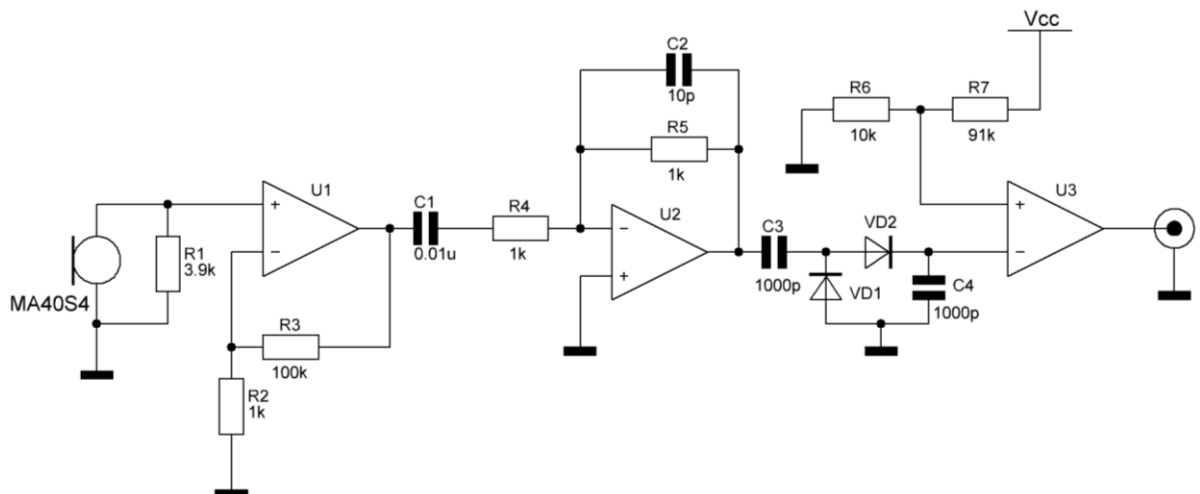


Рис. 5.5. Схема предварительного усиления и детектирования для одного приемника

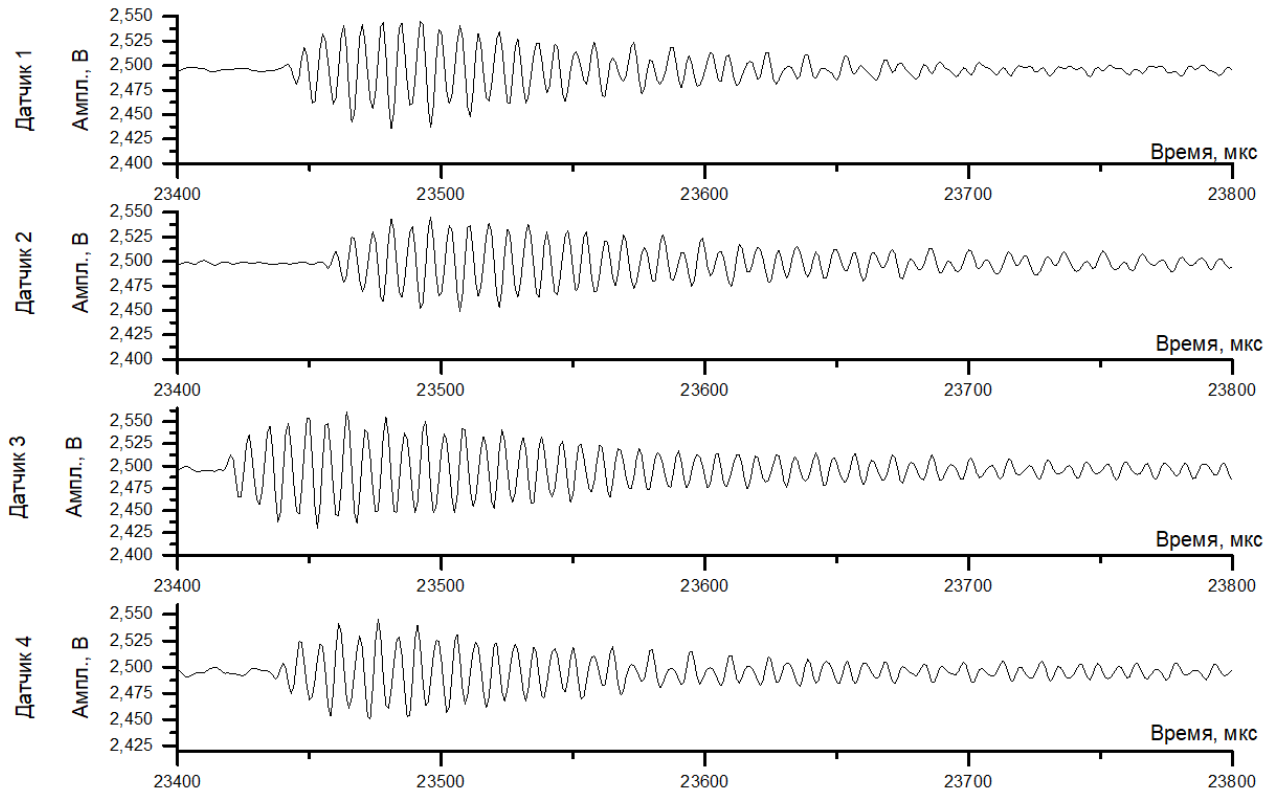


Рис. 5.6. Сигнал одного ЧР, принятый каждым УЗ-приемником микрофонной решетки

После предусиления сигналы собираются на аналого-цифровом преобразователе *USB-6251* [224] и обрабатываются на персональном компьютере. После программной обработки место возникновения ультразвука накладывается на картинку с видеокamеры (рис. 5.8) с указанием интенсивности. Вся конструкция микрофонной решетки заключена в металлический корпус (рис.5.9) для минимизации наведенного электромагнитного шума от высоковольтного оборудования [A11].

Для локализации акустического источника с помощью микрофонной решетки используется кросс-корреляция сигналов датчиков [225], [144], [226], [227]. Пространственное расположение приемников с обозначениями их порядковых номеров указаны на рис. 5.10. Источник сигнала - *rs*. Кросс-корреляция выполняется для сигналов пар приемников r_1-r_4 и r_2-r_3 [A11].

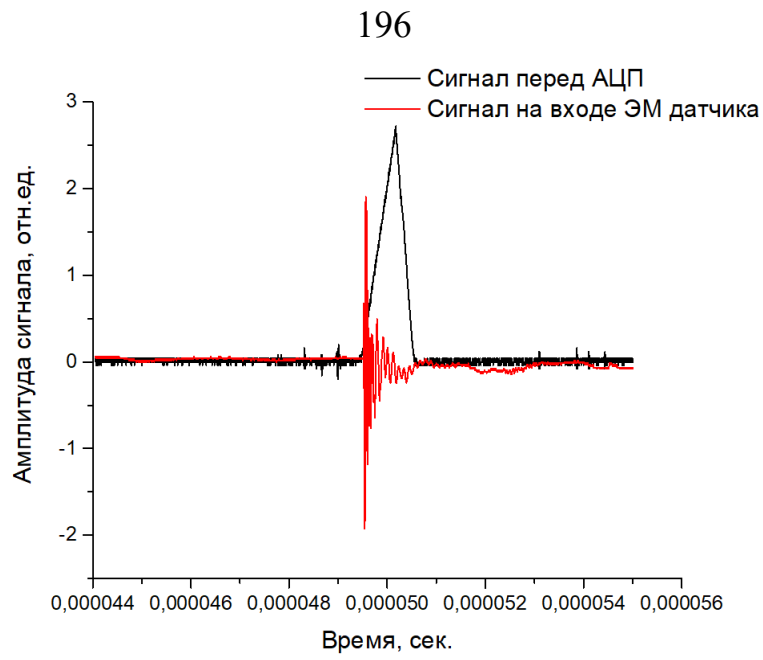


Рис. 5.7. Сигнал одного ЧР, принятый ЭМ-приемником диагностического устройства

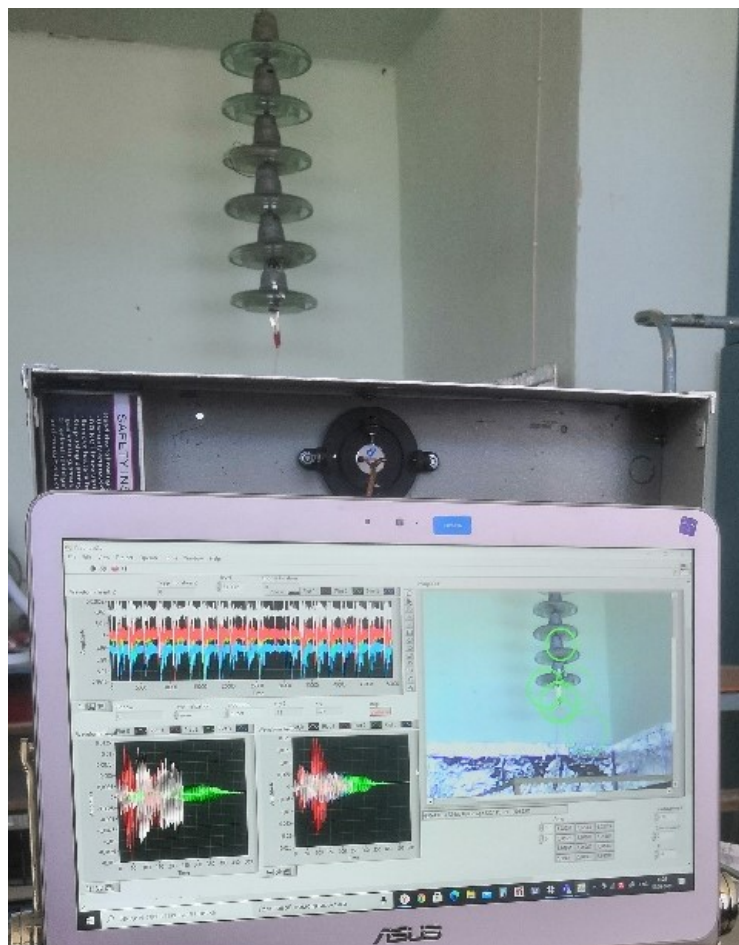


Рис. 5.8. Визуализация регистрации акустического импульса ЧР

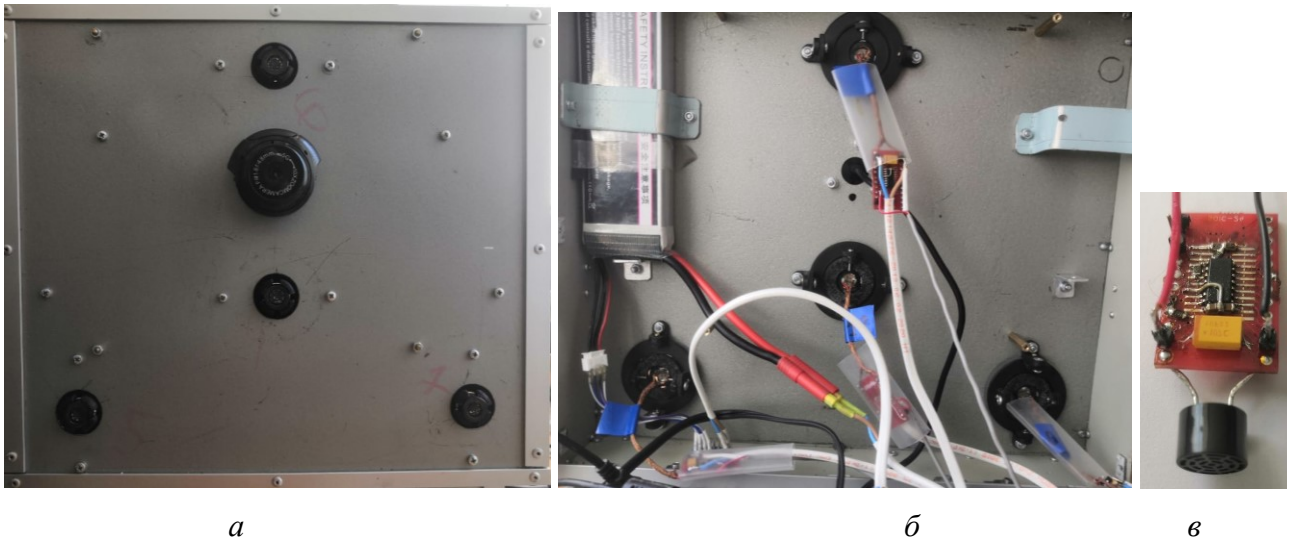


Рис. 5.9. Прототип измерительной ячейки на основе микрофонной решетки: *а* – вид спереди, *б* – вид сзади, *в* – пьезоэлектрический датчик с платой усилителя

Функция кросс-корреляции для пары приемников \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_4

$$R_{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_4}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathbf{r}_1(n) \mathbf{r}_4(n+t). \quad (5.6)$$

Последовательность получаемого сигнала от каждого приемника делится на равные отрезки из n -точек. Отрезки с нулевым уровнем сигнала отбрасываются, что позволило значительно повысить отношение сигнал/шум. Получаемое значение функции $R_{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_4}(t)$ определяет уровень корреляции между выходами двух датчиков \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_4 . Более высокий уровень корреляции означает, что аргумент t относительно близок к реальной разнице во времени прихода сигнала [А11].

Для пары датчиков \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_4 разница во времени прибытия определяется отношением

$$\Delta t = \frac{d \cdot \cos \theta}{v}, \quad (5.7)$$

где θ - угол между нормалью приемников \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_4 и падающим звуком, градусы.

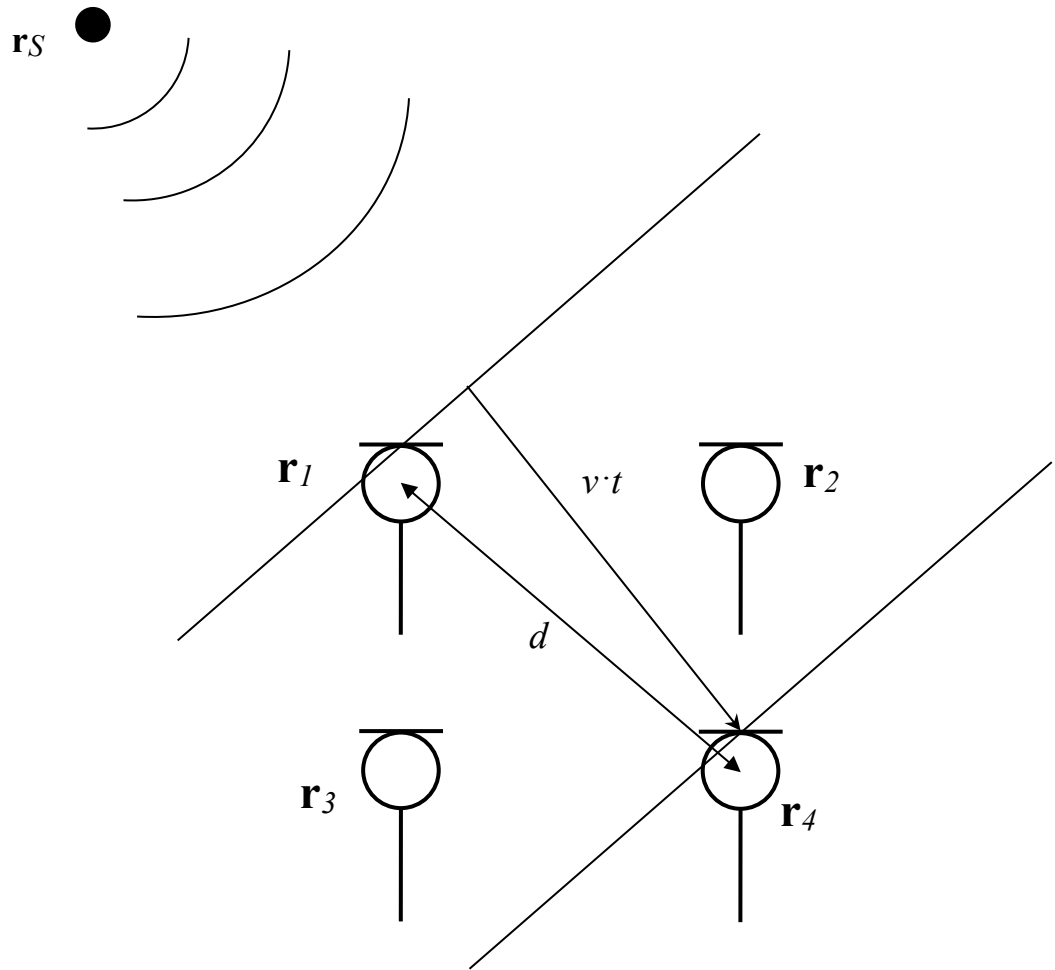


Рис. 5.10. Пространственное представление микрофонной решетки

Для пары приемников r_2 - r_3 кросс-корреляция сигналов выполняется аналогичным способом [A11].

Разница во времени прибытия по результатам кросс-корреляции сигналов для каждой пары приемников микрофонной решетки позволяет восстанавливать координаты источника акустического излучения – локализовать место дефекта на обследуемых высоковольтных изоляторах. Интенсивность регистрируемых сигналов позволяет судить о величине ЧР и выявлять дефектные ВИ. Для каждого объекта испытаний (ВИ) строятся АФХ интенсивностей ЧР, полученных с помощью диагностических устройств системы мониторинга. Отдельно

усредненные параметры характеристик ЧР для испытываемых ВИ заносятся в таблицу: фазовый интервал начала и окончания генерации ЧР, интенсивность ЧР, количество ЧР, фазовый интервал максимальных ЧР, интенсивность превышающих среднее значение за период максимальных ЧР, количество превышающих среднее значение за период максимальных ЧР [A11], [A22]. Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих характеристик: амплитуд и количества импульсов в каждом фазовом интервале и распределения количества импульсов по амплитудам. Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для бездефектного ВИ того же типа [A18].

Использование микрофонных решеток в системе мониторинга ВИ позволило верифицировать электрооптический метод регистрации локальных перенапряженностей в месте возникновения дефекта и соответствующей ему активности ЧР.

Среди сложных высоковольтных электроэнергетических устройств, требующих диагностирования в процессе эксплуатации, высоковольтные изоляторы занимают особое место. Многочисленные ВИ на линиях электропередач или электрических подстанций подвержены комплексному воздействию сильных электрических полей, градиентов оптических и тепловых полей, электродинамических и механических воздействий. Все это создает условия для возникновения дефектов, что неизбежно приводит к разнообразным отказам и даже авариям в сложных электроэнергетических системах [A11].

В связи с этим разработана система мониторинга высоковольтных ВИ открытых электрических подстанций с учетом возможности измерения МЧР с $q \leq 4-6$ нКл. Система основана на построении акустического отклика излучаемым дефектом ВИ акустических колебаний. Выполненные первоначальные лабораторные испытания разработанной системы мониторинга показали реальную возможность ее использования для мониторинга состояния ВИ, находящихся в режиме эксплуатации.

Разница во времени прибытия для каждой пары приемников по результатам кросс-корреляции сигналов для каждой пары приемников микрофонной решетки позволяет восстанавливать координаты источника акустического излучения – локализовать место дефекта на обследуемых высоковольтных изоляторах. Интенсивность регистрируемых сигналов позволяет судить о величине ЧР и выявлять дефектные ВИ [A11]. Дальнейшее обследование выявленного ВИ производится ранее разработанным способом и бесконтактным диагностическим комплексом, описанным в Главе 2.

5.3. Испытательный стенд для изучения электрофизических процессов и разработки диагностических параметров для мониторинга

В рамках диссертационного исследования нами разработан и создан стенд, позволяющий в лабораторных и приближенным к реальным условиям выполнять изучение электрофизических процессов в различных диэлектрических материалах и изделиях под воздействием сильных переменных электрических полей, включающий контактный, электромагнитный, акустический, электрооптический и тепловизионный датчики. Стенд разработан с учетом рекомендаций ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2010) и собственных наработок. Одновременное использование сразу нескольких датчиков позволило повысить точность локализации ЧР в изоляторе и установить набор диагностических параметров для каждого вида ВИ. На стенде было выполнено изучение особенностей дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель». В результате, построена схема электрофизических процессов, сопровождающих излучение ЧР, и установлены причины их возникновения. Стенд используется для настройки и градуировки БДУ, микрофонных решеток на получение объективной информации о регистрируемых с их помощью дефектах [A15]. Это необходимо для определения работоспособности и наладки внедряемых в производственный процесс разрабатываемых систем мониторинга и диагностики технического состояния

высоковольтного диэлектрического электрооборудования. Он также может найти применение для отбора диагностических параметров для новых видов ВИ.

Испытательный стенд (рис. 5.11) состоит из следующих основных элементов [A17]:

- регулируемого источника высокого напряжения АИД-70М [228] (поз. 1), имеющего достаточно низкий уровень фонового шума с тем, чтобы иметь возможность измерять нормированную амплитуду частичного разряда при нормированном испытательном напряжении;

- испытуемого объекта (поз. 2);

- системы высоковольтных соединений, имеющих достаточно низкий уровень фонового шума с тем, чтобы использовать частичные разряды соответствующего значения кажущегося заряда при нормированном испытательном напряжении;

- измерительной системы, состоящей из контактного датчика (поз. 3) и бесконтактных (электромагнитного (поз. 4), акустического (поз. 5)), электрооптического (6) (поз. 3) измерительных датчиков, датчика фазы напряжения (поз. 7), цифрового осциллографа (поз. 8) и АЦП с ПК (поз. 9).

Стенд снабжен блокировкой, автоматикой защиты и другими необходимыми приборами.

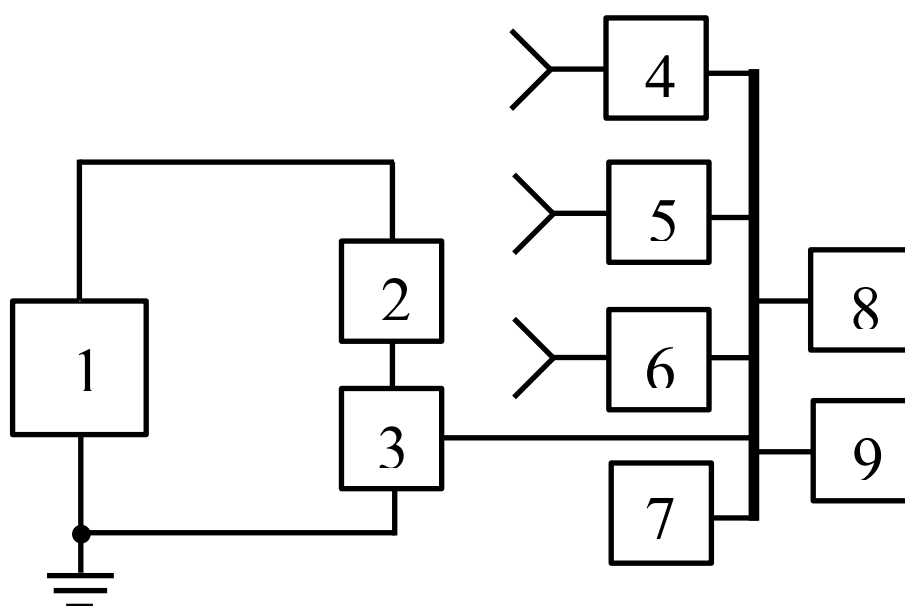


Рис. 5.11. Схема испытательного стенда

5.4. Результаты дистанционного контроля параметров ЧР высоковольтных изоляторов на подстанции

В опорных и подвесных ВИ в ходе длительной эксплуатации за счет старения фарфора, влияния градиентов температуры, осадков, грозových разрядов или перенапряжения, возможно возникновение первичных повреждений (дефектов), их дальнейшее разрастание, что может в конечном итоге приводить к разрушению. К основным дефектам относятся поверхностные трещины и нарушения плотного контакта между электродами и диэлектрическим стержнем. Особенностью опорных ВИ является то обстоятельство, что они одновременно испытывают как электрическую, так и механическую нагрузку. Более того, контакты между стержнем и фланцами могут испытывать дополнительные механические напряжения вследствие градиентов температур между диэлектриком и металлом. До настоящего времени не разработаны какие-либо стандартизованные методы и соответствующие им устройства для контроля и диагностики технического состояния ВИ дистанционным способом без отключения рабочего напряжения, поскольку даже новые ГОСТы и стандарты касаются только стендовых испытаний с регулируемым источником высокого напряжения. В наибольшей степени это обстоятельство относится к более старым высоковольтным системам, имеющим в своем составе ФВИ со сроком работы более 20-30 лет [А14].

В данном разделе речь идет о первом применении разработанного метода и комплексного устройства для дистанционного контроля технического состояния ФВИ, находящихся под рабочим напряжением, являющегося основой для системы мониторинга высоковольтных изоляторов.

Всего было обследовано 38 ФВИ типа 110/400 на подстанциях «Западная» и «Водозабор» (рис.5.10). Особенностью этих подстанций является значительный разброс времени ввода ФВИ от 1974 до 2012 годов, отсутствие каких-либо документированных данных об их состоянии на данный момент. Кроме того, ФВИ на подстанциях расположены на расстояниях не более 5 метров друг от друга, что

затрудняло какой-либо подход к ним ближе 5 метров. Номинальное напряжение составляло 110 кВ [А14].



Рис. 5.12. Общий вид подстанции «Западная» Казанских электрических сетей ОАО «Сетевая компания»

Измерения набора характеристик ЧР от каждого ВИ выполнялись двумя выносными антеннами с усилителями электромагнитных (частота 540 МГц) и акустических (40 кГц) импульсных сигналов ЧР. Расстояние датчиков до ФВИ составляло порядка 6 метров. Использование узконаправленных антенн в составе метода, описанного в пп.5.1–5.3, позволяло отличать сигналы ЧР от конкретных изоляторов. Фазовое рассогласование сигналов ЧР за счет различия скоростей распространения акустических и электромагнитных волн устранялось путем точного определения расстояний с помощью разработанного метода. В дальнейшем изложении материала все результаты измерений характеристик ЧР обоими датчиками приводятся в скорректированном виде с учетом расстояний между дефектами и датчиками. Однако в отличие от контактного стендового метода [4], в котором используется измерение таких характеристик ЧР, как

интенсивность, частота повторения и момент возникновения ЧР, измерения этих параметров дистанционным методом приводит к значительным погрешностям, зависящим от затухания сигналов, влияния климатических и внешних акустических и электромагнитных помех [А14].

Поэтому нами в соответствии с результатами предварительного изучения эффектов ЧР, было установлено, что наибольшей диагностической информативностью при дистанционном контроле являются по степени значимости такие параметры как: изменение фазовых интервалов генерации ЧР ($\Delta\varphi$), соответствующие наиболее мощным ЧР; их интенсивность ($q_{\text{мощ}}$) и частота повторения ($N_{\text{мощ}}$); распределение количества ЧР по интенсивности в сравнении с бездефектными и полностью работоспособными изоляторами [А14].

Предварительно по общему техническому состоянию каждой из подстанций и визуальному осмотру ФВИ не было обнаружено неработоспособных изоляторов, требующих немедленной замены. С учетом ранее выполненного изучения основных дефектов в ФВИ и их влияния на характеристики ЧР, наше обследование позволило разделить их на 3 группы по степени дефектности, а, следовательно, и работоспособности. К первой группе относятся полностью работоспособные ФВИ с минимальной интенсивностью ($q < 200$ пКл) и количеством ($N < 500$) ЧР, расположенных в фазовых интервалах вблизи 90° и 270° . Ко второй группе – условно работоспособные и не требующие замены ФВИ, содержащие ЧР с $q \leq 300$ пКл, $N \leq 1000$ и $\Delta\varphi$ в интервалах 50° - 80° и 220° - 250° . В третьей группе – ФВИ, сохраняющие работоспособность только в ограниченный интервал времени и требующие особого внимания и даже замены при ближайших регламентных обследованиях. Они отличаются резким по сравнению с первыми двумя группами увеличением интенсивности мощных ЧР выше 1,5 нКл, количеством в 2-5 раз и сдвигом $\Delta\varphi$ интервалов к началу фазовых периодов [А14].

Установлено, что по параметрам ЧР большинство обследованных изоляторов относятся к первой (8) и второй (25) группам и только пять ФВИ к третьей группе. В целом нужно констатировать, что предложенный набор характеристик ЧР

позволяет достаточно точно разделять работоспособные (1 и 2 группы) от ограниченно работоспособных изоляторов (3 группа), поскольку, если параметры ЧР первых двух групп различаются на 50-80%, то различие их от третьей группы превышало по интенсивности мощных ЧР в 3-5 раз [A14].

Резкая фазовая асимметричность ряда характеристик ЧР, так же, как и значительно большая интенсивность в третьей группе, позволила связать некоторые мощные ЧР с дефектами между стержнем и оконцевателем [A14].

В результате выполненного обследования ФВИ были разделены на работоспособные и неработоспособные по предложенному набору характеристик ЧР в соответствии с указанием руководства. Не менее важным явилась возможность определения мест расположения и вида ЧР.

Примеры параметров характеристик ЧР для трех групп представлены на рис. 5.13 – 5.14. Было установлено значительное различие в распределении количества ЧР по их интенсивностям. В малодефектных ФВИ большинство ЧР относятся к узкому интервалу интенсивности и этот интервал значительно возрастает с ростом дефектности изоляторов [A14].

Было установлено, что параметры ЧР, ранее неизвестные и определенные в ходе исследований, необходимо учитывать при мониторинге.

Поскольку ЧР в основном возникают в следствие процессов ионизации воздушного зазора, то их появление определяется размерами трещины. Равномерное распределение количества и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения поверхности зазора в приложенном поле, что вполне удовлетворяет характеристикам ЧР для двух первых групп ФВИ. Небольшая интенсивность ЧР вполне соответствует малым размерам трещин, которые незначительно влияют на электрофизическое состояние ФВИ. Причем параметры характеристик ЧР незначительно отличаются для дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель» (рис. 5.13) [A20]. С увеличением дефектов и, следовательно, интенсивности ЧР (рис. 5.14) несколько смещается амплитудный интервал (рис. 5.14, в) генерации ЧР, а их фазовые интервалы генерации ЧР сдвигаются в сторону меньших фазовых углов.

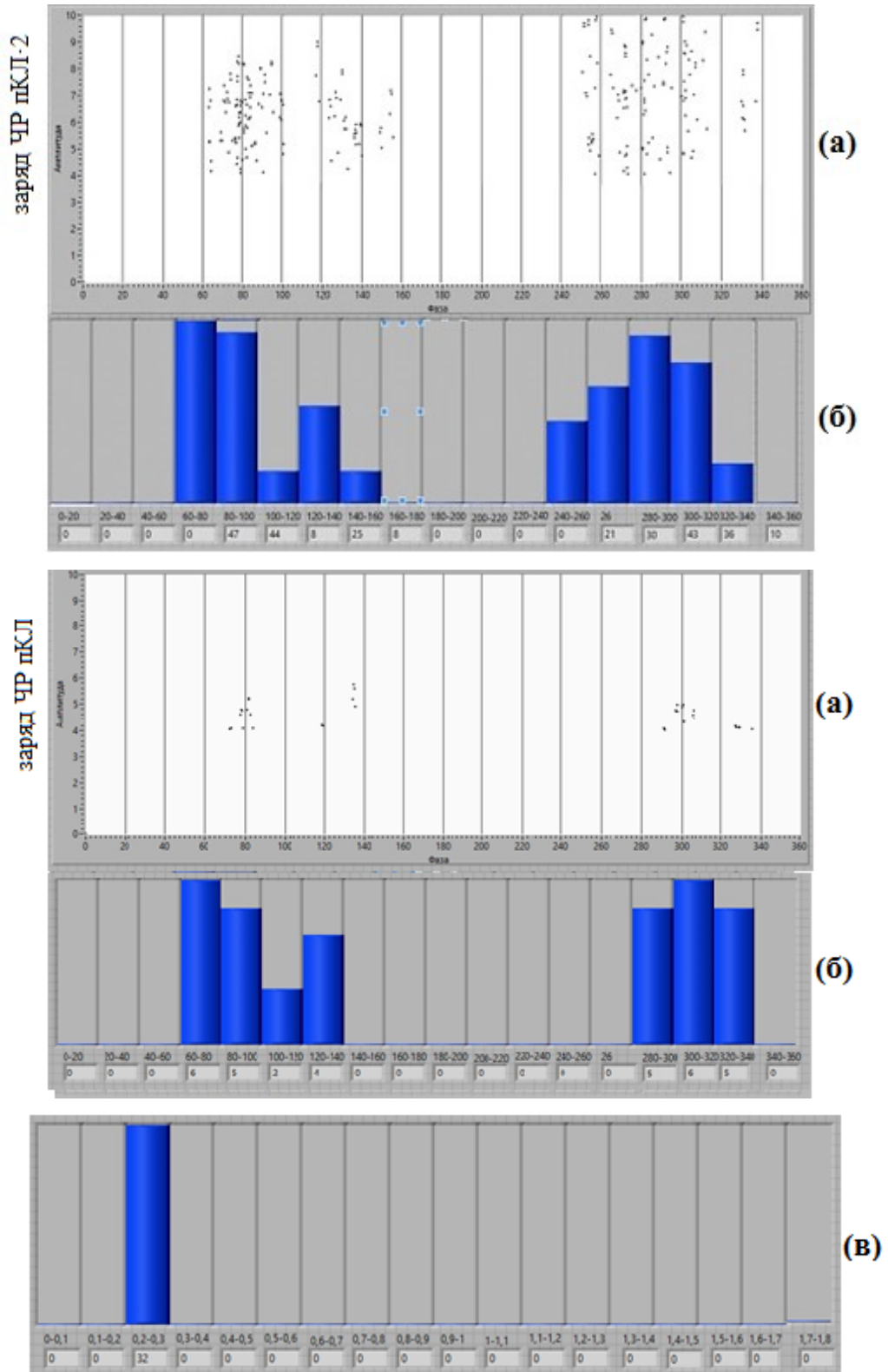


Рис. 5.13. Характеристики ЧР для работоспособного, бездефектного изолятора №1 (группа 1): *а* и *б* – амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (*а*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* – распределение количества (*N*) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности

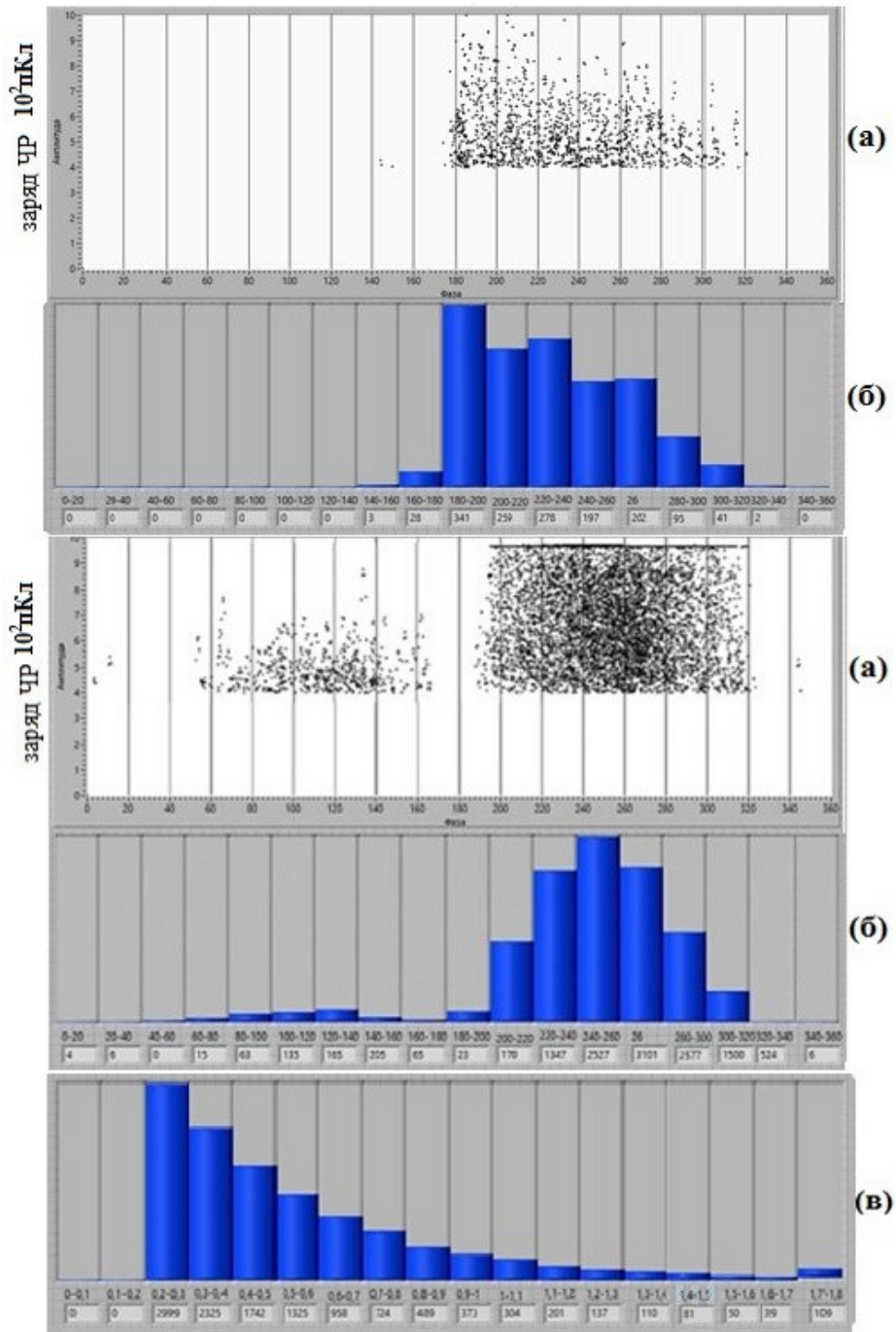


Рис. 5.14. Характеристики ЧР для неработоспособного, дефектного изолятора №7 (группа 3): амплитудно-фазовые характеристики и зависимость количества ЧР от фазового угла, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; в - распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности (менее дефектный по сравнению с рис. 4.5)

Начинает нарушаться равномерное распределение количества ЧР по положительному и отрицательному полупериодам приложенного напряжения. Наиболее новым и существенным фактом было обнаружение при интенсивности ЧР, приближающейся к 3 нКл, различия между параметрами МЧР, измеренное электромагнитным и акустическим датчиками: если вторые, как и ранее (рис. 5.13-5.14), продолжали возрастать, то интенсивность и количество МЧР, измеренное электромагнитным датчиком стало уменьшаться, особенно для положительного полупериода (рис. 5.14).

При дальнейшем возрастании дефекта сигналы МЧР наблюдались электромагнитным датчиком в фазовом интервале максимальных интенсивностей МЧР при значительном превышении индуцированного поля в области дефекта над приложенным полем, что соответствует модели индуцированных полей, рассмотренной в Главе 4 и представленной на рис. 4.5 для образца с наибольшим дефектом.

Анализ таких аномальных характеристик МЧР показал, что их особенности связаны с распространенным поведением стримеров в области дефектов, описанными выше (Глава 1).

Как уже было рассмотрено, с ростом полости дефекта изменяется процесс распространения стримера (в частности длина стримера). При относительно малых дефектах длина стримера укладывается в пределах воздушной полости дефекта (рис. 1.2). В этом случае условия генерации электромагнитного и акустического импульсов ЧР определяются длиной полости. Однако с ростом дефекта возрастает вторая часть стримера – распространение индуцированных зарядов вдоль диэлектрической поверхности. Если при распространении вдоль полости ширина стримера составляет 2-3 нм, то при распространении вдоль плоскости возрастает до 20-30 нм. Амплитуда электромагнитного импульса уменьшается во столько же раз. Одновременно во втором случае изменяется характер генерации акустических импульсов. Они генерируются передним фронтом стримера при его распространении вдоль диэлектрической поверхности дефекта.

Таким образом, можно полагать, что при рассмотрении влияния МЧР на техническое состояние и прогностические оценки остаточного ресурса при мониторинге следует особое внимание обращать на измерения характеристик, полученных с помощью акустических датчиков. Именно это обстоятельство послужило главной причиной для разработки системы акустического мониторинга, описанной в данной главе.

5.5. Методические аспекты выполнения мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов

Как уже отмечалось неоднократно выше в диссертации режим мониторинговой диагностики значительно отличается от однократных измерений диагностических параметров, в качестве которых также используются характеристики частичных разрядов. На основе выполненных измерений параметров ЧР контактными и бесконтактными способами с использованием электромагнитного и акустического датчиков, а также электрооптического способа измерения напряженности электрических полей, были установлены необходимые наборы диагностических параметров характеристик ЧР и ряда других электрофизических параметров [А20]. Причем обоснование использования их для оценки ЧР было дано в последнем ГОСТ и международном стандарте [3], [4]. Справедливость подобного подхода основана на том обстоятельстве, что большинство отказов высоковольтного оборудования вызвано дефектами, параметры которых наиболее точно регистрируются с помощью характеристик ЧР [А19].

На временном интервале эксплуатации ВИ мониторинг на наш взгляд логично разделить на три этапа. На первом следует выполнить измерения диагностических параметров информационного типа, которые необходимы при постановке ВИ в эксплуатацию и дополнения характеристик ЧР от завода-изготовителя. В соответствии с ГОСТ [3], [4] необходимо выполнить измерение интенсивности и количества ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения

контактным способом с использованием регулируемого источника напряжения (разработанного стенда). Определение вида и места первоначальных дефектов с не детектируемым уровнем ЧР следует выполнять с помощью электрооптического датчика. Применение электрооптического датчика позволяет точнее их определять, поскольку это наиболее прямой способ, измерять напряженность электрического поля в области дефекта и устанавливать их предельные значения для безопасной эксплуатации ВИ. На первом этапе необходимо получить диагностические параметры информационного типа для конкретного типа изолятора, если они не были ранее получены от завода-изготовителя или после планово-профилактического ремонта [A19]. Наиболее сложным на первом этапе является получение нормированных значений такого набора характеристик ЧР, который позволил бы определять техническое состояние ВИ в изменяющихся эксплуатационных условиях. Наши предварительные исследования ВИ из полимерного и керамического (фарфор) материалов с рабочим напряжением до 110 кВ позволили сделать заключение, что для оценки их технического состояния возможно использование одного набора диагностических параметров ЧР, но с различными нормированными значениями. Однако при измерении параметров характеристик мощных ЧР в ВИ на 110 кВ и выше нужно учитывать, что параметры МЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, начинают различаться пропорционально значениям кажущегося заряда в них выше 3 - 4 нКл [A20].

Второй этап мониторинга обеспечивает многократные измерения разработанного на первом этапе набора диагностических параметров ЧР, позволяя проводить их сравнение с нормированными значениями, в том числе определение вида и места расположения и степени опасности новых возникших в ходе эксплуатации дефектов. Одной из главных сложностей диагностического контроля ВИ является их многочисленность на ЛЭП и кучность расположения на подстанциях. Эти обстоятельства ограничивают общий объем информации о параметрах ЧР от диагностируемого объекта, поскольку от состояния каждого ВИ зависит работоспособность всей ПС или ЛЭП. Поэтому количество

диагностических параметров, измеряемых при мониторинге, вначале следует свести к минимуму. Так в нашем случае при измерении параметров ВИ до 110 кВ в качестве главного критического диагностического параметра следует выделить ВИ, имеющие определенное относительное количество ЧР с кажущимся зарядом выше 1,8-2 нКл (более 10% от общего количества ЧР за период разового диагностирования). Затем другие параметры ЧР в этих ВИ должны подвергнуться разбору с выделением ЧР, имеющих интенсивность выше 3,5-4 нКл, поскольку именно такие ЧР могут создавать дополнительную деградацию полимеров в области дефектов и способствовать их дальнейшему развитию. Конечно, в этом процессе следует также учитывать относительное количество ВИ, содержащих МЧР. Поскольку определение таких диагностических параметров, как количество и интенсивность ЧР не обладает высокой точностью, то следует использовать в этих случаях дополнительные параметры – различное распределение числа ЧР по интенсивности для положительного и отрицательного полупериодов высокого напряжения и расширение фазовых интервалов излучения ЧР. Наличие ЧР при нулевых фазах приложенного напряжения, определение вида, места расположения и их изменения при многократном диагностировании позволяет устанавливать периодичность регистрации диагностических параметров [А20].

На третьем этапе с использованием стендового (и дистанционного) способов определяется рабочее состояние снятых с эксплуатации ВИ, позволяющее разрабатывать рекомендации по улучшению работоспособности ВИ использованного вида.

Процесс мониторинга технического состояния ВИ уже в настоящее время возможно осуществлять посредством автоматизированного измерения основной части текущих диагностических параметров под рабочим напряжением современными техническими средствами с помощью современных компьютерных программ. Однако пока не полностью решенной является задача установления реального остаточного ресурса, поскольку он во многом определяется совокупностью физических процессов, определяющих старение не только полимерных и керамических материалов, но и конструкции всего ВИ в целом. В

отсутствии серьезных научных исследований в этом направлении, эмпирическому решению этой задачи может помочь выполнение диагностического контроля и анализа ВИ после окончания его эксплуатации, что составляет третий заключительный этап мониторинга [A19].

5.6. Методика периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов

Измерительная система (измерительный комплекс) для реализации комплексного метода обнаружения и регистрации вида, места расположения и роста наиболее опасных дефектов предназначена для контактного и дистанционного измерения набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками и повышенных напряженностей электрического поля, локально расположенных на поверхностях ВИ.

Калибровка и градуировка измерительного комплекса проводится в соответствии с ГОСТ Р55191-2012 с целью проверки ее функционирования и установления зависимости амплитуд регистрируемых сигналов от значения кажущегося заряда имитируемых ЧР и определения чувствительности каждого канала регистрации ЧР подачей импульсов от генератора сигналов произвольной формы (AG4151). Калибровка дистанционного измерения набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками производится с помощью имитатора частичных разрядов, представляющий собой два игольчатых электрода с известными радиусами скругления и регулируемым зазором между ними. При градуировке определяется градуировочный коэффициент. Значение кажущегося заряда каждого частичного разряда определяется по осциллограмме с помощью цифрового осциллографа (DSO3062A) в соответствии с градуировкой. Электрооптический датчик градуируют в калиброванном переменном электрическом поле.

Чувствительность измерительной системы (минимальный регистрируемый кажущийся заряд) определяется при установленном усилении измерительного прибора в соответствии с градуировкой по ГОСТ Р55191-2012.

Проверка функционирования измерительной системы комплексного метода производится одновременно с процедурой градуировки и заключается в сопоставлении форм сигналов на входе электромагнитного, акустического, электрооптического, контактного и др. датчиков и импульсов колебательной формы с частотой их повторения, равной установленной частоте сигналов градуировочного устройства.

Уровень и вид помех определяются на отключенном ВИ и после включения его под рабочее напряжение. Регистрация уровня и определение вида помех производятся с помощью цифрового осциллографа в составе измерительного комплекса. Амплитуда сигналов помех определяется в кулонах.

Определение уровня и вида помех необходимо проводить в режиме мониторинга и в кратковременном режиме комплексных испытаний каждый раз при отключении ВИ от сети и в тех случаях, когда в ВИ зарегистрированы ЧР, значения которых превышают на один и более порядок нормированные значения, особенно при существенном изменении условий измерений (климатические условия, температура контролируемого объекта и др.).

Общие требования к условиям проведения испытаний соответствуют ГОСТ Р55191-2012, СТО 34.01-1.3-018-2020, СТО 34.01-2.2-014-2020.

Методики периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов (интенсивность, количество, фазовые сдвиги, полный кажущийся заряд МЧР) и напряженностей электрических полей путем сопоставления их с параметрами наиболее опасных при эксплуатации дефектов сводятся к выполнению последовательности следующих шагов.

1. Проверить функционирование измерительной системы комплексного метода.
2. Провести калибровку и градуировку измерительного комплекса.

3. Определить фактические условия выполнения измерений, влияющих факторов – влажность, температура, атмосферное давление, уровень помех.

4. Для образцов ВИ с помощью контактного способа, рекомендованного ГОСТ Р55191-2012, в стендовом варианте определить предельные значения параметров характеристик мощных частичных разрядов, не создающие пробоя дефектов изоляторов: интенсивность, количество, фазовые сдвиги, полный кажущийся заряд МЧР. В соответствии с ГОСТ [3], [4] необходимо выполнить измерение интенсивности и количества ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения с использованием регулируемого источника напряжения на стенде. Значения диагностических параметров ЧР – интенсивность, количество, фазовые сдвиги, полный кажущийся заряд МЧР нормируются для каждого типа изолятора. Импульсные сигналы частичных разрядов синхронизируются с фазой высокого напряжения, накапливаются в течение не менее 18 с., распределяются по интенсивности, количеству и фазовым углам для оценки состояния ВИ на момент измерения. Обработанный набор параметров для групп обследованных ВИ нормализуется для каждого типа изоляторов и сохраняется в базе данных.

5. Для образцов ВИ с помощью электрооптического метода в стендовом варианте измерить распределение напряженности электрического поля, не создающие пробоя дефектов изоляторов, с целью определения места первоначальных дефектов с не детектируемым уровнем ЧР. Измерение напряженности электрического поля в области дефекта необходимо для установления их предельных значений для безопасной эксплуатации ВИ.

6. Для образцов ВИ с помощью микрофонной решетки в стендовом варианте определить места расположения дефектов изоляторов с целью верификации результатов электрооптического метода.

7. Выбрать место установки электромагнитного и акустического датчиков на заранее известном расстоянии вблизи обследуемого ВИ с условием соблюдения техники безопасности при высоковольтных измерениях, диаграмм направленности и угла зрения. В случае проведения диагностики ВИ на подстанциях и линиях электропередачи направление измерительных антенн должно выбираться из

условия оптимального разрешения регистрируемых импульсов ЧР от отдельного ВИ, избегая кучно расположенных ВИ, либо с учетом диаграммы направленности и угла зрения выбрать расстояние для попадания в угол зрения антенны только одного обследуемого ВИ.

8. Для образцов ВИ с помощью дистанционного способа с использованием электромагнитного и акустического датчиков определяются значения параметров характеристик мощных частичных разрядов: интенсивность, количество, фазовые сдвиги, полный кажущийся заряд МЧР. При измерении параметров характеристик мощных ЧР в ВИ от 110 кВ и выше нужно учитывать различия измеренных электромагнитным и акустическим датчиками параметров МЧР выше 3 - 4 нКл. Импульсные сигналы частичных разрядов синхронизируются с фазой высокого напряжения, накапливаются в течение не менее 18 с., распределяются по интенсивности, количеству и фазовым углам для оценки состояния ВИ на момент измерения для каждого датчика в отдельности. Обработанный набор параметров для групп обследованных ВИ нормализуется для каждого типа изоляторов и сохраняется в базе данных для каждого датчика в отдельности.

9. В режиме мониторинга с использованием измерительной системы комплексного метода проводятся многократные измерения набора диагностических параметров ЧР: интенсивность, количество, фазовые сдвиги, полный кажущийся заряд МЧР, место расположения дефекта. Степень опасности новых возникших в ходе эксплуатации дефектов определяется путем сравнения результатов мониторинга ВИ с нормированными для этого типа изолятора значениями диагностических параметров.

10. В режиме мониторинга для образцов ВИ с помощью микрофонной решетки, установленной вблизи обследуемых ВИ, определить места расположения дефектов изоляторов.

11. В процессе мониторинга выделить ВИ, имеющие определенное относительное количество ЧР с кажущимся зарядом выше 1,8-2 нКл (более 10% от общего количества ЧР за период разового диагностирования). Выделить ВИ, имеющих интенсивность МЧР выше 3,5-4 нКл, поскольку именно такие ЧР могут

создавать дополнительную деградацию полимеров в области дефектов и способствовать их дальнейшему развитию. Наличие ЧР при нулевых фазах приложенного напряжения, изменение места расположения дефекта при многократном диагностировании позволяет устанавливать периодичность регистрации диагностических параметров.

12. Сравнить результаты текущего измерения значений диагностических параметров со значениями тех же параметров, полученными при предыдущих дистанционных измерениях.

13. Для каждого типа ВИ выделить изменение фазовых интервалов генерации ЧР ($\Delta\phi$), соответствующие МЧР; интенсивность и количество МЧР за фазовый интервал; распределение количества ЧР по интенсивности.

14. Сравнить выделенные параметры с бездефектными и полностью работоспособными изоляторами.

15. В зависимости от скорости изменения фазовых интервалов генерации ЧР, увеличения интенсивности и количества МЧР за фазовый интервал делается вывод об остаточном ресурсе (сроке службы) изоляторов, а также о периодичности дальнейших дистанционных измерений.

16. Для снятых с эксплуатации ВИ с помощью контактного способа, рекомендованного ГОСТ Р55191-2012, в стендовом варианте определить предельные значения параметров характеристик мощных частичных разрядов: интенсивность, количество, фазовые сдвиги, полный кажущийся заряд МЧР. Импульсные сигналы частичных разрядов синхронизируются с фазой высокого напряжения, накапливаются в течение не менее 18 с., распределяются по интенсивности, количеству и фазовым углам для оценки рабочего состояния ВИ и разработки рекомендаций по улучшению работоспособности ВИ. Обработанный набор измеренных параметров для обследованных ВИ нормализуется для каждого изолятора и сохраняется в базе данных.

17. При каждом диагностировании следует оформлять протокол обследования ВИ путем занесения исходных данных условий испытаний, режима работы ВИ и др. в программный комплекс измерительной системы.

При проведении обследования технического состояния ВИ в процессе эксплуатации с использованием разработанной методики периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов п. 4, 5, 6 пропускаются.

5.7. Возможности автоматизации процесса мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов на подстанциях с использованием новой компьютерной программы записи и обработки сигналов с датчиков

Использование элементов искусственного интеллекта позволяет сократить количество измеряемых диагностических параметров и повысить точность определения технического состояния ВИ, что особенно важно при диагностировании высоковольтных подстанций.

Разработанные метод и устройство были испытаны на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания» на полимерных и фарфоровых изоляторах, предназначенных для использования в интервале напряжений 35-110 кВ. Основой устройства является измерительно-вычислительный блок, состоящий из трех датчиков (рис. 5.3, 5.11) и программного обеспечения [А23].

В этом случае процесс каждой регистрации диагностических параметров, приведенных в Главе 5, так же начинается с измерения наиболее важных ДП – интенсивности, количества, фазового распределения ЧР одновременно электромагнитным и акустическим датчиками. При соответствии указанных характеристик друг другу измерительная система оставляет в дальнейшем только один датчик с учетом внешних воздействий. Так для измерений характеристик ЧР на подстанциях была установлена целесообразность использования только акустических детекторов, что связано с изменением электрических и акустических процессов в полости МЧР.

Примеры соответствия характеристик ЧР, измеренных обоими датчиками, с переходом от распространения импульсов ЧР в полости к распространению на поверхности дефекта приведены на графиках рис. 3.6, 5.13. Как следует из

графиков этих рисунков, область ЧР охватывает только размер дефектов вдоль распространения стримера, а поле внутри дефектов образовано в основном приложенным напряжением. Временные изменения параметров ЧР крайне малы, а процессы старения медленны. Поэтому на следующем этапе диагностирования измерительный комплекс выделяет только ВИ с параметрами ЧР, превышающими нормативные значения, указанные в нашем патенте №2679759 (2018 г.). Особое внимание при этом было обращено на возникновение мощных ЧР в отрицательных полупериодах приложенного напряжения сети. Для ВИ ИОС 110/400 к МЧР относятся ЧР с интенсивностью выше 2 нКл и расположенные в основном в отрицательных полупериодах приложенного напряжения (рис. 5.14). Причем при возрастании интенсивности выше 3 нКл, параметры характеристик ЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, начинают различаться пропорционально росту размеров дефектов (рис. 4.5). В интервале возрастания интенсивностей ЧР от 3 до 5-6 нКл наблюдается их ускоренный временной рост, что записывается измерительным комплексом и свидетельствует об ускоренном росте дефектов и сокращении остаточного ресурса ВИ. Измерительный комплекс на основе полученных данных должен сокращать интервал между последующими регистрациями параметров характеристик ЧР. Параметры ЧР, приведенные на рис. 4.5, 5.14, свидетельствуют о превышении интенсивности свыше 5 нКл, соответствии количества МЧР критическим значениям, и, следовательно, дефектности данных ВИ и необходимости их замены на работоспособные.

Если интенсивность и количество МЧР превышает нормативные параметры, то измерительный комплекс подает оператору сигнал и наличии возможного большого дефекта и необходимости выполнения дополнительных измерений характеристик ЧР данных ВИ. К таким дополнительным измерениям относятся данные от обоих датчиков – электромагнитного и акустического, изучение напряженности электрического поля внутри полости дефекта электрооптическим датчиком (рис. 4.2).

При единичной инспекции рабочего состояния на действующем объекте высоковольтной линии электропередачи или подстанции в условиях

невозможности их отключения и отсутствия предварительных измерений параметров ЧР текущее измерение количества и интенсивности ЧР выполняются обоими датчиками с использованием общих выражений для оценки их чувствительности, приведенной в Главе 1, что сопряжено с большими погрешностями для дистанционного способа. Поэтому в подобном случае главными диагностическими параметрами становятся фазовые измерения характеристик ЧР, измеренные обоими датчиками. Примеры таких характеристик приведены на рис. 4.5, 5.13, 5.14. К таким параметрам относятся фазовые интервалы генерации МЧР, отношение количества МЧР к общему количеству ЧР за конкретный период измерений, соотношение количества МЧР и общего количества ЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, возникновение вторых по отношению к первому.

Предварительное решение о возможности дальнейшей эксплуатации ВИ принимается измерительным устройством, которое поступает оператору для выбора окончательного решения о замене неисправного ВИ или продолжении его использования.

Общей структурой мониторинга является цикличность измерений характеристик ЧР. Каждый цикл включает в себя начальные измерения всего набора параметров ЧР и их регистрацию, а затем измерительный комплекс в соответствии с заложенной в него программой определяет наиболее критические для конкретных ВИ параметры ЧР и уведомляет о них оператора.

Выводы к главе 5

1. Разработана общая концепция системы мониторинга высоковольтных опорных и подвесных изоляторов путем одновременного измерения характеристик ЧР акустическими, электромагнитными и электрооптическими датчиками в процессе эксплуатации.

2. Разработан способ более точного измерения местоположения дефектных изоляторов путем сравнительной оценки времени распространения и расстояний между источниками акустического излучения от возникающих ЧР.

3. С помощью разработанного комплексного метода и устройства выполнено первоначальное стендовое обследование ВИ типа ЛК 70/35 и полевое обследование ИОС 110/400 на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания». Установлены временные закономерности изменения параметров ЧР для полимерных и фарфоровых изоляторов.

4. Установлены определенные закономерности и ограничения при одновременном применении электромагнитных, акустических и электрооптических датчиков при регистрации МЧР.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность представленных результатов диссертационного исследования можно квалифицировать как решение важной научно-технической проблемы повышения надежности энергетического оборудования (подстанций и линий электропередачи) и уменьшения потерь электроэнергии путем разработки комплексного метода дистанционного диагностирования ВИ в процессе эксплуатации, создающего повышение достоверности в оценке технического состояния и прогнозирования эксплуатационного ресурса ВИ.

В качестве наиболее весомых результатов диссертационного исследования можно выделить следующие.

1. Разработан, реализован и испытан аппаратно-программный комплекс для совместного детектирования измерительных сигналов от электромагнитного, акустического, электрооптического датчиков с целью дистанционного периодического контроля технического состояния находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов подстанций и ЛЭП в автоматизированном дистанционном режиме на основе измерения характеристик ЧР с выдачей необходимой информации о техническом состоянии ВИ. Аппаратно-программный комплекс используется в составе разработанной и испытанной системы мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов, дистанционного обнаружения и диагностирования дефектов под рабочим напряжением.

2. На основе выполненных экспериментов и натурных испытаний установлен набор диагностических параметров на основе измеренных характеристик ЧР, позволяющий определять вид и место дефекта и определять техническое состояние ВИ. В качестве диагностических параметров предложено использовать интенсивность, количество, сдвиги фазовых углов появления МЧР, а также полный заряд мощных ЧР, измеренных одновременно акустическим и электромагнитным датчиками, форма и ширина одиночных импульсов МЧР, так как они создают возможность определять техническое состояние ВИ в условиях эксплуатации.

3. Разработана методика периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов и напряженностей электрических полей, повышающая информативность и достоверность оценки технического состояния высоковольтных изоляторов, путем сопоставления их с параметрами наиболее опасных при эксплуатации дефектов. Проведена апробация разработанной методики на реальных высоковольтных изоляторах с подтвержденными дефектами.

4. Разработан способ оценки влияния наиболее опасных дефектов на техническое состояние ВИ, их вида и места расположения по особенностям набора характеристик мощных ЧР с помощью измерительного комплекса.

5. Разработана физическая модель особенностей появления и преобразования мощных ЧР на основе перераспределения приложенного и индуцированного электрических полей, позволяющая определять характер дальнейшего развития наиболее опасных дефектов и тем самым моделировать остаточный ресурс ВИ.

6. Разработан испытательный стенд, позволяющий в лабораторных и полевых условиях выполнять изучение электрофизических процессов в ВИ из различных диэлектрических материалов под воздействием изменяемых высоких напряжений, включающий электромагнитный, акустический и электрооптический датчики. На разработанном стенде было выполнено изучение особенностей дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель» полимерных и фарфоровых ВИ. В результате построена схема электрофизических процессов, сопровождающих возникновение ЧР от указанных дефектов, и установлены причины их возникновения.

7. Сформулированы положения о возможности и целесообразности практической реализации разработанного метода дистанционного мониторинга технического состояния высоковольтных диэлектрических элементов путем комплексного использования определённого набора характеристик частичных разрядов в качестве диагностических параметров, измеряемых несколькими физическими методами. Реализация метода предполагает два варианта. Первый – стационарный для подстанций и ЛЭП с рабочим напряжением от 35 кВ с

размещением не менее двух измерительных датчиков измерительного комплекса для мониторинга каждого диэлектрического элемента. Второй – мобильный для периодической диагностики энергетических систем различного класса напряжения посредством передвижного устройства с одним датчиком, акустическим или электромагнитным, в составе аппаратно-программного комплекса.

8. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для создания более совершенных методов и приборов неразрушающего контроля других высоковольтных диэлектрических элементов в процессе эксплуатации, программных продуктов и баз данных об остаточном ресурсе парка изоляционного оборудования электросетевых компаний специализированными организациями в области создания диагностического приборостроения и программного обеспечения для электроэнергетики Российской Федерации и зарубежья, НИИ и профильными вузами.

Таким образом, цель и задачи диссертационного исследования можно считать выполненными полностью.

Практическая реализация комплексного метода диагностирования находит применение и может найти дальнейшее развитие при создании и построении цифровых систем непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния высоковольтного изоляционного оборудования подстанций и линий электропередачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований получено решение научной проблемы определения технического состояния ВИ, имеющее важное научное значение и позволяющее выявлять наличие, вид и место расположения наиболее опасных для нормального функционирования ВИ дефектов по установленному набору диагностических параметров ЧР, прогнозировать остаточный ресурс высоковольтных изоляторов.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что разработанная методика мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов на основе детектирования и последующего анализа характеристик мощных частичных разрядов может быть применена для диагностики других конструкционных и технологических элементов высоковольтной энергетики, таких как трансформаторы, переключатели, кабели и пр.

Многолетние исследования разнообразных используемых в ВИ электротехнических изоляционных материалов до настоящего времени не позволили выработать общепринятые и закреплённые в ГОСТ методики по оценке текущего состояния и прогнозирования дальнейшего срока работоспособности высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации при рабочем напряжении. Проведенные нами предварительные исследования, анализ характеристик дефектов в высоковольтных диэлектрических материалах и методов их контроля выявили необходимость в разработке основанных на различных физических принципах новых комплексных методов контроля ВИ. Наиболее предпочтительным для контроля ВИ оказалось измерение с достаточной полнотой отражающих дефектность изолятора набора характеристик ЧР при помощи нескольких физических методов – комплексного использования электромагнитного, акустического методов и определение локальных напряженностей электрических полей. Анализ реального использования различных способов дистанционного контроля технического состояния ВИ путем однократной регистрации ряда диагностических параметров показал, что такими

измерениями возможно определять с определенной и не всегда достоверной точностью текущее техническое состояние ВИ и практически невозможно прогнозировать остаточный ресурс. Поэтому было решено выполнять периодические измерения нового поколения диагностических параметров, разработанных для дистанционного контроля на всех этапах функционирования изоляторов в высоковольтной сети: при постановке ВИ в эксплуатацию, в процессе эксплуатации и для принятия решения о выводе ВИ из эксплуатации.

В отличие от контактного стендового метода испытания изоляции высоким напряжением измерение интенсивности ЧР, частоты их повторения и фазовый момент возникновения за определенный интервал времени при бесконтактном дистанционном методе связано с большими погрешностями, зависящими от расстояния между датчиком и ВИ, влияния климатических и внешних помех. Эксперименты на реальных ВИ показали, что наиболее важными и достоверными характеристиками ЧР при дистанционном контроле технического состояния полимерных ВИ являются изменения фазовых интервалов, соответствующих наиболее мощным ЧР, интенсивности и частоты повторения, по сравнению с бездефектными ВИ того же типа. Повышение точности таких измерений достигается одновременным использованием нескольких методов: акустического и тепловизионного, электромагнитного и акустического, а также дополнительно оптического с накоплением сигналов ЧР и последующей компьютерной обработкой сигналов. Диагностический прогноз дальнейшего срока технического состояния положительных ВИ возможен на оценке изменения фазовых углов начала ЧР, количества и интенсивности самых мощных импульсов ЧР за длительный период (не менее одного часа, а также в течении месяца) воздействия высокого напряжения. Установление длительного (~ 800 часов) периода изменения таких параметров МЧР в дефектных полимерных ВИ, как возрастание интенсивности и количества разрядов, сдвиг начала разрядов к нулевым или 180° значениям фазы переменного напряжения, могут быть использованы в качестве диагностических параметров при прогнозировании остаточного ресурса ВИ.

Разработаны методологические основы мониторинга технического состояния различных видов высоковольтных изоляторов путем выполнения измерений и аналитического сравнения различных наборов характеристик ЧР на разработанных и изготовленных установках, использующих контактный и бесконтактный дистанционный методы на образцах полимерных и фарфоровых изоляторов. Было установлено, что параметры установленного набора характеристик ЧР позволяют получать более обширную информацию о текущем техническом состоянии ВИ, прогнозировании его дальнейшего остаточного срока службы, процессах зарождения и развития дефектов.

Разработан более эффективный по сравнению с ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) и дополняющий их способ дистанционной диагностики, подтвержденный патентом 2679759 в 2018 г., позволяющий определять техническое состояние ВИ, выявлять наличие, вид и место расположения наиболее опасных для нормального функционирования ВИ дефектов по установленному набору диагностических параметров ЧР. Установлена роль динамических процессов перераспределения индуцированных предыдущими ЧР электрических полей в области дефекта в развитии дефектного состояния ВИ.

По результатам измерений комплексным дистанционным методом набора характеристик ЧР, выполненным при обследовании ФВИ и ПВИ на подстанциях, установлены три основных диагностических признака, позволяющие определять вид и место расположения наиболее опасных при эксплуатации дефектов. К ним относятся: значительное (в 2-3 раза) увеличение интенсивности ЧР, соответствующих отрицательным полупериодом высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, значительное отличие формы одиночных импульсов ЧР для положительных и отрицательных сигналов для дефектов «стержень-оконцеватель», что не характерно для дефектов на стержне, сдвиг в сторону меньших фазовых углов начала генерации МЧР. В результате разработана усовершенствованная модель описания особенностей ЧР, учитывающая вклад в излучение ЧР не только приложенного поля, но и индуцированного предыдущими разрядами поля на диэлектрических

поверхностях, ограничивающих область дефекта в полимерных и фарфоровых ВИ. Усовершенствована стримерная модель распространения импульсов МЧР вдоль полости дефекта, в которой учитывается не только генерация высокочастотных импульсов электромагнитных волн, но и одновременная генерация порождающих импульсы акустических волн ударных волн, излученных скачком давления в головной части стримера. Этот процесс в отличие от излучения импульсов электромагнитных волн зависит от условий накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта.

Разработан комплексный метод дистанционной диагностики высоковольтных опорных и подвесных изоляторов путем одновременного измерения характеристик ЧР акустическими и электромагнитными датчиками, позволяющий в процессе эксплуатации более точно устанавливать местоположения дефектных изоляторов.

Выполнено обследование ВИ типа ЛК 70/35 и ИОС 110/400 на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания». Определены временные закономерности изменения параметров ЧР для полимерных и фарфоровых изоляторов. Установлены определенные закономерности и ограничения при одновременном применении электромагнитных и акустических датчиков для детектирования МЧР.

Комплексный метод дистанционного контроля позволяет повышать определение технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса ВИ в процессе эксплуатации и представляет собой инструмент для решения широкого круга практических задач, прошедший апробацию в промышленности и учебном процессе в ФГБОУ ВО «КГЭУ».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Статьи в зарубежных рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или SCOPUS

A1. **Ivanov D.A.**, Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Galieva T.G. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation // *Energies*. 2021. 14 (18). P. 5670. DOI: 10.3390/en14185670 (Q1 по SJR).

A2. **Ivanov D.A.**, Golenishchev-Kutuzov A.V., Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F. Portable Complex for Remote Control of High-Voltage Insulators using Wireless Data Collection and Transmission Module // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. 13 (6). P. 2358-2362. (Q2 по SJR).

A3. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., **Ivanov D.A.** et al. Effect of partial discharges on the operating condition of highvoltage insulators // *E3S Web of Conferences*. 2019. 124. P. 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/201912403001.

A4. **Ivanov D.**, Galieva T., Sadykov M. et al. Method for the diagnosis of high-voltage dielectric elements during operation based on dynamic registration of electromagnetic radiation // *E3S Web of Conferences*. 2020. 216. P. 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601061.

A5. **Ivanov D.**, Golenishchev-Kutuzov A., Sadykov M., Yaroslavsky D., Galieva T. Assessment of the Technical Condition of High-Voltage Insulators during Operation. *Machines* 2022, 10, 1063. <https://doi.org/10.3390/machines10111063>. (Q2 по SJR).

A6. Golenishchev-Kutuzov A.V., Semennikov A.V. and **Ivanov D.A.** Automated Measuring Device for Remote Control of Dielectric Power Equipment // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2022, pp. 870-875, doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896351.

Статьи в российских рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и/или SCOPUS (и приравненных к изданиям, входящим в перечень ВАК)

A7. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., **Ivanov D.A.** et al. Remote Testing for Defects in In-Service High-Voltage Insulators // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54. No. 10. P. 682-686. DOI: 10.1134/S1061830918100054.

A8. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., **Ivanov D.A.** et al. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. Vol. 55. No. 8. P. 596-602. DOI: 10.1134/S1061830919080060.

A9. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., **Ivanov D.A.** et al. Complex Diagnostics of Defects in High-Voltage Insulators // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83. No. 12. P. 1490-1493. DOI: 10.3103/S1062873819120062.

A10. Golenishchev-Kutuzov A.V., **Ivanov D.A.**, Kalimullin R.I., Semennikov A.V. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating the Residual Life of High Voltage Insulators // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. Vol. 84. No. 12. P. 1502-1504. DOI: 10.3103/S1062873820120229.

A11. **Ivanov D.A.**, Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. et al. System for monitoring the acoustic radiation of discharge processes at an electric substation to diagnose the technical state of insulators // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. No. 11. P. 1258–1261.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

A12. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., **Иванов Д.А.** и др. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 87-93.

А13. Выбор операционной системы реального времени для беспроводного устройства / Д. А. Ярославский, **Д. А. Иванов**, М. П. Горячев [и др.] // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2016. – Т. 72. – № 4. – С. 95-100.

А14. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., **Иванов Д.А.**, Марданов Г.Д. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 3-4. С. 99-107.

А15. Голенищев-Кутузов А.В., **Иванов Д.А.**, Потапов А.А., Кротов В.И. Использование бесконтактных методов диагностики высоких электрических полей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 123-133. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-123-133.

А16. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., **Иванов Д.А.** и др. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 117-127. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127.

А17. Галиева Т.Г., **Иванов Д.А.**, Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 80–87. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-80-87.

А17. **Иванов Д.А.**, Галиева Т.Г., Голенищев-Кутузов А.В., Садыков М.Ф., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. Детектирование акустических сигналов частичных разрядов на дефектах изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 48-55. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-48-55.

А19. **Иванов Д.А.** Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 151-163.

А20. **Иванов Д.А.** Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса //

Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 2. С. 132-146.

A21. **Иванов Д.А.** Экспериментальная система мониторинговой диагностики высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 6. С. 15-23.

A22. Галиева Т.Г., **Иванов Д.А.**, Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177.

A23. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Калимуллин Р.И., **Иванов Д.А.** Лазерно-электрический метод контроля дефектности высоковольтных диэлектрических элементов / Известия РАН. Серия физическая, 2022, том 86, № 11, с. 1660–1663.

Патенты и авторские свидетельства

A24. Патент № 2679759 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов: № 2018110016: заявл. 21.03.2018: опубл. 12.02.2019 / А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Д. А. **Иванов** [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ").

A25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668517 Российская Федерация. Программный комплекс записи и обработки сигналов частичных разрядов в процессе мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов: № 2021667722: заявл. 10.11.2021: опубл. 17.11.2021 / **Д.А. Иванов**, А.В. Голенищев-Кутузов, А.В. Семенников [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

A26. Патент на полезную модель № 206382 U1 Российская Федерация, МПК H02J 13/00. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи: № 2021113356: заявл. 11.05.2021: опубл. 08.09.2021 / М. Ф. Садыков, М. П. Горячев, Д. А. Ярославский, **Д. А. Иванов** [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

A27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666708 Российская Федерация. Программа анализа среднего значения мощности сигналов радиоканалов протокола ZigBee на разных частотах: № 2020666027: заявл. 07.12.2020: опубл. 14.12.2020 / М. Ф. Садыков, **Д. А. Иванов**, Д. А. Ярославский [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

A28. Патент на полезную модель № 193020 U1 Российская Федерация, МПК B61B 7/06, G01R 31/08, H02G 1/02. Роботизированное устройство для верхового осмотра состояния воздушных линий электропередачи: № 2019120921: заявл. 04.07.2019: опубл. 10.10.2019 / М. Ф. Садыков, Н. С. Мочалов, **Д. А. Иванов**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет" (ФГБОУ ВО "КГЭУ").

A29. Патент на полезную модель № 185311 U1 Российская Федерация, МПК H02J 13/00, G01R 31/02. Устройство оперативного мониторинга технического состояния высоковольтных линий электропередачи: № 2018120028: заявл. 30.05.2018: опубл. 29.11.2018 / М. Ф. Садыков, М. П. Горячев, Д. А. Ярославский, **Д. А. Иванов** [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет".

A30. Патент на полезную модель № 211126 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/00, G01R 31/08. Устройство оперативного онлайн-мониторинга

технического состояния высоковольтных линий электропередачи: № 2020124117: заявл. 21.07.2020: опубл. 23.05.2022 Бюл. № 15 / **Д. А. Иванов**, М. П. Горячев, М. Ф. Садыков, [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная компания «Фарада».

А31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664225 Российская Федерация. Программа обработки и визуализации данных для системы автоматического мониторинга состояния ВЛЭП и подстанций: № 2022662430, заявл. 06.07.2022, опубл. 26.07.2022/ **Д. А. Иванов**, Д. А. Ярославский, М. Ф. Садыков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

А32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663236 Российская Федерация. Программа обработки сигналов с акустических датчиков: № 2022662455, заявл. 06.07.2022, опубл. 13.07.2022/ **Д. А. Иванов**, Т.Г. Галиева, М. Ф. Садыков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

А33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022666391 Российская Федерация. Программа обработки диагностической информации, регистрируемой электромагнитным датчиком частичных разрядов: № 2022662478, заявл. 06.07.2022, опубл. 31.08.2022/ **Д. А. Иванов**, Т.Г. Галиева, М. Ф. Садыков [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Глава в монографии

А34. Голенищев-Кутузов В.А., Абдуллазянов Э.Ю., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В. Диагностика твердотельной изоляции высоковольтного энергетического оборудования // Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. В 3 т. Т. III. Качество энергоснабжения,

энергоэффективность и экология: монография / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – с. 44-70.

Другие публикации по теме диссертации

A35. Оптические, электромагнитные и акустические методы контроля и диагностики высоковольтной изоляции / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Марданов Г.Д., Хуснутдинов Р.А. // В сборнике: Наука и инновации - 2016. ISS SI - 2016. Материалы Одиннадцатой международной научной школы. Йошкар-Ола, 2016. С. 99-105.

A36. Real-Time Operating Systems For Wireless Modules / Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Goryachev M.P., Savelyev O.G., Misbakhov R.S. // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Т. 11. № 6. С. 1168-1171.

A37. Особенности топологии беспроводной сенсорной сети для задач мониторинга воздушных линий электропередачи / Горячев М.П., Иванов Д.А., Ярославский Д.А. // В сборнике: Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. 2017. С. 465-469.

A38. Модульное устройство для технологии умного провода в задачах мониторинга воздушных линий электропередачи / Горячев М.П., Иванов Д.А., Ярославский Д.А. // В сборнике: Интеллектуальные энергосистемы. Материалы V Международного молодежного форума. 2017. С. 264-267.

A39. Аппаратно-программный комплекс и метод дистанционного контроля высоковольтных изоляционных элементов // Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Марданов Г.Д. // В сборнике: Энергосбережение. Наука и образование. Сборник докладов международной конференции. 2017. С. 227-230.

A40. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., **Ivanov D.A.**, Semennikov A.V., Galieva T.G. Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment // E3S Web of Conferences. 2021. 288. P. 01088. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801088>.

A41. **Ivanov D.**, Golenishchev-Kutuzov A., Galieva T. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulator Diagnosis // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. P. 614-619. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559473.

A42. **Ivanov D.A.**, Golenishchev-Kutuzov A.V. and Galieva T.G. Methods of Periodic Complex Remote Measurement of Partial Discharge Characteristics in Highvoltage Insulators // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2022, pp. 159-163, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906650.

A43. Investigations Of Topological Features Of Construction An Intelligent Overhead Power Transmission Line Based On Wireless Sensors / Ivanov D.A., Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F., Goryachev M.P., Yambaeva T.G. // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. Т. 8. № 12. С. 903-908.

A44. Комплексная дистанционная диагностика высоковольтных изоляторов / Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В., Аввакумов М.В. // В сборнике: Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан. Доклады XVIII Международного симпозиума "Энергоресурсоэффективность и энергосбережение". ГАУ «Центр энергосберегающих технологий Республики Татарстан при Кабинете Министров Республики Татарстан». 2018. С. 214-217.

A45. Выбор метода диагностики для системы оперативного мониторинга технического состояния воздушных линий электропередач / Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. // В сборнике: Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции: электронный сборник. Под редакцией В.Г. Каширских, И.А. Лобур. 2018. С. 409.1-409.5.

A46. Мобильный комплекс для дистанционного контроля высоковольтных изоляторов с использованием беспроводного модуля сбора и передачи данных / Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Арсланов А.Д. // В сборнике: Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов IV Всероссийской

научно-практической конференции: электронный сборник. Под редакцией В.Г. Каширских, И.А. Лобур. 2018. С. 411.1-411.5.

A47. Диагностический бесконтактный метод регистрации высоких электрических полей / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В. // В сборнике: "Наука и инновации-2018" ISS "SI-2018". Материалы Тринадцатой международной научной школы. Йошкар-Ола, 2018. С. 43-47.

A48. Система оперативного мониторинга технического состояния воздушных линий электропередач / Горячев М.П., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Галиева Т.Г. // В сборнике: Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы IV Национальной научно-практической конференции. В 2-х томах. Редколегия: Э.Ю. Абдуллазянов [и др.]. 2018. С. 104-109.

A49. Комбинированный метод дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов / Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. // В сборнике: Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы IV Национальной научно-практической конференции. В 2-х томах. Редколегия: Э.Ю. Абдуллазянов [и др.]. 2018. С. 440-443.

A50. Исследование методов и средств диагностики состояния линий электропередач / Галиева Т.Г., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., Ярославский Д.А. // В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 197-201.

A51. Система автоматизированного мониторинга технического состояния воздушных линий электропередачи / Горячев М.П., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Тюрин В.А. // В сборнике: Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. XIV Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция. 2019. С. 231-236.

A52. Разработка портативного устройства визуального контроля высоковольтного оборудования / Иванов Д.А., Потанин А.А., Арсланов А.Д. // В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 245-251.

A53. Разработка портативного комплекса для дистанционного контроля высоковольтных изоляторов с использованием беспроводного модуля сбора и передачи данных / Иванов Д.А., Голенищев-Кутузов А.В., Арсланов А.Д. // В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 416-421.

A54. Система передачи информации о режимах работы воздушных линий электропередачи / Галиева Т.Г., Иванов Д.А. // В сборнике: Энергетика: состояние, проблемы, перспективы. Труды X Всероссийской научно-технической конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет». 2019. С. 66-70.

A55. Обзор методов и средств диагностики линий электропередач / Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Ярославский Д.А. // В сборнике: Тинчуринские чтения. Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. 2019. С. 311-314.

A56. Устройство для определения преддефектных состояний высоковольтной изоляции методом частичных разрядов с использованием ультразвуковой и электромагнитной диагностики / Арсланов А.Д., Иванов Д.А., Потанин А.А. // В сборнике: Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. Казань, 2020. С. 108-111.

A57. Бесконтактное устройство диагностики высоковольтных изоляторов методом частичных разрядов / Галиева Т.Г., Иванов Д.А. // В сборнике:

Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. Материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. Казань, 2020. С. 123-127.

А58. Влияние размеров и местоположения дефектов на изменение характеристик частичных разрядов / Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И., Аввакумов М.В. // В сборнике: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары, 2020. С. 296-298.

А59. Дистанционный мониторинг состояния высоковольтных изоляторов / Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. // В книге: Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия. Сборник тезисов XV международной научной школы-семинара. Москва, 2020. С. 73-77.

А60. Разработка бесконтактного устройства диагностики высоковольтных изоляторов / Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Арсланов А.Д. // В сборнике: Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Материалы VI Национальной научно-практической конференции. В двух томах. Казань, 2020. С. 265-267.

А61. Методика диагностики высоковольтных диэлектрических элементов в процессе эксплуатации на основе динамической регистрации электромагнитного излучения / Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В. // В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 92-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. Ответственный редактор Н.И. Воропай. 2020. С. 66-72.

А62. Диагностика воздушных линий электропередачи роботизированными комплексами и беспилотными летательными аппаратами / Иванов Д.А., Галиева Т.Г. // Актуальные вопросы энергетики. 2020. Т. 2. № 1. С. 38-43.

А63. Особенности дефектов в высоковольтных изоляторах / Галиева Т.Г., Назарова А.Д., Иванов Д.А. // В сборнике: Проблемы и перспективы развития

энергетики, электротехники и энергоэффективности. Материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары, 2021. С. 211-216.

А64. Система диагностики высоковольтных диэлектрических элементов электротехнического оборудования / Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И. // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2021. С. 271-272.

А65. Устройство и система мониторинга технического состояния высоковольтного диэлектрического оборудования подстанций / Иванов Д.А., Голенищев-Кутузов А.В., Садыков М.Ф., Галиева Т.Г., Семенников А.В. // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2021. С. 273-274.

А66. Система контроля акустического излучения разрядных процессов на электрической подстанции для целей диагностики технического состояния изоляционного оборудования // Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Голенищев-Кутузов А.В., Галиева Т.Г. // В книге: Научный семинар "Нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия. Яльчик – 2021". 2021. С. 39-41.

А67. Лабораторный стенд для разработки метода непрерывного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования энергетического комплекса / Галиева Т.Г., Иванов Д.А. // В сборнике: Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2021. С. 488-489.

А68. Использование роботизированных комплексов и беспилотных летательных аппаратов в качестве платформы для мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи / Иванов Д.А., Голенищев-Кутузов А.В., Галиева Т.Г., Семенников А.В. // В сборнике:

Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация». Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3 томах. Казань, 2021. С. 176-184.

А69. Усовершенствованная система автоматизированного мониторинга состояния воздушных линий электропередачи / Нгуен В.Ву, Ярославский Д.А., Иванов Д.А., Горячев М.П., Галиева Т.Г. // В сборнике: Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация». Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3 томах. Казань, 2021. С. 188-190.

А70. Контроль технического состояния высоковольтных изоляторов / Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Арсланов А.Д., Наумов А.А. // В сборнике: Промышленное развитие России: проблемы, перспективы. сборник статей по материалам XVIII Международной научно-практической конференции преподавателей вузов, ученых, специалистов, аспирантов, студентов: в 2-х томах. Мининский университет. 2021. С. 160-164.

А71. Система мониторинга состояния высоковольтной изоляции / Иванов Д.А., Голенищев-кутузов А.В., Галиева Т.Г., Семенников А.В. // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения). Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом. Иваново, 2021. С. 81-84.

А72. Иванов Д.А. Измерительное устройство и его использование в системах мониторинговой диагностики высоковольтных изоляторов / Д.А. Иванов, Т.Г. Галиева, А.Д. Назарова // Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции (3 декабря 2021 г., г. Уфа) / – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2021. С.19-22.

А73. Галиева, Т. Г. Особенности дефектов в высоковольтных изоляторах / Т. Г. Галиева, А. Д. Назарова, Д. А. Иванов // Бутаковские чтения : Материалы I Всероссийской с международным участием молодежной конференции, Томск, 15–16 декабря 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 245-249.

А74. Исследование мощных частичных разрядов и их влияния на работоспособность высоковольтных изоляторов / А. В. Голенищев-Кутузов, А. В. Семенников, Д. А. Иванов, С. Б. Харченко // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике : материалы XIII всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 03 июня 2022 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 286-287.

А75. Контроль дефектности высоковольтных диэлектрических элементов оптикоэлектронным методом / В. А. Голенищев-Кутузов, А. В. Голенищев-Кутузов, А. В. Семенников [и др.] // Научный семинар "нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия – 2022" : Сборник тезисов, Казань, 11–12 июля 2022 года. – Казань: Издательство "Тривант", 2022. – С. 28-30.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
2. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения (с Поправкой). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2016. Дата принятия - 21 июня 2016.
3. Международный стандарт IEC 60060 – 1.2010 Методы испытаний высоким напряжением.
4. ГОСТ Р 55191 Методы испытаний в высоком напряжении. Измерения частичных разрядов. М.: Росстандарт, 2012.
5. ГОСТ 20074-83 (СТ СЭВ 20074-83) Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик и частичных разрядов. М.: Издательство стандартов, 1983 год.
6. Ситников, В. Ф. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации / В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев // Электричество. 2007. № 11. С. 9-16.
7. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат.1992. 239 с.
8. Зарипов Д.К., Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. №3-4. С. 57-61., : , .
9. Способ бесконтактного и дистанционного контроля состояния гирлянд изоляторов воздушных высоковольтных линий электропередачи: пат 2359380 Российская Федерация / Бадретдинов М.Н., Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Губаев Д.Ф. опубл. 2007.
10. Приказ РАО «ЕЭС России» «О повышении надежности опорно-стержневых изоляторов» N252 от 06.05.2002 г.
11. Гайворонский А.С. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика в эксплуатации // Главный энергетик. 2010. №2. С. 15.

12. Ferraro R. Field Guide: Inspection of Conductors for Overhead Transmission Lines, Washington, DC, USA:Electric Power Research Institute, 2015.
13. Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А. и др. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах / Д. А. Поляков, К. И. Никитин, Н. А. Терещенко, А. С. Новосёлов, Я. П. Билевич. – DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38 // Омский научный вестник. – 2020. – № 1 (169). – С. 32–38.
14. Soh D., Krishnan S.B., Abraham J., Xian L.K., Jet T.K., Yongyi J.F. Partial Discharge Diagnostics: Data Cleaning and Feature Extraction // Energies. 2022; 15(2):508. <https://doi.org/10.3390/en15020508>.
15. Русов В. А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В. А. Русов. - Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. - 368 с.
16. Partial discharge measurement as a diagnostic tool / S. Cesari, C. Hantouche, T. Muraoka, V. Pouliquen // Electra. - 1998. - № 181. - P. 25-51.
17. Архангельский К.С., Власов А.Н. Индикатор частичных разрядов // Электричество. 1939. № 1.
18. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. М.-Л.: Энергия, 1979. 270 с.
19. Kreuger, F. H. Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment. London ; Boston : Butterworths. 1989. 193 p.
20. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2008. 156 с.
21. Овсянников А.Г., Коробейников. С.М., Вагин Д.В. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов // Электричество. 2014. №8. С. 37-43.
22. Куперштох А.Л., Станалойос С.П., Агорис Д.П. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 15. С. 74-81.
23. Захаров А.А., Голенищев-Кутузов А.В., Федоров Г.С. Оптимальная форма представления параметров частичных разрядов в виде двух и трехмерных амплитудно-фазовых диаграмм // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2005. №11-12. С. 93-96.

24. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Маковеев А.А., Черномашенцев А.Ю. Контроль высоковольтных полимерных изоляторов по измерению частичных разрядов // *Электричество*. 2008. №12. С. 11-14.
25. Рекомендации по регистрации частичных разрядов в изоляции трансформаторного оборудования в эксплуатационных условиях М. РД ОАО «ФСК ЕЭС», 2003.
26. Максудов Д.В., Федосов Е.М. Методы селекции сигналов частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов // *Вестник УГАТУ*, Уфа. 2009. Т. 12. С. 138-143.
27. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.
28. СТО 56947007- 29.180.01.207-2015 Методика измерения частичных разрядов в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». 2015 г.
29. СТО 56947007-29.240.003-2008. Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35-1150 кВ. Стандарт организации ПАО "ФСК ЕЭС". 2008 г.
30. СТО 56947007-29.200.10.011-2008. Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования (с Изменениями). Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». 2008 г.
31. Korobeynikov S. "Apparent" and true charges of partial discharges / S. Korobeynikov, A. G. Ovsyannikov // *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Dielectrics, ICD 2016, Montpellier, France, 3-7 July 2016*. - Vol. 2. - P. 485-489.
32. Ovsyannikov A. G. Simulation of apparent and true charges of partial discharges / A. G. Ovsyannikov, S. M. Korobeynikov, D. V. Vagin // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. - 2017. - Vol. 24, N 6. - P. 3687-3693.

33. About relation between real and apparent charge of partial discharge / A. Ovsyannikov, R. Arbuzov, A. Kovalenko, A. Gaivoronsky // 18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013. - Seoul, 2013. - P. PD-26.
34. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжении 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. М. Издательство Стандартов 1999.
35. Suwaznok Y., Suzuoki Y., Komori F. Partial discharges due electrical treeing in polymers // J. Phys. D. Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 1922-1931.
36. Hayakawa N., Yamaguchi R., Ukai Y. Partial discharge activities under AC/impulse superimposed voltage in polypropylene laminated paper system for HTS cables // J. Phys. Conference Series. 2010. V. 234. P. 032020.
37. Слущер А.И., Поликарпов Ю.И., Гиляров В.Л. Об элементарных актах в кинетике электрического разрушения полимеров // Техническая физика. 2006. Т. 76, В. 12. С. 52.
38. СТО 34.01-1.3-018-2020 Изоляторы полимерные подвесные и опорныена напряжение 6-750 кВ. Стандарт организации ПАО "Россети", 2020. 77 с.
39. Зарипов, Д. К. Индикатор дефекта высоковольтной изолирующей конструкции / Д. К. Зарипов, Р. Н. Балобанов // Электротехника. 2016. № 6. С. 16а-21.
40. Поляков Д.А., Голубятникова Н.О., Никитин К.И., Головков Р.А., Полонянкин Д.А., Регистратор характеристик частичных разрядов // Россия Молодая: передовые технологии. 2015. №1. С. 254-257.
41. Симановский, И. В. Индикатор пробоя полимерного изолятора / И. В. Симановский // Электротехника. 2013. № 6. С. 21-24.
42. Старцев В.В., Любимов В.А., Соловьев Э.П., Солодков Ю.А. Индикатор состояния высоковольтной изоляции. Патент РФ № 2392679, кл. H01B17/00. 2010.
43. Карасев Н. А., Юданов Е. А. КИМ ЕН ДАР Индикатор электрического состояния полимерных изоляторов (варианты). Патент РФ №0002699023 от 03.09.2019.

44. Зарипов Д. К., Насибуллин Р. А., Маргулис С. М., Ибрагимов Р. Р., Игтисамов М. Ч. Световой индикатор состояния изолирующей конструкции. Патент РФ № 0002660754 от 09.07.2018.
45. Дзюбин А. С. Индикатор пробоя и/или перекрытия изолятора с соединительными. Патент РФ №189899, 10.06.2019. МПК H01B 17/46 (2006.01).
46. Иванисенко А. А. Индикатор перекрытия полимерного изолятора. Патент РФ №190784, 12.07.2019, МПК H01H 71/00 (2006.01).
47. Skubis J, Koziol M. Assessment of Partial Discharges in the Air by Application of Corona Camera. *Applied Sciences*. 2021; 11(18):8595. <https://doi.org/10.3390/app11188595>.
48. Mishra D.K., Dhara S., Koley C., Roy N.K., Chakravorti S. Self-organizing feature map based unsupervised technique for detection of partial discharge sources inside electrical substations // *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 2019, 147, 106818.
49. Nagi, Ł.; Koziol, M.; Kunicki, M.; Wotzka, D. Using a scintillation detector to detect partial discharges. *Sensors* 2019, 19, 4936.
50. IEC TS 62478:2016 High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. Technical Specification. 2016.
51. IEEE 4-2013-IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. 2013.
52. Morshuis P. H. F. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 5, 2005, pp. 905-913. doi: 10.1109/TDEI.2.
53. Ramirez-Nino J., Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers // *Meas. Sci. Technol.* 2009. V. 20. P. 115108.
54. Левин Д.М., Самодуров А.В. Частичные разряды и оценка дефектов изоляции кабельных линий // *Электро*. 2012. Т. 6. С. 33.
55. Чалов И.А. Метод частичных разрядов в диагностике силовых трансформаторов распределительных сетей нефтепромыслов // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014. № 10. С. 121.

56. Вдовико, В. П. Методология системы диагностирования электрооборудования высокого напряжения в условиях его эксплуатации / В. П. Вдовико // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. № 1. С. 25-32.
57. Патент № 2597962 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов : № 2015131658/28 : заявл. 29.07.2015 : опубл. 20.09.2016 / А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Г. Д.
58. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Об оценке параметров частичных разрядов // Электричество. 2016. №6. С. 51-56.
59. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Исследование частичных разрядов при электрическом пробое модельных изоляторов из электротехнического фарфора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. №7-8. С. 55-57.
60. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Методика исследования электрического пробоя элементов из электротехнического фарфора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. №5-6. С. 130-134.
61. Inception time delay for internal partial discharges / R. Hammell, J. Amhard, D. Gebhardt, R. Plath // 19th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2015. - Pilsen, Czech Republic, 2015. - P. 473.
62. Остапенко Е.И. Физические процессы при перекрытии загрязненной изоляции // Электричество. 2006. №9. С. 41-46.
63. Голенищев-Кутузов, А. В. Электрофизические процессы старения высоковольтной изоляции и методы диагностики реальных изоляторов в условиях эксплуатации / А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Марданов Г. Д. //, Материалы Двенадцатой международной научной школы "Наука и инновации-2017" ISS "SI-2017", Йошкар-Ола, 10–16 июля 2017 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. – С. 67-75.

64. Губаев Р.С., Камалов Ш.М., Юлдашев А.К., Юлдашев К.А. Об эксплуатационных характеристиках линейных стержневых полимерных изоляторах // *Электричество*. 2002. №2. С. 14-21.
65. Nikita M, Yamada K, Nakamuza A. Measurement of partial discharge by computer and analysis partial discharges distribution by the Monte Carlo method // *IEEE Transactions of Electric Insulation*. 1990. V. 25. P. 453-468.
66. Частичные разряды в полимерных изоляторах / Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Губаев Д. Ф. [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2010. – № 7-8. – С. 76-83.
67. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Шмидт С.В., Крупнов Б.А. Комплексный метод регистрации параметров частичных разрядов изоляции электрооборудования // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2010. №9-10. С. 98-104.
68. Heitz. A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 1999. V. 32. P. 1012.
69. Tran T. N., Golosnoy I. O., Lewin P. L. and Georghiou G. E. Numerical modelling of negative discharges in air with experimental validation // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 44, no. 1, 015203, Aug. 2011.
70. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., Fujii T. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model // *The Japan Society of Applied Physics*. 2016. V 55. №2.
71. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics // *Journal of physics: Conference Series*. 2016. V. 754. 102006.
72. Голенищев-Кутузов, А.В. Комплексная дистанционная диагностика состояния высоковольтных изоляторов / А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Г.Д. Марданов, И.Е. Синюгин // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2013. № 69-72. С. 77.

73. Callender G, Golosnoy I, Rapisarda P, Lewin P. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // *Journal of Physics D. Appl. Phys.* 2018. V. 51. №12.
74. Дистанционная диагностика высоковольтных полимерных изоляторов / А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, И. Е. Синюгин [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2014. № 7-8. С. 77-82.
75. Fernando, S., Bojovschi, A., Wong, K. L., & Rowe, W. Detection of GHz frequency components of partial discharge in various media // *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2009)*, p. 687–692.
76. Wu K., Suzuoki Y., Dissado L.A. The contribution of discharge patterns in discharges. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, V.37, 2004, P. 1815.
77. Xie Q, Lin X, Li T, et al. Experimental verification of the space design of a square partial discharge acoustic emission array sensor // *Measur. Scin. and Techn.* 2015, v 26, № 4. 045101.
78. Слуцкер А.И., Гиляров В.Л., Поликарпов Ю.И., Каров Д.Д. Возможные проявления квантового эффекта (туннелирование) в элементарных актах кинетики разрушения полимеров // *Физика твердого тела*, 2010, том 52, вып. 8. С. 1524-1530.
79. Evagorou D., Kyprianou A., Lewin P.L. Feature extraction of partial discharge signals using the wavelet packet transform and classification with a probabilistic neural network // *IET Ser. Meas. Technol.* 2010. V. 4. P. 177.
80. Ganjovi A. A., Gupta N., and Raju G. R. G. A kinetic model of a PD pulse within voids of sub-millimeter dimensions // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, no. 6, pp. 1743-1754, Dec. 2009.
81. Sekii Y. Degradation of low-density polyethylene and cross-linked polyethylene by partial discharge // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 1, pp. 116-124, Feb. 2010.

82. Florkowska B. Pulse height analysis of partial discharges in air / B. Florkowska, R. Wlodek // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - 1993. - Vol. 28, № 6. - P. 932-940.
83. Patsch R. Pulse sequence analysis - a diagnostic tool based on the physics behind partial discharges / R. Patsch, F. Berton // Journal of physics. D, Applied physics. - 2002. - Vol. 35, № 1. - P. 25-32.
84. Боев С. Г. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики / С. Г. Боев, В. Я. Ушаков. - Москва : Энергоиздат, 1991. - 238 с.
85. Brandenburg R. The transition between different modes of barrier discharges at atmospheric pressure / R. Brandenburg, Z. Navratil, J. Jansky, P. St'ahel, D. Tranec, H.-E. Wagner // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2009. - Vol. 42 (8). - P. 085208.
86. Brandenburg R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments / R. Brandenburg // Plasma Sources Science and Technology. - 2017. - Vol. 26, N 5. - P. 053001.
87. Kumara S. Surface charge decay on polymeric materials under different neutralization modes in air / S. Kumara, Y. V. Serdyuk, S. M. Gubanski // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2011. - Vol. 18, № 5. - P. 1779-1788.
88. Florkowski M. Partial discharge echo obtained by chopped sequence / M. Florkowski, B. Florkowska, P. Zydron // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2016. - Vol. 23, № 3. - P. 1294-1302.
89. Горохов В. В. Статистические исследования электрического пробоя азота в диапазоне длительностей 3 ms - 60 min / В. В. Горохов, В. И. Карелин, А. В. Перминов, П. Б. Репин // Журнал технической физики. - 2018. - Т. 88, вып. 5. - С. 696-701. DOI: 10.21883/JTF.2018.05.4589.
90. Бортник И. М., Белогловский А. А., Верещагин И. П. и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И. М. Бортник, А.

- А. Белогловский, И. П. Верещагин и др.; под общ. ред. И. П. Верещагина. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – 731 с.
91. Pan C., Chen G., Tang J. and Wu K. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, 2019, pp. 981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.
 92. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Марданов Г. Д. и др. Дистанционная диагностика высоковольтных изоляторов / А. В. Голенищев-Кутузов, В. А. Голенищев-Кутузов, Г. Д. Марданов [и др.] // *Дефектоскопия*. 2016. № 8. С. 75-82.
 93. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, no. 4, pp. 510-528, Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.
 94. Wu K., Pan C., Meng Y. and Cheng Y. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 2, 2013, pp. 612-619. doi: 10.1109/TDEI.2013.6508765.
 95. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011. V. 44. No. 24. P. 245202.
 96. Gouda O. E., ElFarskoury A. A., Elsinnary A. R., and Farag A. A. Investigating the effect of cavity size within medium-voltage power cable on partial discharge behavior // *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 5, pp. 1190-1197, Aug. 2018.
 97. Villa A., Barbieri L., Gondola M., Leon-Garzon A. R., Malgesini R. A PDE-based partial discharge simulator // *Journal of Computational Physics*. 345. 2017. p. 687-705. 10.1016/j.jcp.2017.05.045.
 98. Villa A., Barbieri L., Malgesini R., Leon-Garzon A. R. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability // *Journal of Applied Physics* 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.

99. Kreuger F.H. Classification of partial discharges / F. H. Kreuger, E. Gulski, A. Krivda // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - 1993. - Vol. 28, N 6. - P. 917-931.
100. Pedersen A. On the electrical breakdown of gaseous dielectrics / A. Pedersen // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - 1989. - Vol. 24, № 5. - P. 721-739.
101. Judd M. D. Partial discharge excitation of UHV modes in a cylindrical cavity / M. D. Judd, B. F. Hampton, O. Farish // Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. Subject 4:, High voltage testing and measurement techniques, calibration and quality management. - Graz, 1995. - P. 4561.
102. Bolliger A. PD Diagnostic - its history and future / A. Bolliger, E. Lemke // PD Workshop, Alexandria, Virginia, 3-4 December, 2001. - Alexandria, 2001.
103. Коробейников С. М. Физические механизмы частичных разрядов: монография / С. М. Коробейников, А. Г. Овсянников. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. - 266 с. - (Монографии НГТУ).
104. Wu K. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: I. PDs in tree channels / K. Wu, Y. Suzuoki, T. Mizutani, H. Xie // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2000. - Vol. 33. - P. 1197-1201.
105. Wu K. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: II. Tree growth affected by PDs / K. Wu, Y. Suzuoki, T. Mizutani, H. Xie // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2000. - Vol. 33. - P. 1202-1208.
106. Wu K. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: III. PD extinction and re-growth of tree / K. Wu, Y. Suzuoki, T. Mizutani, H. Xie // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2000. - Vol. 33. - P. 1209-1218.
107. Florkowski M. Partial discharges in high-voltage insulating systems – mechanisms, processing, and analytics. Wydawnictwa AGH. 2021. 570 с.
108. IEC TS 62478:2016 High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. 68 p.
109. Миллер М.А., Антенна. Физическая энциклопедия М. Советская энциклопедия. 1988. т. 1, с. 91-99.

110. Koziół M, Nagi Ł, Kunicki M, Urbaniec I. Radiation in the Optical and UHF Range Emitted by Partial Discharges. *Energies*. 2019; 12(22):4334. <https://doi.org/10.3390/en12224334>.
111. Chai, H., Phung, B. T., & Mitchell, S. (2019). Application of UHF sensors in power system equipment for partial discharge detection: A review. *Sensors (Switzerland)*, 19(5) doi:10.3390/s19051029.
112. Chakravarthi, M. K., Giridhar, A. V., Kumar, G. A., & Sarma, D. V. S. S. S. (2021). A compact log periodic planar dipole UHF array sensor for partial discharge measurements. *IEEE Sensors Journal*, 21(24), 27748-27756. doi:10.1109/JSEN.2021.3124418.
113. Dhara, S., Koley, C., & Chakravorti, S. (2021). A UHF sensor based partial discharge monitoring system for air insulated electrical substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(6), 3649-3656. doi:10.1109/TPWRD.2020.3046276.
114. Tenbohlen, S., Denissov, D., Hoek, S. M., & Markalous, S. M. (2008). Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(6), 1544-1552. doi:10.1109/TDEI.2008.4712656.
115. Upton, D. W., Haigh, R. P., Mather, P. J., Lazaridis, P. I., Mistry, K. K., Zaharis, Z. D., Atkinson, R. C. (2020). Gated pipelined folding ADC-based low power sensor for large-scale radiometric partial discharge monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 20.
116. Upton, D. W., Mistry, K. K., Mather, P. J., Zaharis, Z. D., Atkinson, R. C., Tachtatzis, C., & Lazaridis, P. I. (2021). A review of techniques for rss-based radiometric partial discharge localization. *Sensors (Switzerland)*, 21(3), 1-21. doi:10.3390/s21030.
117. Wu F., Luo L., Jia T., Sun A., Sheng G., & Jiang X. (2019). RSSI-power-based direction of arrival estimation of partial discharges in substations. *Energies*, 12(18) doi:10.3390/en12183450.

118. Yadam, Y. R., Ramanujam, S., & Arunachalam, K. (2021). An ultrawideband conical monopole with radome for detection of partial discharges. *IEEE Sensors Journal*, 21(17), 18764-18772. doi:10.1109/JSEN.2021.3090099.
119. Zhang, Y., Lazaridis, P., Abd-Alhameed, R., & Glover, I. (2017). A compact wideband printed antenna for free-space radiometric detection of partial discharge. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25(2), 1291-1299. doi:10.3906/e.
120. Sena, A. J. C., de Oliveira, R. M. S., & Do Nascimento, J. A. S. Frequency resolved partial discharges based on spectral pulse counting // *Energies*, 2021, 14(21) doi:10.3390/en14216864.
121. Raymond, W. J. K., Illias, H. A., Bakar, A. H. A., & Mokhlis, H. Partial discharge classifications: Review of recent progress // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2015, 68, C164-181. doi:10.1016/j.measurement.2015.02.032.
122. Reid, A. J., Judd, M. D., Fouracre, R. A., Stewart, B. G., & Hepburn, D. M. (2011). Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 18(2), 444-455. d.
123. Wong K. L. Application of very-high-frequency (VHP) method to ceramic insulators // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, no. 6, 2004, pp. 1057-1064. doi: 10.1109/TDEI.2004.1387829.
124. Вихров, М. А. Обзор рынка ультрафиолетовых дефектоскопов для контроля ЛЭП, оборудования ОРУ и ЗРУ. Особенности выбора приборов. ООО "ПАНАТЕСТ" / М. А. Вихров // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2017. № 3(42). С. 124-125.
125. Патент № 2753811 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/12. Способ и устройство бесконтактного дистанционного контроля технического состояния высоковольтных линейных изоляторов воздушных линий электропередач : № 2020126832 : заявл. 29.04.2020 ; опубл. 23.08.2021 / В. И. Катков, Ю. К. Евдокимов, Р. К. Сагдиев, Г. П. Охоткин ; заявитель ФГБОУ ВО "Казанский

национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ".

126. Kim S., Kim D., Jeong S., Ham J., Lee J., & Oh K. (2020). Fault diagnosis of power transmission lines using a UAV-mounted smart inspection system. *IEEE Access*, 8, 149999-150009. doi:10.1109/ACCESS.2020.3016213.
127. Florkowski M. Application of image processing techniques to partial discharge patterns / M. Florkowski // Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. Subject 5: Dielectric diagnostics and expert systems. - Graz, 1995. - P. 5649.
128. Кириленко В. М. Частичные разряды как основной фактор разрушения твердых диэлектриков / В. М. Кириленко // Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. – Москва : Энергия, 1970. - С. 447-455.
129. Голенищев-Кутузов В. А. Изучение процессов разрушения высоковольтных полимерных изоляторов методом частичных разрядов / В. А. Голенищев-Кутузов, А. Ю. Черномашенцев, А. В. Голенищев-Кутузов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008.
130. Завидей В.И. Электронно-оптическое оборудование при контроле технического состояния элементов сетей и подстанций на рабочем напряжении / Завидей В.И., Вихров М.А., Крупенин Н.В., Голубев А.В.//, Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006. – № 1. – С. 19-23.
131. Бельский А.В., Бусарев А.В., Галеев Д.В., Зарипов Д.К. многоканальный прибор для оперативной диагностики технического оборудования // Прикладная физика. 2010. №5. С. 108-113.
132. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Хуснутдинов Р. А., Марданов Г. Д. Комплексный дистанционный контроль высоковольтных изоляторов в условиях эксплуатации // Электротехника. 2017. № 2. С. 71-73.
133. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system // E3S

Web of Conferences. 2021. Vol. 288. 01070. 10.1051/e3sconf/202128801070. DOI: 10.1051/e3s.

134. Каталог датчиков для контроля состояния высоковольтного электротехнического оборудования. Компания ООО "Димрус", Пермь, 2022, 60 с.
135. Usachev A. E., Kubarev A. Yu. Problems of insulation diagnostics of power equipment by the method of partial discharges // E3S Web Conf. 2021. Vol. 288. 01077. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801077.
136. Illias H. A., Chen G. and Lewin P. L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 1, pp. 99-109, Feb. 2017.
137. Borghei M., Ghassemi M., Rodríguez-Serna J. M. and Albarracín-Sánchez R. A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2570-2581.
138. Ha H., Han S. and Lee J., "Fault detection on transmission lines using a microphone array and an infrared thermal imaging camera", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 61, no. 1, pp. 267-275, Jan. 2012.
139. Многофункциональное устройство ввода/вывода данных National Instruments USB6341. Техническое описание. URL: <https://www.ni.com/pdf/manuals/377879a.pdf>.
140. Sekii Y. Degradation of low-density polyethylene and cross-linked polyethylene by partial discharge // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 17, no. 1, pp. 116-124, Feb. 2010.
141. Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., and Tang J. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 1, pp. 217-226, Feb. 2017.
142. Tanmaneeprasert T., Lewin P.L. "Electrical treeing and ageing characteristics in cavities of low density polyethylene dielectrics on partial discharge measurements",

- Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP) 2016 IEEE Conference on, pp. 975-.
143. Pan C., Wu K., Du Y., Meng Y. P., Cheng Y. H., and Tang J. The effect of surface charge decay on the variation of partial discharge location // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 4, pp. 2241-2249, Aug. 2016.
 144. Pihera J. et al., "Partial discharge detection using acoustic camera," 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), 2020, pp. 830-833, doi: 10.1109/ICD46958.2020.9341902.
 145. Illias H. A., Chen G. and Lewin P. L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 1, pp. 99-109, Feb. 2017.
 146. Pan C. et al., "Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 27, no. 6, pp. 1951-1965, December 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008.
 147. Illias H. A., Chen G., Bakar A. H. A., Mokhlis H. and Tunio M. A. Partial discharges within two spherical voids in an epoxy resin // J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 46, no. 33, 335301, Aug. 2013.
 148. Bartnikas R. On the character of different forms of partial discharge and their related terminologies / R. Bartnikas, J. R. Novak // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - 1993. - Vol. 28, № 6. - P. 956-968.
 149. Лемке Э. Критический обзор моделей частичных разрядов / пер. и коммент. А. Г. Овсянникова // ЭнергоЭксперт. - 2015. - № 6. - С. 30-35.
 150. Stone, G. C. (2005). Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(5), 891-904. doi:10.1109/TDEI.2005.1522184.
 151. Novak J. P. Effect of dielectric surfaces on the nature of partial discharges / J. P. Novak, R. Bartnicas // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2000. - Vol. 7, №1. - P. 146-151.

152. Morshuis P. H. F. The influence of the dielectric-gas interface on the discharge mechanism in a dielectric bounded cavity / P. H. F. Morshuis, F. H. Kreuger // Seventh International Symposium on High Voltage Engineering : ISH-91. - Dresden, 1991. - Vol. 2.
153. Sarfi V. Simulation of partial discharge in cavities embedded in solid dielectrics by finite element method / V. Sarfi, V. Hemmati // 18th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH 2013. - Seoul, 2013. - P. OD1-05.
154. Samat S. S., Musirin I., and Kusim A. S. The effect of supply voltage on partial discharge properties in solid dielectric // IEEE Int. Pow. Eng. Optim. Conf. (IPEOC), 2012, pp. 490-495.
155. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Райзер Ю.П. – 3-е изд. перераб. и доп. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
156. Буслеев Н. И. Отлипание электронов от молекул кислорода воздуха в интенсивном электрическом поле / Н. И. Буслеев, В. Л. Бычков, Л. П. Грачев, И. И. Есаков, А. А. Раваев // Журнал технической физики. - 2017. - Т. 87, вып. 9. - С .1322-1325.
157. Pedersen A. The functional relation between partial discharges and induced charge / A. Pedersen, G. C. Crichton, I. W. McAllister // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 1995. - Vol. 2. - P. 535-543.
158. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Главный государственный санитарный врач Российской Федерации: Москва, Россия, 2021 г.
159. ГОСТ 12.1.045–84. Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. М.: Стандартинформ, 2006.
160. Zhu Y. Dynamic observation of needle-plane surface discharge using the electro-optical pockels effect / Y. Zhu, T. Takada // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 1996. - Vol. 3, N 3. - P. 460-468.

161. Runge D, Brunken N, Ruter S, Kip D. Integrated optical electric filled sensor based on a brag grating in lithium niobate // *Appl. Physics B*. 2007. V. 86. P. 91-96.
162. Голенищев-Кутузов В.А, Исмагилов И.Р, Калимуллин Р.И, Мигачев С.А, Хасанов А.А. Определение размеров приповерхностных дефектов теневым методом лазерно-акустической спектроскопии // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012. № 5-6. С. 10.
163. Голенищев-Кутузов А.В. Датчик высоких электрических полей на фотонном кристалле / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2019. – Т. 83. – № 1. – С. 125-127.
164. Cheng Pan, Yongpeng Meng, Kai Wu, Zenghui Han, Kai Qin and Yonghong Cheng. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations // *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, N. 25. 2011. 255201.
165. Khalid K., Rohani M., Ismail B., Isa M., Rosmi A., Wooi C. and Yii C. Influence of PD source and AE sensor distance towards arrival time of propagation wave in power transformer // *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1432, 2020, 012006.
166. Gao F., Wang Q., Dai D., Ning W., Zhang Y. and Li L. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020. Vol. 53, N. 34, 345202.
167. Johnatan M. Rodríguez-Serna, Ricardo Albarracín-Sánchez, "A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach", *Polymers*, vol. 1.
168. Pan C., Wu K., Du Y., Tang J., Tao X. T., and Luo Y. Simulation of cavity PD sequences at DC voltage by considering surface charge decay // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 50, no. 20, 205202, Jul. 2017.
169. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020666533 РФ. Моделирование импульса частичного разряда в мостовой схеме регистрации с

- учетом паразитных индуктивностей и емкостей: опуб (зарег.) 11.12.2020 / И. В. Комаров, К. И. Никитин, Д. И. и др. ОмГТУ.
170. Achillides Z. Partial discharge modeling: an advanced capacitive model of void / Z. Achillides, M. E. Kyriakides, G. Danikas // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2019. - Vol. 26, N 6. - P. 1805-1813.
 171. Crichton G. C., Karlsson P. W. and Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids // IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, vol. 24, no. 2, pp. 335-342. doi: 10.1109/14.90292.
 172. Ховатсон А. М. Введение в теорию газового разряда / А. М. Ховатсон; Пер. с англ. И. И. Иванчика. - М. : Атомиздат, 1980. - 182 с. : ил.
 173. Месяц Г. А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах. УФН. Обзоры актуальных проблем 2006. Т.176, №10. с.1069-1091.
 174. Лагарьков А. Н. Волны электрического пробоя в ограниченной плазме / А.Н. Лагарьков, И. М. Руткевич; Академия наук СССР (АН СССР), Институт высоких температур (ИВТ); под ред. А. Н. Старостина. М.: Наука, 1989. 206 с.
 175. Karpov D. I. and Kupershtokh A. L. "Models of streamers growth with "physical" time and fractal characteristics of streamer structures," Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239), 1998, pp. 60.
 176. Morshuis P. H. F. and Kreuger F. H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids // J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 23, no. 12, pp. 1562-1568, Dec. 1990.
 177. Pan C., Tang J., and Wu K. The effect of PD process on the accumulation of surface charges // IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 44, no. 11, pp. 2545-2552, Nov. 2016.
 178. Ran J. Measurement of the first Townsend's ionization coefficients in helium, air, and nitrogen at atmospheric pressure / J. Ran, H. Luo, Y. Yue, X. Wang // Journal of the Physical Society of Japan. - 2014. - Vol. 83 (7). - P. 74503.
 179. Chen H. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method // Expert systems with Application. 2012. №32. P. 3423.

180. Illias H. A., Tunio M. A., Mokhlis H., Chen G., and Bakar A. H. A. Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 22, no. 1, pp. 463-471, Feb. 2015.
181. Adili S., Herrmann L. G., and Franck C. M. Investigating the Inception Mechanism of Pulsed X-ray Triggered Partial Discharges by Time Resolved Measurements // IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 20, no. 5, pp. 1780-1788, Oct. 2013.
182. Pan C., Wu K., Meng Y., Cheng Y., and Tang J. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 24, no. 1, pp. 217-226, Feb. 2017.
183. Jeon S. I., Nam S. H., Shin D. S., Park I. H., and Han M. K. The correlation between partial discharge characteristics and space charge accumulation under ac voltage // IEEE Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom.(CEIDP), 2000, pp. 653-656.
184. Ilkhechi H. D., Samimi M. H., Yousefvand R. Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – T. 113. – C. 906-915.
185. Nikonov V., Bartnikas R. and Wertheimer M. R., "The influence of dielectric surface charge distribution upon the partial discharge behavior in short air gaps," in IEEE Transactions on Plasma Science. 2001. vol. 29, no. 6, pp. 866-874.
186. Пустовойт В. И. Взаимодействие электронных потоков с упругими волнами решетки // УФН, 1969, Т. 97, с. 257–306.
187. Chen G. and Baharudin F. Partial discharge modelling based on a cylindrical model in solid dielectrics // Int. Conf. Condit. Monitor. Diagn. (CMD), 2008, pp. 74-78.
188. Tanaka T. Internal Partial Discharge and Material Degradation // IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-21, no. 6, 1986, pp. 899-905. doi: 10.1109/TEI.1986.348999.
189. Van Brunt R. J., Cernyar E. W. and von Glahn P. Importance of unraveling memory propagation effects in interpreting data on partial discharge statistics // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1993, vol. 28, no. 6, pp. 905-916.

190. Partial discharge mechanisms: Mechanisms leading to breakdown, analyzed by fast electrical and optical measurements / Morshuis, P.H.F. doctoral thesis. Delft. 1993. 170 p.
191. Borghei M., Ghassemi M., Kordi B., Gill P., Oliver D. A Finite Element Analysis Model for Internal Partial Discharges in an Air-Filled, Cylindrical Cavity inside Solid Dielectric / 2021 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2021, pp. 260-263.
192. Negm T. S., Refaey M. and Hossam-Eldin A. A. Modeling and simulation of internal Partial Discharges in solid dielectrics under variable applied frequencies // Int. Mid. East Powe. Syst. Conf. (MEPCON), 2016, pp. 639-644.
193. Illias H. A., Chen G. and Lewin P. L. Partial discharge within a spherical cavity in a dielectric material as a function of cavity size and material temperature // IET Sci. Meas. Technol., vol. 6, no. 4, pp. 52-62, Aug. 2012.
194. Bartnikas R. Partial discharges: their mechanism, detection and measurement // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 9, no. 5, pp. 763-808, Oct. 2002.
195. Govindarajan, S., Natarajan, M., Ardila-Rey, J. A., & Venkatraman, S. (2021). Partial discharge location identification using permutation entropy based instantaneous energy features. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70.
196. Nguyen, P. D., Vo, H. Q., Le, L. N., Eo, S., & Kim, L. (2020). An iot hardware platform architecture for monitoring power grid systems based on heterogeneous multi-sensors†. Sensors (Switzerland), 20(21), 1-21. doi:10.3390/s20216082.
197. Venge, T., & Nyamupangedengu, C. (2021). A review of test voltages used in partial discharge measurements. Paper presented at the IEEE AFRICON Conference, , 2021-September doi:10.1109/AFRICON51333.2021.9570871.
198. Kim S., Kim D.-G., Jung S.-H. and Oh K.-Y. "Diagnostic methods for power transmission lines using a corona camera deployed on a mobility", Proc. PHMAP, pp. 285-287, 2019.

199. Polyakov, D. A., Tereschenko, N. A., Nikitin, K. I., Komarov, I. V., & Polyakova, U. V. Partial discharges characteristics analysis in power transmission lines artificial defects // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1791(1).
200. Polyakov, D. A., Tereschenko, N. A., Bilevich, Y. P., Novoselov, A. S., & Nikitin, K. I. Investigation of partial discharges in supporting insulators // *Proc. of the 2nd 2020 Int. Youth Conf. REEPE 2020, 2020*. doi:10.1109/REEPE49198.2020.9059115.
201. Терещенко Н. А. Разработка диагностического устройства штырьевых изоляторов / Н. А. Терещенко, В. Ю. Мирошник, М. А. Холмов, К. И. НИКИТИН, Б. Н. Коврижин // *Омский научный вестник*. – 2021. – № 3 (177). – С. 70–74.
202. Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service: CIGRE TF 15.11/33.03.02. - Paris, 2003. - (Technical Brochure CIGRE; 226).
203. Zeng H. et al. Partial discharge estimation of jointed high-frequency pulse and ultrasonic signal // *Transducer Microsyst. Technol.* – 2016. – Т. 35. – С. 37-43.
204. Antony, D., & Punekar, G. S. (2018). Noniterative method for combined acoustic-electrical partial discharge source localization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(4), 1679-1688. doi:10.1109/TPWRD.2017.2769159.
205. Altenburger R., Heitz C. and Timmer J. Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 35, no. 11, pp. 1149-1163, Jun. 2002.
206. Rui Zhang, Qiaogen Zhang, Junjie Zhou, Chong Guo, Xiaohui He, Zhicheng Wu, Tao Wen, "Critical study of partial discharge inception in voids: statistical behavior to stochastic nature", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 55, pp. 065501, 2022.
207. Montanari G. C. Random sampling and data processing for PD-pulse height and shape analysis / G. C. Montanari, A. Contin, A. Cavallini // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. - 2000. - Vol. 7, N 1. - P. 30-39.
208. Brunt R. J. Van. Stochastic properties of partial discharge phenomena / R. J. Van Brunt // *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. - 1991. - Vol. 26, № 5. - P. 902-948.

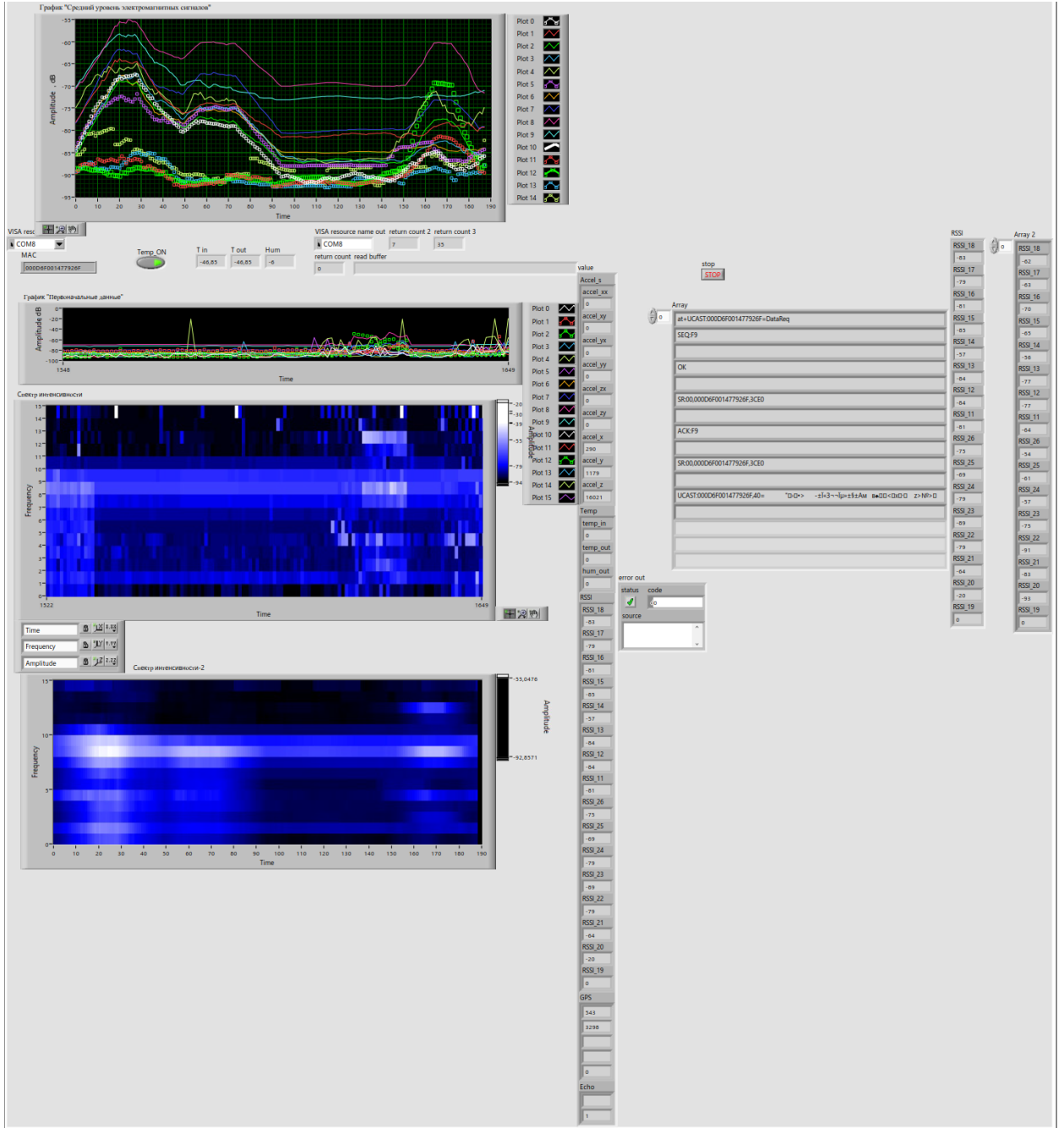
209. Fruth B. The importance of statistical characteristics of partial discharge data / B. Fruth, L. Niemeyer // IEEE Transactions on Electrical Insulation. - 1992. - Vol. 27, №1. - P . 60-69.
210. McCalister I. V. Electric fields and electric insulation / I. V. McCalister // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2002. - Vol. 9, № 5. - P. 672-694.
211. Li P., Zhou W., Yang Sh., Liu Y., Tian Ya., Wang Yo. Method for partial discharge localisation in air-insulated substations // IET Sci. Meas. Technol., 2017, Vol. 11 Iss. 3, pp. 331-338. doi: 10.1049/iet-smt.2016.0251.
212. Sobota A., Kanters J. H. M., van Veldhuizen E. M., Manders F., and Haverlag M. Statistical time lags in AC discharges // J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 44, no. 13, 135203, Apr. 2011.
213. Туржин, А. В. Методы эффективного технического диагностирования оборудования. Ультразвуковой контроль ПС 35-110 кВ. ПАО "МРСК Сибири" // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 3(42). С. 120-123.
214. Phung, B. T., Blackburn, T. R., & Liu, Z. (2001). Acoustic measurements of partial discharge signals. Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, 2001, 21(1), С. 41-47.
215. Ilkhechi, H. D., & Samimi, M. H. Applications of the acoustic method in partial discharge measurement: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1), С. 42-51. doi:10.1109/TDEI.2020.008985.
216. Gryb, O. G., Karpaliuk, I. T., Zaporozhets, A. O., Shvets, S. V., & Rudevich, N. V. (2021). Acoustic diagnostics for determining the appearance of corona discharge doi:10.1007/978-3-030-69752-5_9.
217. Sagunova, I. V., Stroganov, A. A., Losev, V., Gudkov, S. I., & Solnyshkin, A. V. (2020). Acoustic registration of partial discharge in isolation of high-voltage equipment using piezoelectric polymers. Paper presented at the Proceedings of the 2020 IEEE Co.

218. Wang Y., Li X., Gao Y., Zhang H., Wang D. and Jin B., "Partial discharge ultrasound detection using the sagnac interferometer system", *Sensors*, vol. 18, no. 5, pp. 1425, May 2018.
219. Karami, H., Rachidi, F., Azadifar, M., Rubinstein, M. An acoustic time reversal technique to locate a partial discharge source: Two-dimensional numerical validation/ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27(6), 2020, C. 2203-2205.
220. Mutakamihigashi, T., Inoue, S., Okada, S., & Ueno, H. (2020). Development of partial discharge diagnosis method by focusing on ultrasonic frequency. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 599. doi:10.1007/978-3-030-31680-8_62.
221. Ультразвуковой датчик SPU0410LR5H-QB. Техническое описание. URL: <https://www.knowles.com/docs/default-source/model-downloads/spu0410lr5h-qb-revh32421a731dff6ddb37cff0000940c19.pdf> (дата обращения: 07.09.2021 г.).
222. Ультразвуковой датчик Murata MA40S4S/MA40S4R. Техническое описание. URL: https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/ultrasonic/open/datasheet_maopn.ashx (дата обращения: 07.09.2021 г.).
223. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Введ. 2007-01-01. Москва: Стандартинформ, 2006. 15 с.
224. Многофункциональное устройство ввода/вывода данных National Instruments USB6251. Техническое описание. URL: <https://www.ni.com/documentation/en/multifunction-io-device/latest/usb-6251/overview/>.
225. Silverman H. F., Ying Yu, Sachar J. M. and Patterson W. R. "Performance of real-time source-location estimators for a large-aperture microphone array," in *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 13, no. 4, pp. 593-606, July 2005, doi: 10.1.
226. Xie, Q., Huang, H., Liu, D., Zhang, Y., Tao, J., Wang, X. and Lü, F. Method of sparse design based on the dimension reduction technology and the double partial

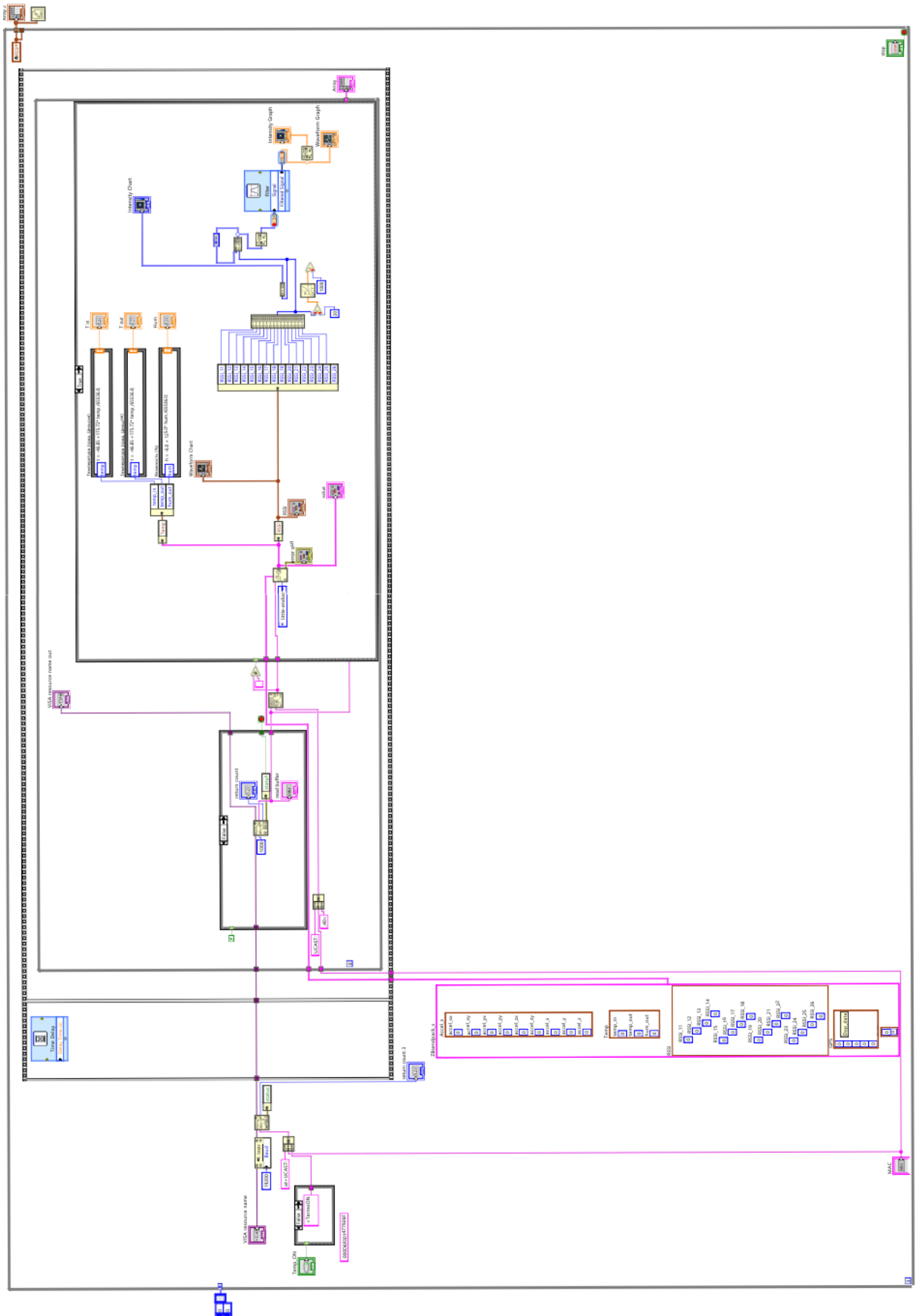
- discharge sources positioning test // IET Sci. Meas. Technol. 2016, 10: 795-804.
<https://doi.or>.
227. Kim D., Kim S., Jeong S., Ham J. -W., Son S. and Oh K. -Y. "Damage Detection With an Ultrasound Array and Deep Convolutional Neural Network Fusion," in IEEE Access, vol. 8, pp. 189423-189435, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032030.
228. Аппарат испытания диэлектриков АИД-70М. Руководство по эксплуатации. URL: <https://www.electronpribor.ru/files/products/aid-70m.pdf>.
229. Florkowski M. Charge dynamics of partial discharges explored applying a chopped sequence // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, 2021. 69 (5), e138817. DOI: 10.24425/bpasts.2021.138817.

Программа обработки диагностической информации, регистрируемой электромагнитным датчиком частичных разрядов

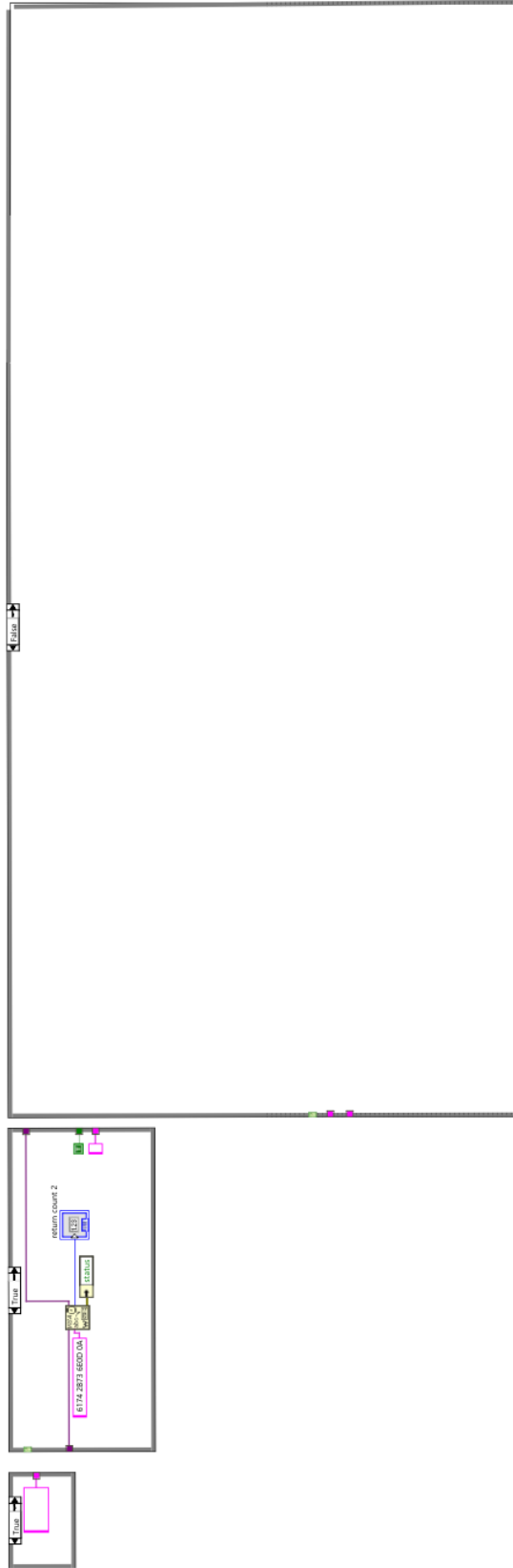
Лицевая панель



Блок-диаграмма

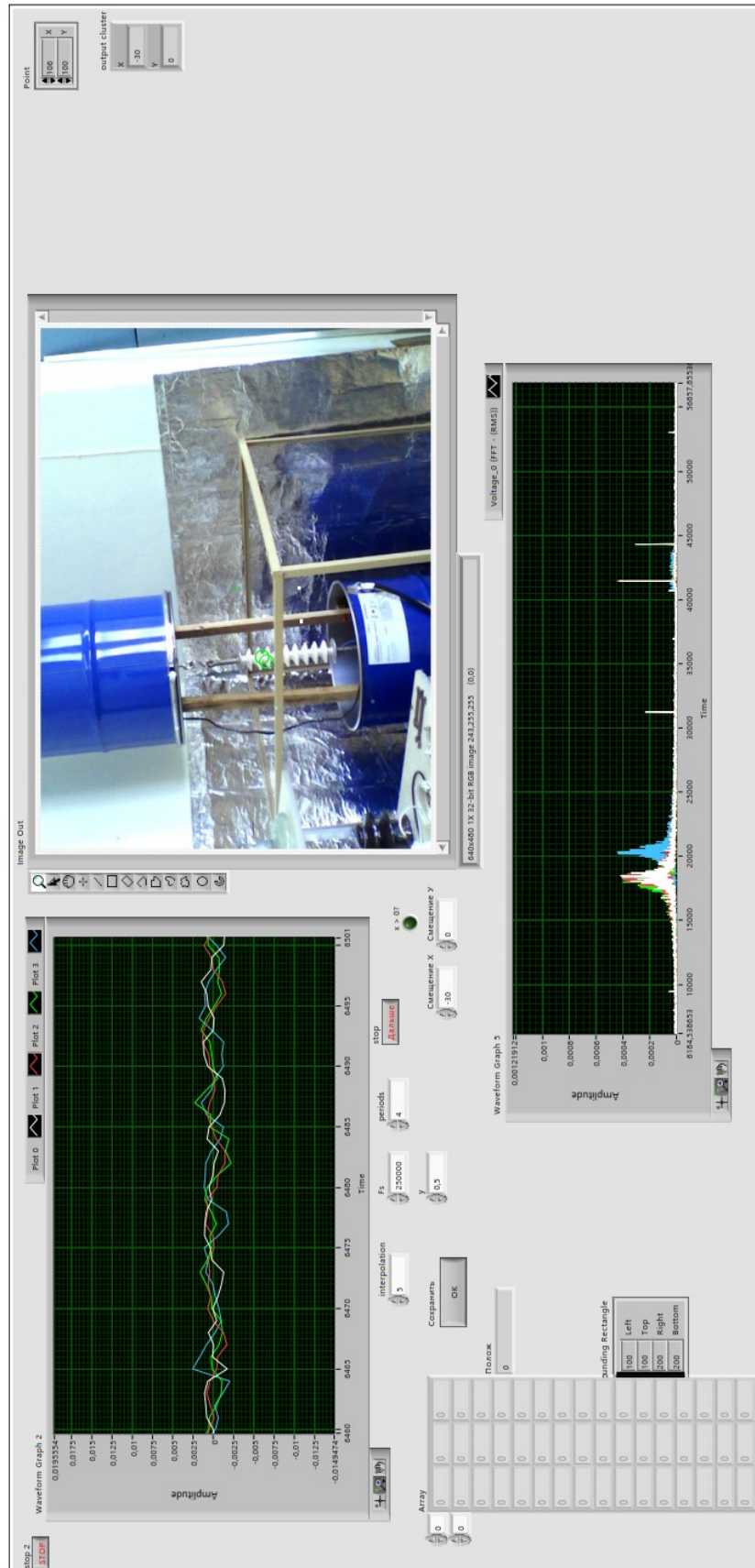


Окончание приложения А

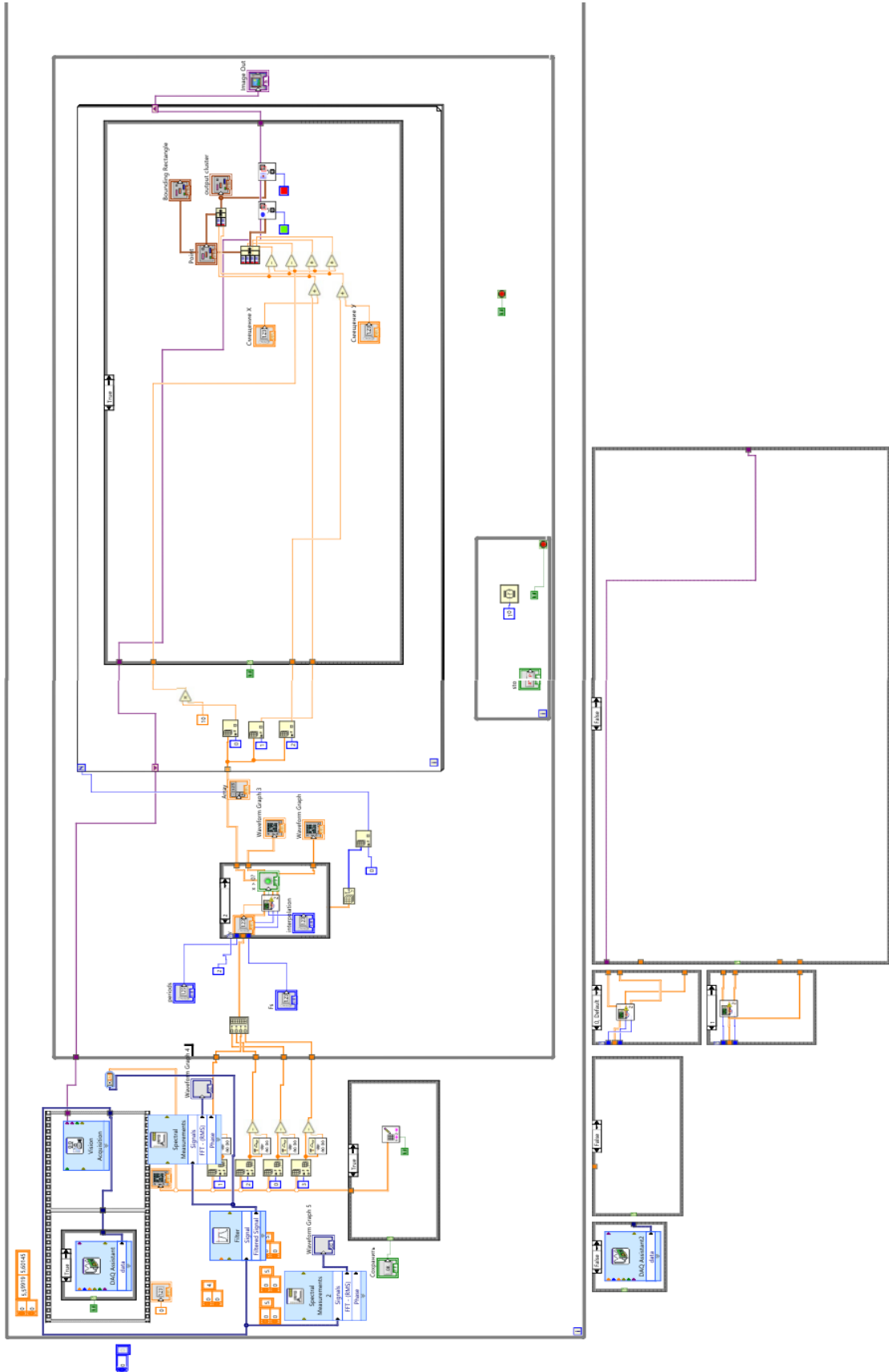


Программа обработки сигналов с акустических датчиков

Лицевая панель

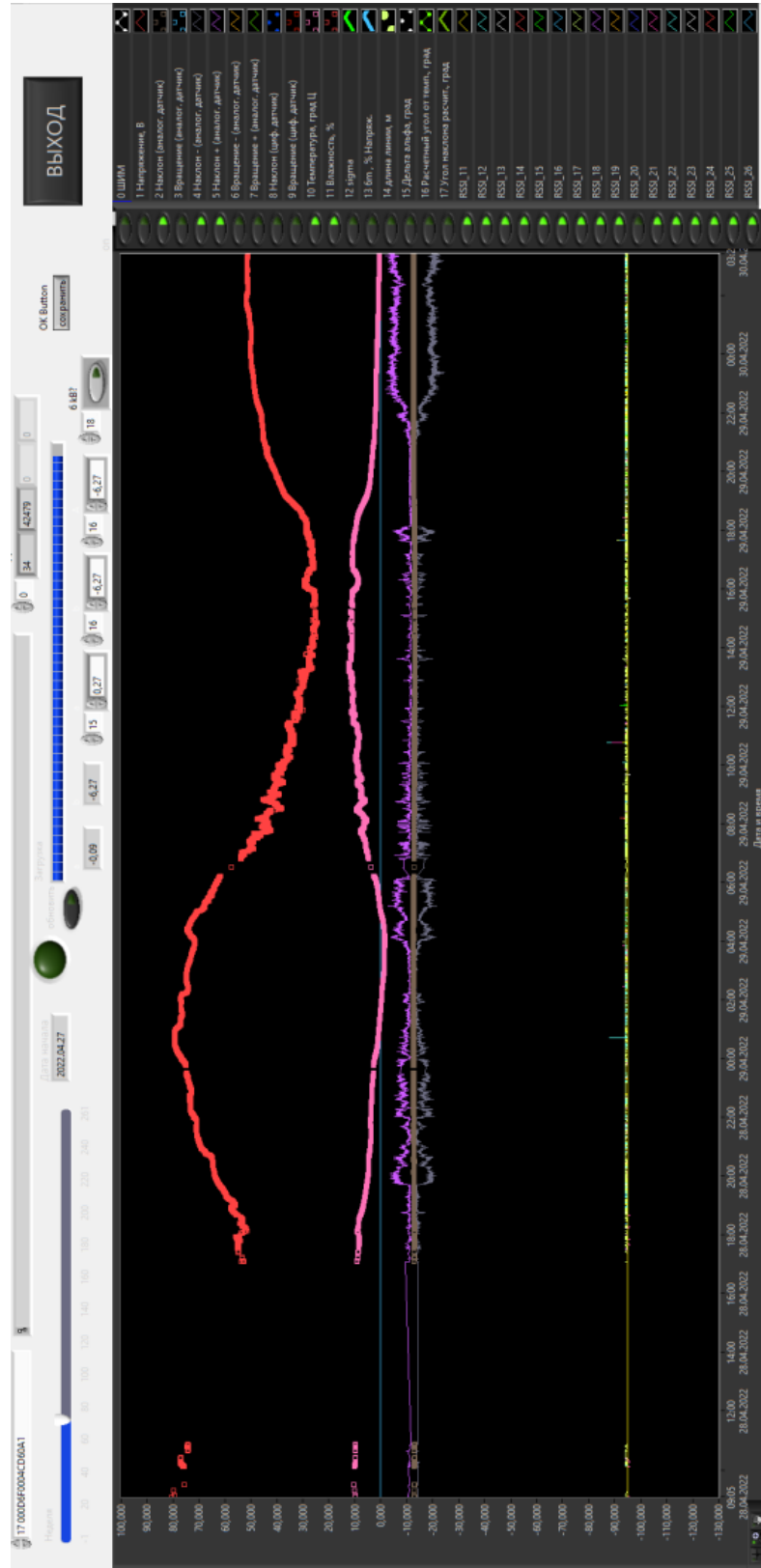


Блок-диаграмма

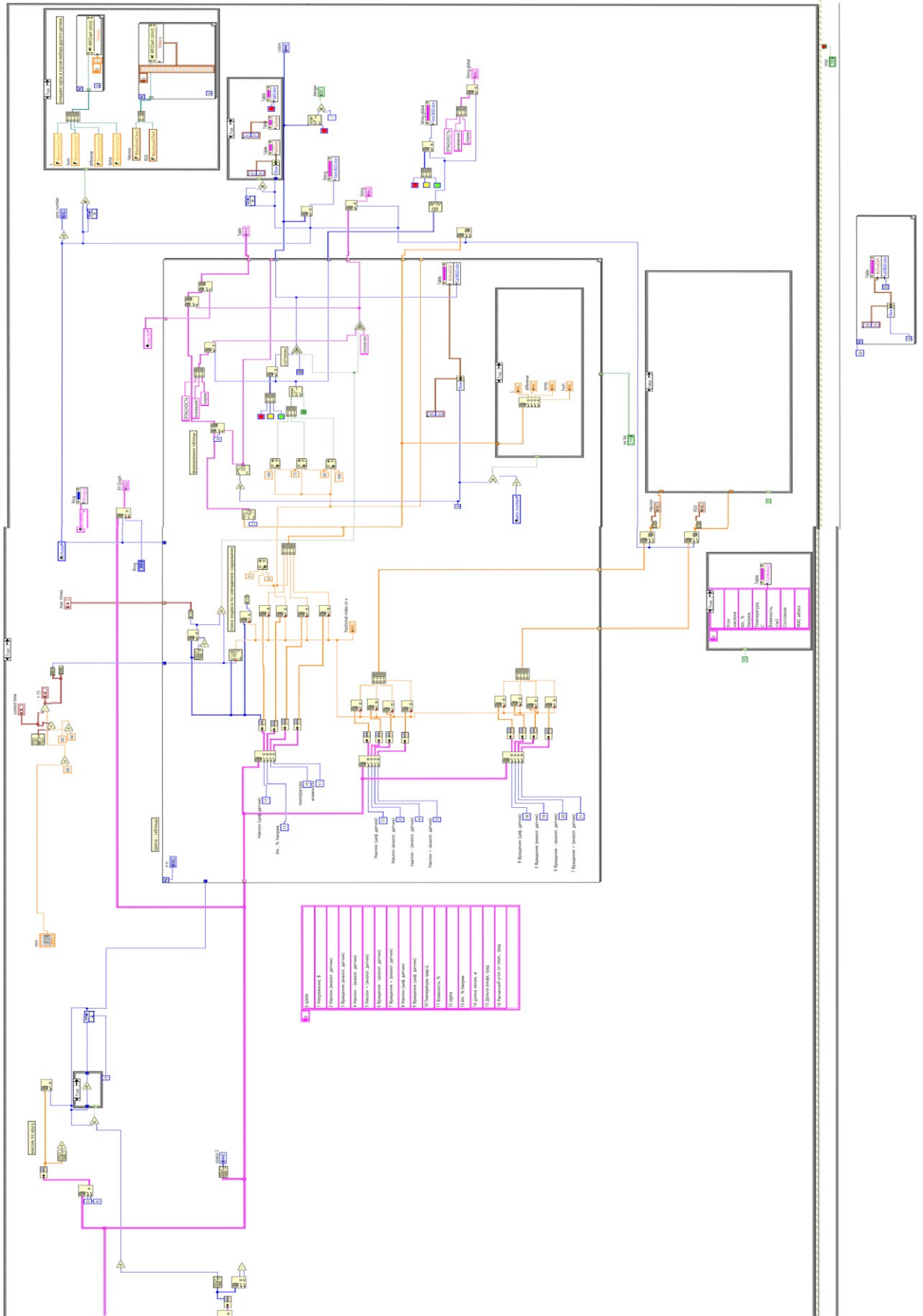


Программа обработки и визуализации для системы автоматического мониторинга
состояния ВЛЭП и подстанций

Лицевая панель

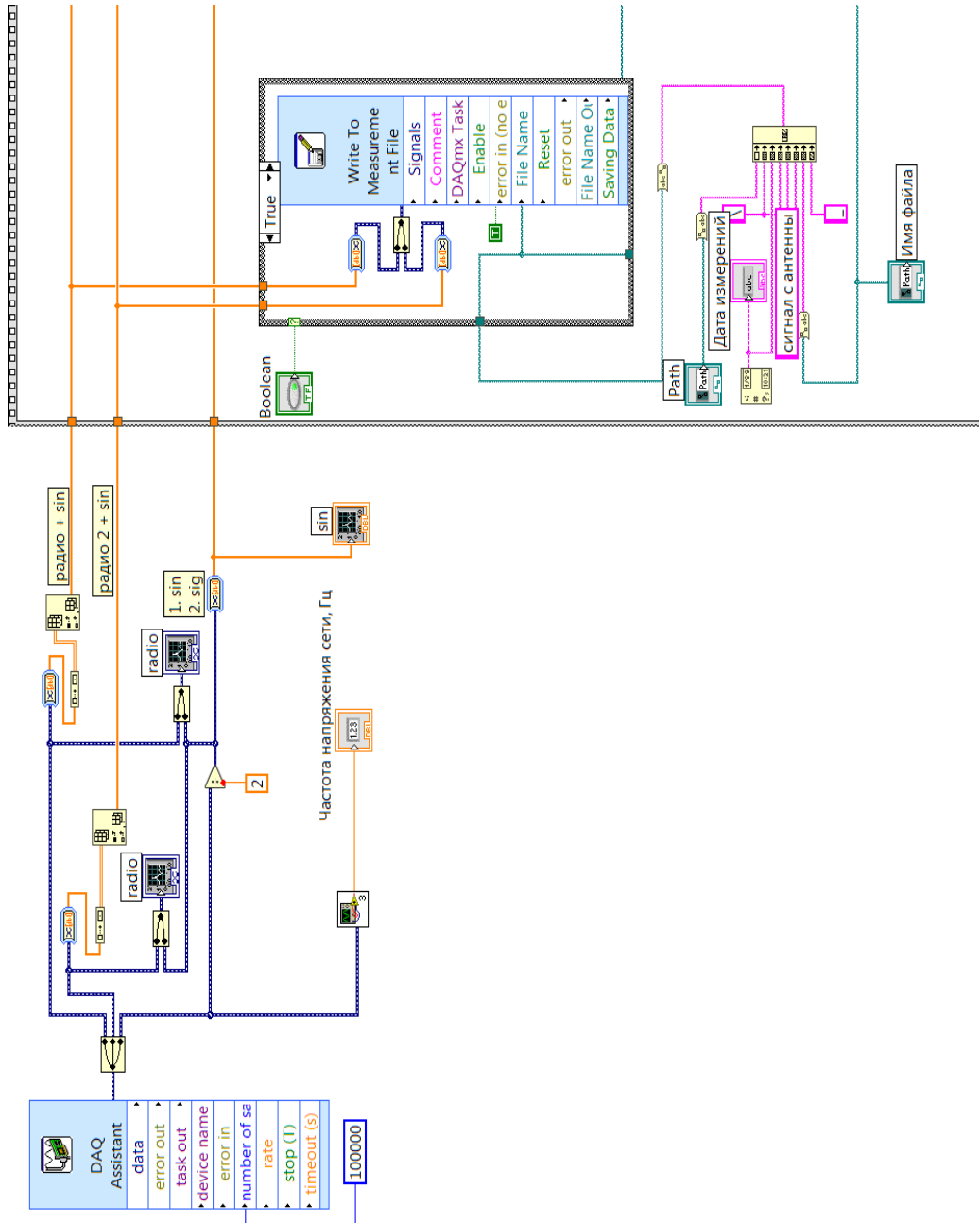


Блок-диаграмма

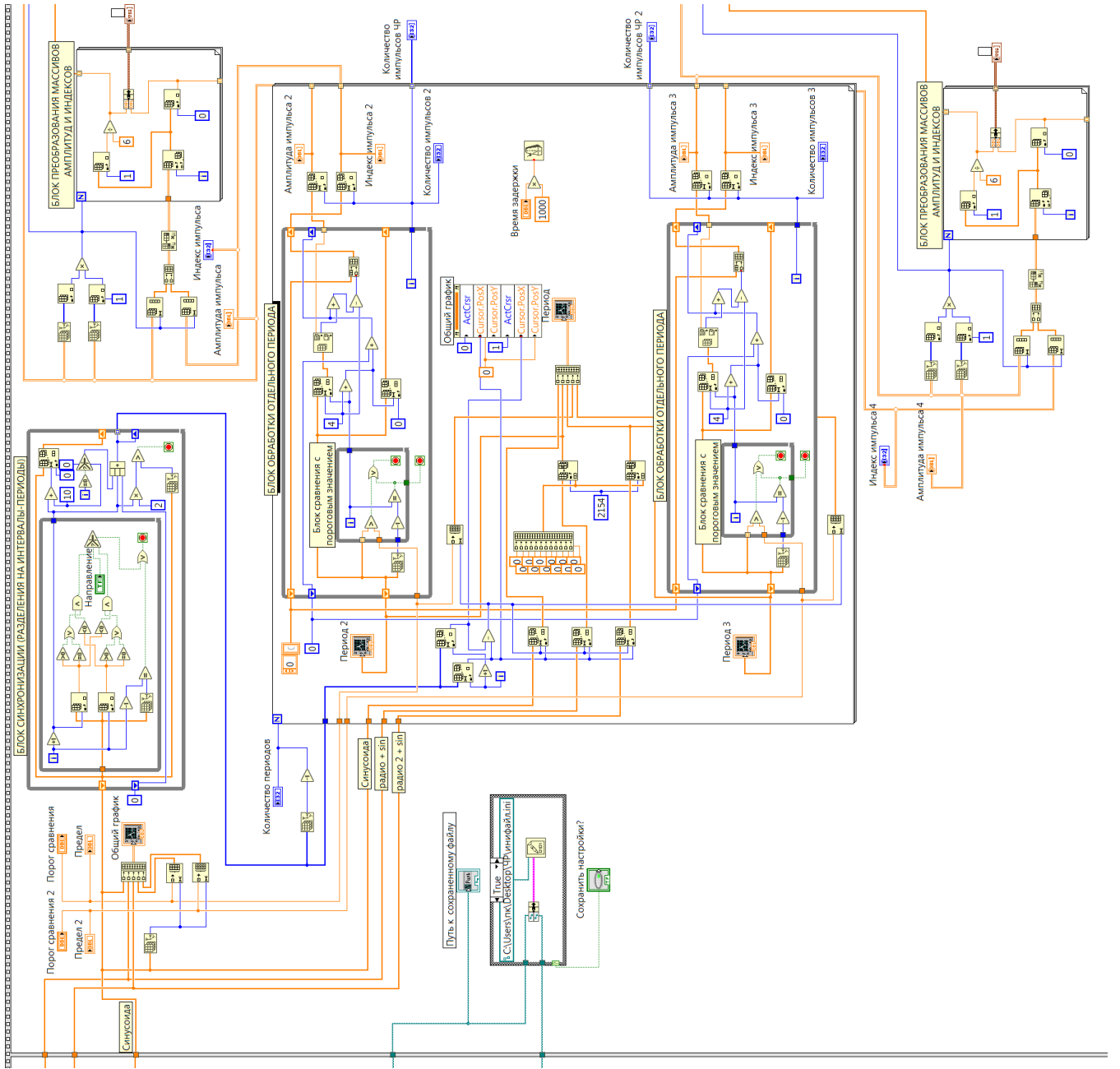


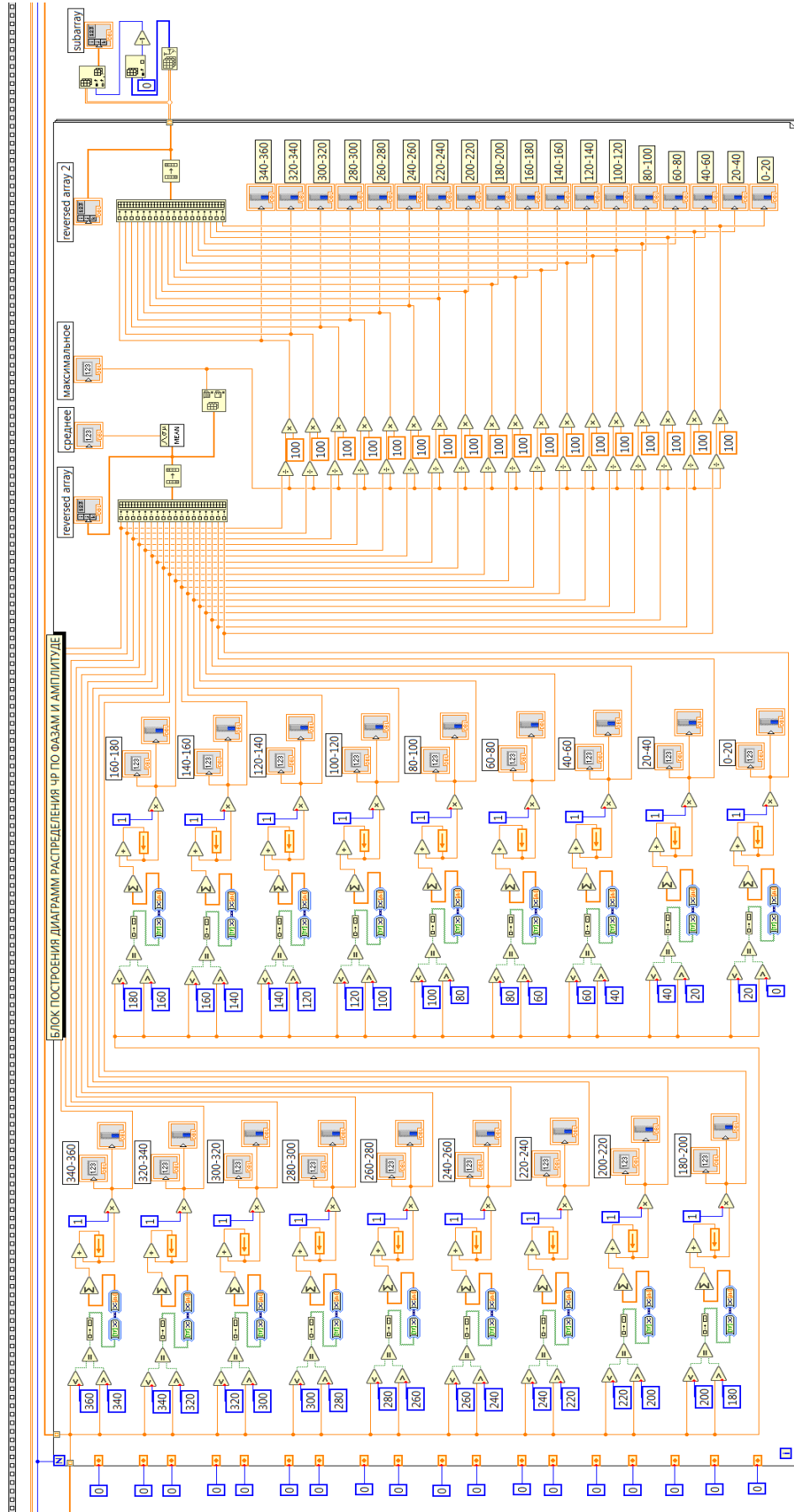
Программа обработки и визуализации для системы автоматического мониторинга
состояния ВЛЭП и подстанций

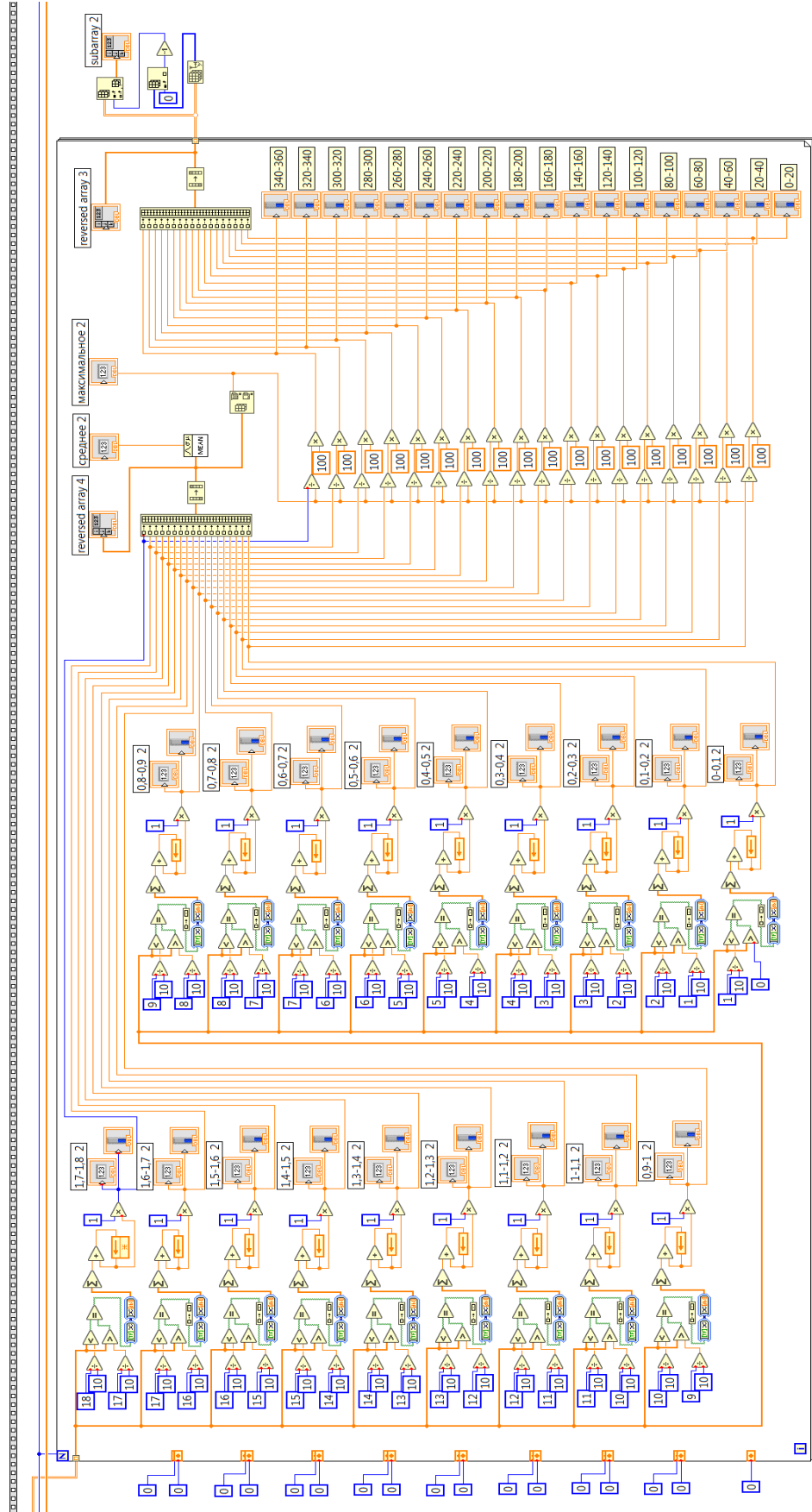
Блок-диаграмма

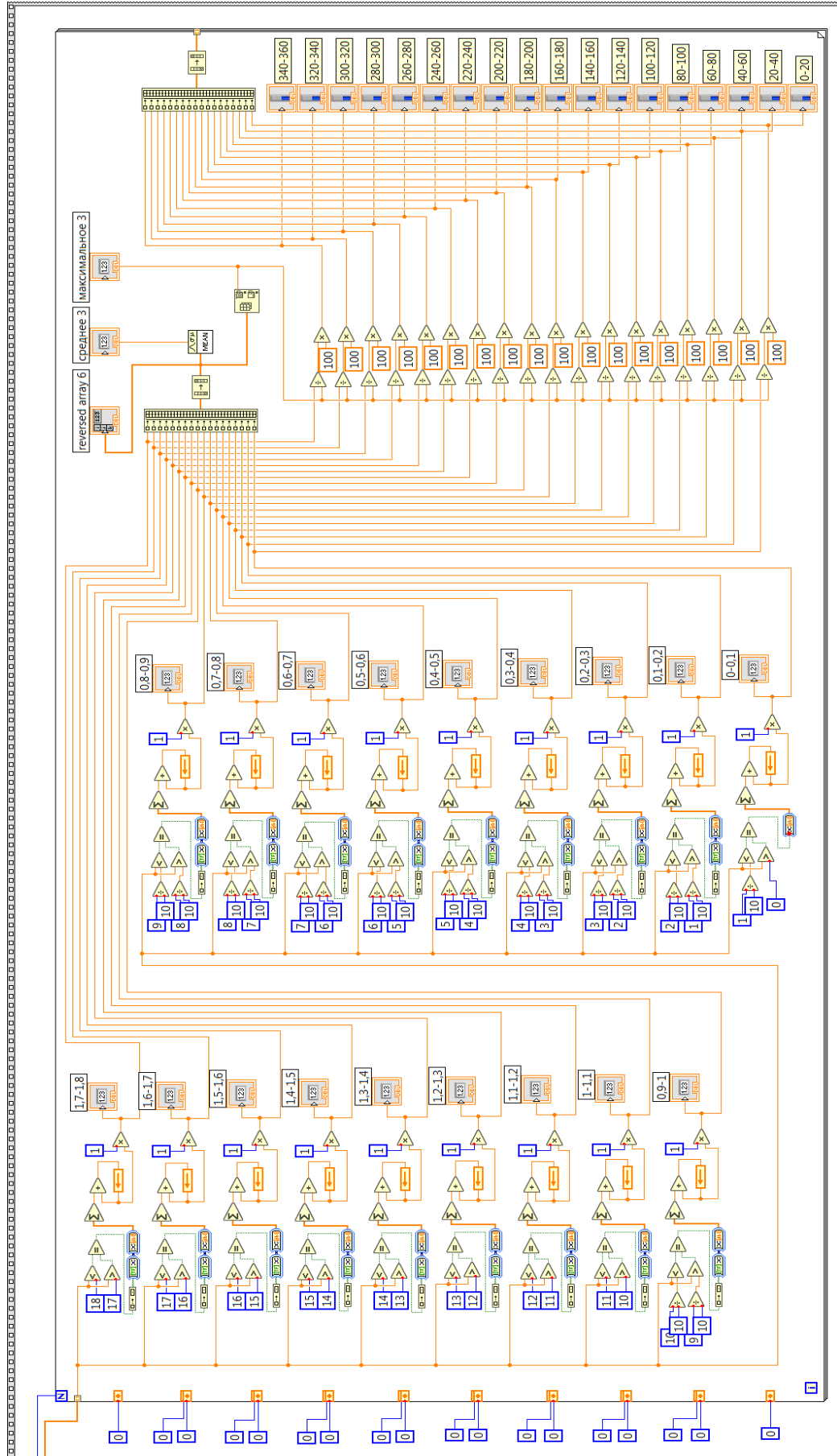


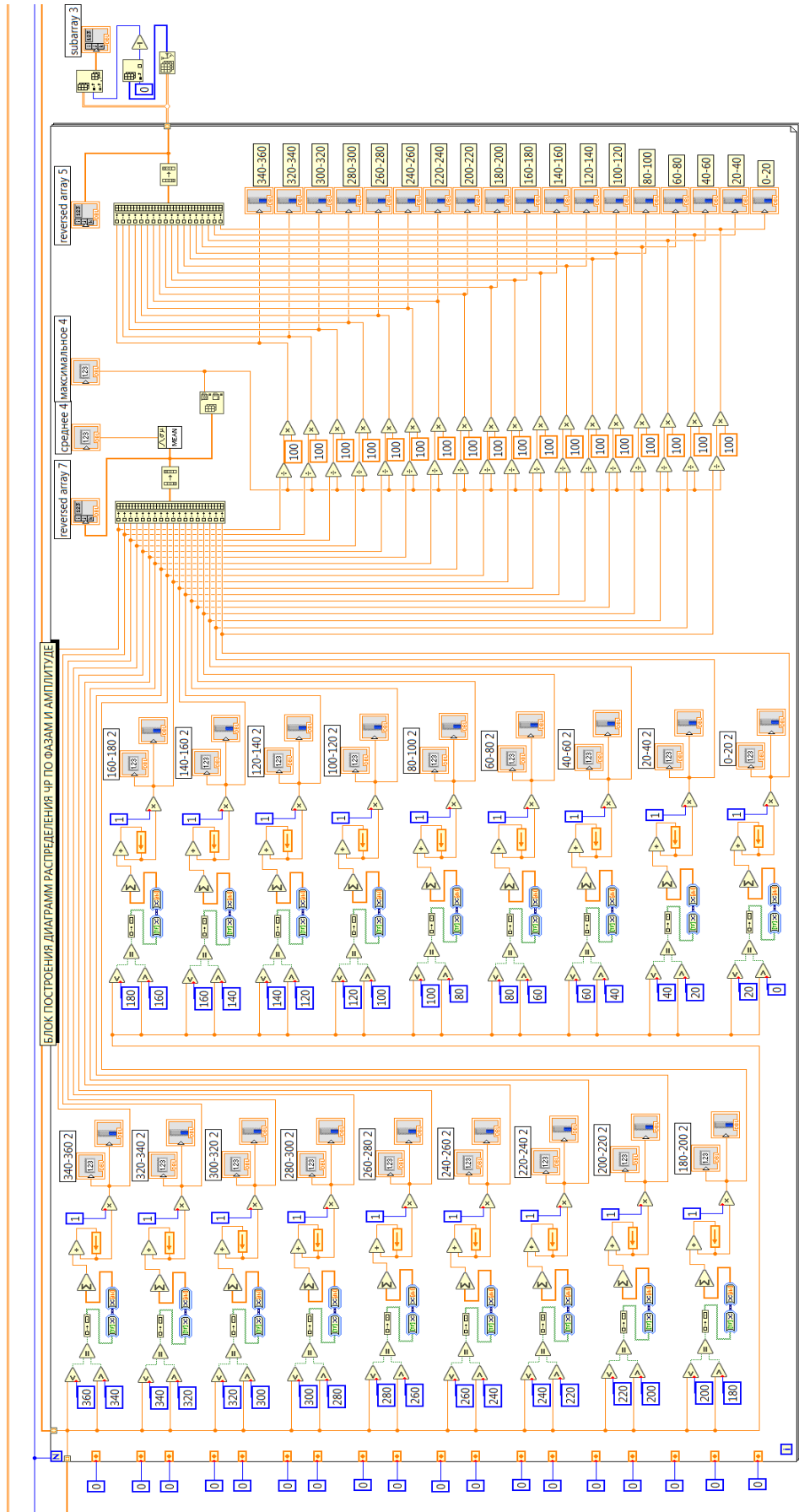
продолжение приложения Г

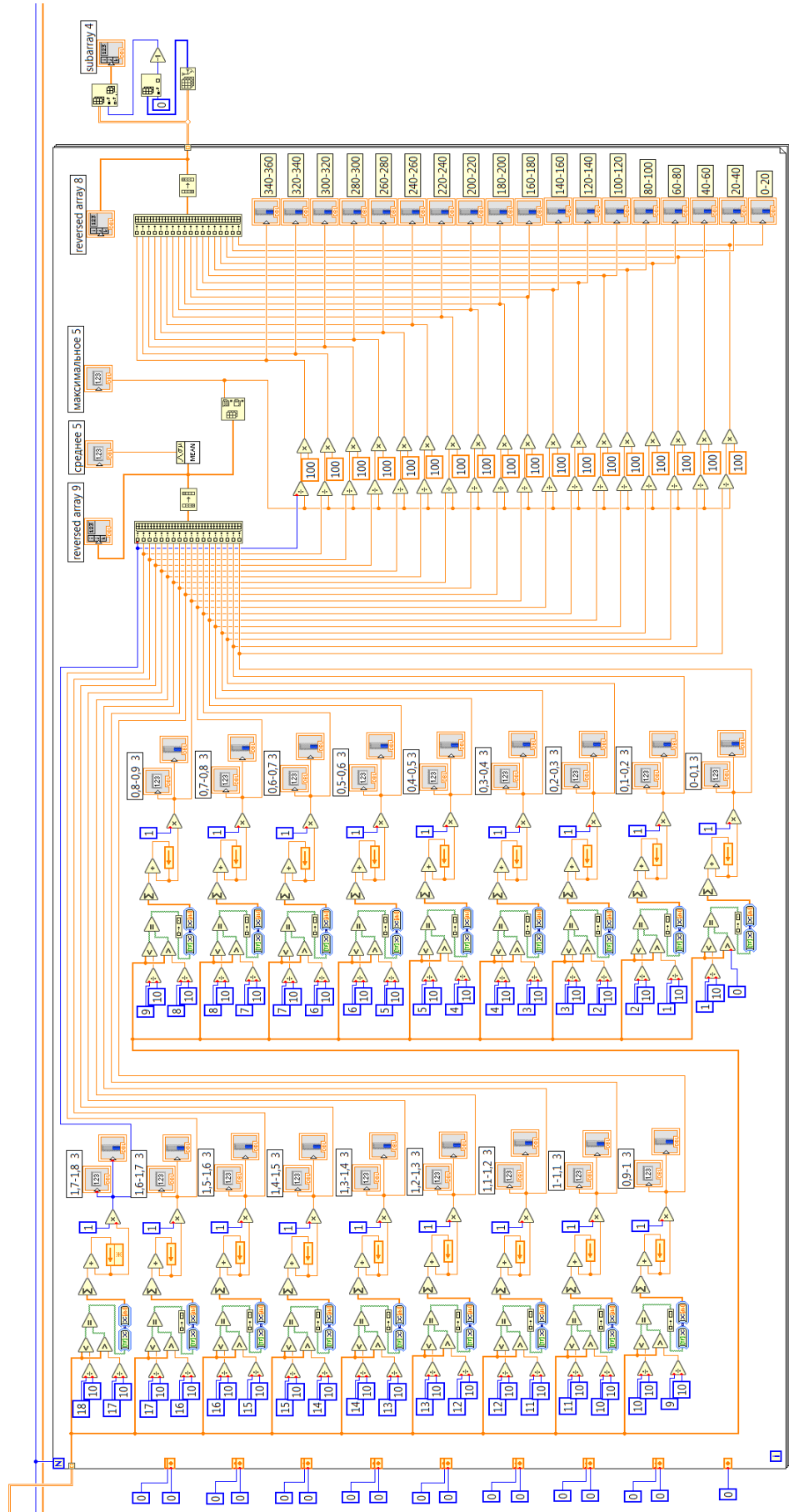


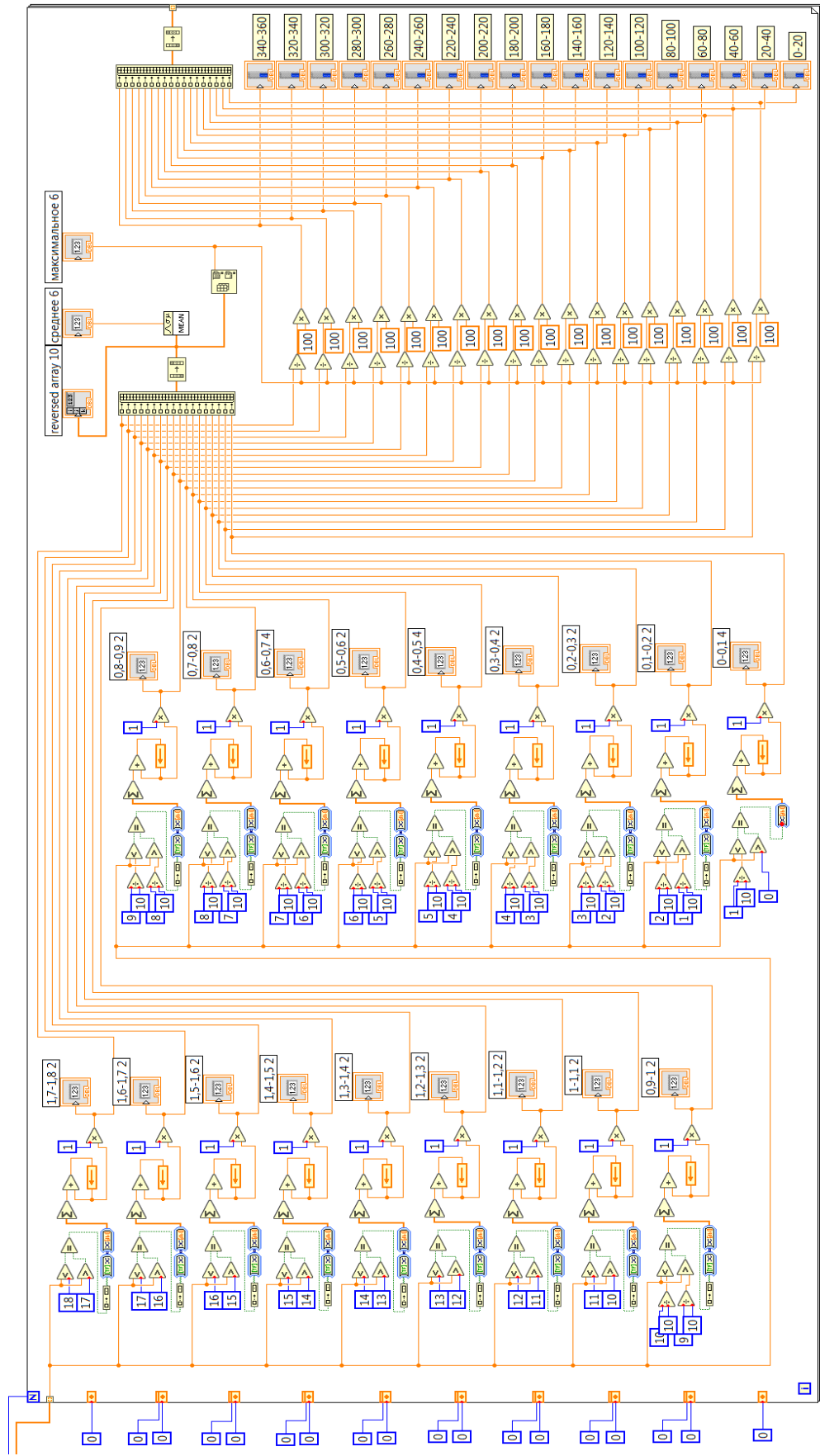












Акт о внедрении результатов диссертации


 УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по науке и
 коммерциализации, д.т.н., проф.
 _____ И.В. Ившин
 « 15 » _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении в научно-исследовательскую деятельность
 результатов диссертации Иванова Дмитрия Алексеевича
 «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного
 диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на
 основе анализа характеристик частичных разрядов»

Комиссия в составе проректора по науке и коммерциализации, д.т.н., проф. И.В. Ившина, заведующего научно-исследовательской лабораторией «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов электроэнергетики», д.т.н., проф. М.Ф. Садыкова, начальника Управления научных исследований, инноваций и разработок, к.т.н. И.З. Гатиятова составила настоящий акт о том, что при выполнении научных исследований и разработок в научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг технического состояния и повышение надежности объектов электроэнергетики» применялись наработки и результаты диссертационного исследования Иванова Дмитрия Алексеевича:

- Методики периодического комплексного дистанционного измерения характеристик частичных разрядов и напряженностей электрических полей для оценки технического состояния высоковольтных изоляторов.

- Испытательный стенд для определения и анализа характеристик диагностических параметров высоковольтных диэлектрических материалов и элементов.

- Комплексный метод обнаружения вида, места расположения и роста дефектов высоковольтных изоляторов, и регистрации набора характеристик частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками.

Заведующий НИЛ



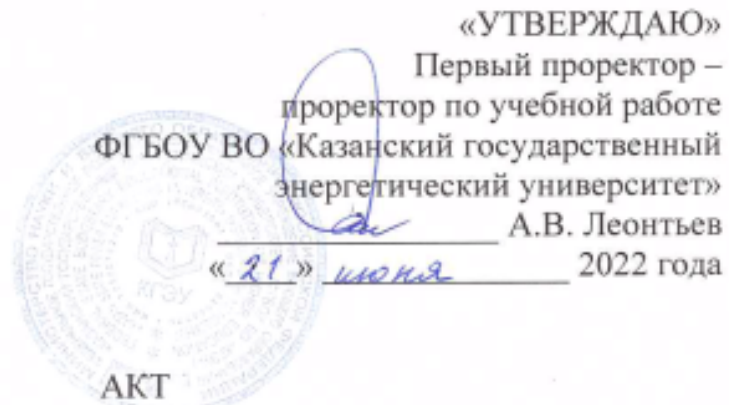
М.Ф. Садыков

Начальник УНИР



И.З. Гатиятов

Акт о внедрении результатов диссертации



о внедрении результатов диссертационной работы Иванова Д.А.
 «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного
 диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на
 основе анализа характеристик частичных разрядов» в учебный процесс

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы доцента Иванова Д.А. на тему «Методология и аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации на основе анализа характеристик частичных разрядов» внедрены в учебный процесс кафедры «Промышленная электроника» и используются при проведении практических работ в рамках дисциплин «Физические принципы неразрушающего контроля» и «САПР в электронике» подготовки магистров по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника», лабораторных работ в рамках дисциплины «Инженерное проектирование с применением САПР» подготовки бакалавров по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

Использование указанных результатов позволило повысить качество образовательного процесса.

Заведующий кафедрой
 «Промышленная электроника»,
 д.ф.-м.н., профессор

А.В. Голенищев-Кутузов

И.о. директора Института
 электроэнергетики и электроники,
 к.т.н.

Р.В. Ахметова

Акт о внедрении результатов диссертации

УТВЕРЖДАЮ
Главный специалист ОЭиЭ
Управления энергетики ПАО «Татнефть»
_____ Р.Р. Мухаметдинов
« ____ » _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении и практическом использовании результатов разработки сотрудников КГЭУ Ярославского Данила Александровича, Иванова Дмитрия Алексеевича, Садыкова Марата Фердинантовича, Галиевой Татьяны Геннадьевны – системы автоматического мониторинга состояния ВЛЭП и подстанций на основе собственных аппаратных разработок

В рамках выполнения работ по договору №0002/52/63 06.04.2020 г. «Разработка и внедрение приборов и методики по слежению за техническим состоянием оборудования подстанций 110/35/6 кВ» на ПС 35/6 кВ №204 ПАО «Татнефть» разработаны датчики гололедообразования, температуры и регистрации высокочастотных разрядов, которые установлены на воздушные линии электропередач и ПС. Внедрены в опытную эксплуатацию датчик контроля провиса провода, датчик частичных разрядов, датчик температуры шин и токопроводов. Реализована система мониторинга технического состояния ПС с контролем следующих диагностических параметров, необходимых для оценки технического состояния оборудования:

- контроль гололедообразования;
- контроль температуры провода;
- контроль температуры токопровода разъединителя;
- регистрация высокочастотных разрядов;
- контроль относительной влажности и температуры окружающей среды.

Диагностические параметры регистрируются и анализируются в режиме реального времени для определения технического состояния оборудования подстанции. Контроль состояния изоляции на основании регистрации и анализа частичных разрядов позволяет определить тип дефекта в изоляции, оценить степень опасности выявленного дефекта для дальнейшей эксплуатации трансформатора.

Ответственный за внедрение:
Заместитель директора по развитию сетей
ООО «Татнефть-Энергосбыт»

Гимадиев Р.А.

окончание приложения Ж

Лист согласования к документу № 54/Орд от 08.04.2022
 Инициатор согласования: Хазиев И.Н. Начальник отдела энергоэффективности
 Согласование инициировано: 08.04.2022 13:53

Лист согласования			Тип согласования: смешанное	
№	ФИО, должность	Передано на визу	Срок согласования	Результат согласования
Тип согласования: параллельное				
1	Хазиев И.Н., Начальник отдела энергоэффективности	08.04.2022 - 14:04		Согласовано 08.04.2022 14:04:47
2	Гимадиев Р.А., Заместитель директора по развитию сетей	08.04.2022 - 14:04		Согласовано 08.04.2022 14:08:42
Тип согласования: последовательное				
3	Мухаметдинов Р.Р., Главный специалист отдела энергообеспечения и энергоэффективности Управления энергетики	08.04.2022 - 14:08		Подписано 08.04.2022 14:33:33