

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет»

На правах рукописи



Моногаров Олег Игоревич

Повышение эффективности производства кабельной продукции на основе  
управления с использованием экспертных подходов

Специальность 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (технические науки)»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата

технических наук

Научный руководитель  
д.т.н., профессор, Жигалов И.Е.

Тверь – 2021

## Оглавление

Введение .....	4
Глава 1. Современное состояние и проблемы производства кабелей.....	11
1.1. Система производства кабельной продукции.....	11
1.2. Процесс наложения электрической изоляции и образование опасных микродефектов в её структуре.....	19
1.3. Управление и контроль процесса наложения электрической изоляции .....	26
1.4. Образование частичных разрядов в кабельной изоляции.....	38
1.5. Система регистрации сигналов частичных разрядов .....	43
1.6. Анализ сигналов частичных разрядов.....	50
1.7. Выводы по первой главе .....	55
Глава 2. Разработка логико-математического аппарата, алгоритмов и информационно-аналитических структур управления производством кабельной продукции.....	57
2.1. Модель интеллектуальной системы поддержки принятия решений.....	57
2.1.1. Архитектура и задачи системы поддержки принятия решений.....	57
2.1.2. База знаний.....	63
2.1.3. Машина нечёткого логического вывода.....	67
2.1.4. Компонент обучения .....	73
2.1.5. Компонент анализа альтернатив.....	78
2.1.6. Компонент оценки полезности .....	80
2.1.7. Компонент оценки вероятностей.....	81
2.2. Разработка математического аппарата алгоритма селекции сигналов частичных разрядов .....	86
2.2.1. Процессная схема алгоритма .....	86
2.2.2. Байесовский критерий оптимального обнаружения.....	89
2.2.3. Подготовка входных данных .....	90
2.2.4. Моделирование импульса частичного разряда.....	95

2.2.5. Определение порога обнаружения .....	100
2.2.6. Оценка вероятности ошибки селекции импульсов.....	105
2.3. Выводы по второй главе .....	107
Глава 3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения.....	108
3.1. Алгоритм регулирования параметров технологического процесса и аппаратно-программная платформа разработанных информационно-аналитических решений.....	108
3.2. Алгоритмы системы поддержки принятия решений.....	113
3.2.1. Алгоритм модуля диагностики .....	113
3.2.2. Алгоритм модуля оптимизации .....	115
3.3. Алгоритм селекции сигналов частичных разрядов .....	118
3.4. Выводы по третьей главе .....	122
Глава 4. Экспериментальное исследование разработанных информационно-аналитических решений.....	123
4.1. Выбор критериев однородности выборок.....	123
4.2. Исследование функционирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений.....	127
4.2.1. Исследование функционирования модуля диагностики .....	127
4.2.2. Исследование функционирования модуля оптимизации .....	128
4.3. Исследование функционирования алгоритма селекции сигналов частичных разрядов .....	130
4.4. Оценка повышения эффективности производства кабельной продукции. 135	
4.5. Выводы по четвёртой главе .....	139
Заключение .....	140
Список литературы .....	141
Приложение А. Результаты обработки экспертной информации .....	154
Приложение Б. Результаты экспериментальных исследований.....	158
Приложение В. Акты внедрения результатов диссертационного исследования . 165	
Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации программ.....	168

## Введение

### **Актуальность.**

В настоящее время в сфере производства кабельно-проводниковой продукции на территории РФ работает более 100 больших и малых предприятий [1-3]. Помимо отечественных производителей на внутреннем рынке после вступления России во Всемирную торговую организацию наблюдается увеличение потока кабельной продукции из стран Юго-Восточной Азии, что ещё больше обостряет конкуренцию. В данных условиях особое значение приобретает вопрос повышения эффективности производства кабельной продукции. Существует достаточно много подходов к определению эффективности производства, призванных учитывать всё многообразие реальных процессов и явлений [4]. В ГОСТ Р 56404-2015 «Бережливое производство. Требования к системам менеджмента» эффективность представляется как комплексный показатель, зависящий от таких факторов, как безопасность производства, производственные риски, затраты и объёмы производства, и пр. [5]. Применительно к нашей работе нет необходимости рассматривать столь большое число факторов, поэтому остановимся на таких показателях, как производительность, производственные затраты (издержки) и соответствие продукции, предъявляемым к ней техническим требованиям.

Отметим, что выполнение технических требований нормативных документов сопряжено с существенными экономическими издержками, образующимися как при постановке в производство новых изделий, так и в процессе производства, когда в результате изменения условий производства технические характеристики изделий могут выходить за допустимые рамки. Наибольшую проблему составляют многочисленные микродефекты в изоляционных конструкциях, степень развития которых связана, в основном, с генерируемыми ими частичными разрядами под воздействием на изоляцию электрического напряжения. Регистрация сигналов частичных, как правило,

сопряжена с возникновением ошибок наложения импульсов, что часто приводит к завышению в изоляции уровня частичных разрядов. Ошибки наложения импульсов являются мощным источником грубых погрешностей и в большинстве случаев не могут быть отсеяны статистическими методами, так как число измерений в выборке с ошибками данного типа слишком велико, что вызывает необходимость в разработке специальных алгоритмов цифровой обработки измерительной информации.

Диагностика причины образования микродефектов и регулирование степени их развития является нетривиальной задачей, связанной с адаптацией состояния (режима функционирования) технологического процесса (ТП) к условиям производства, что влечёт за собой образование дополнительных затрат на производство опытных образцов кабеля и резервирование производственной линии. В то же время выполнение технических требований к кабельным изделиям является обязательным условием, гарантирующим их безопасную и длительную эксплуатацию в нормальном режиме.

Помимо экономических издержек следствием регулирования параметров ТП в некоторых случаях становится снижение производительности, что также плохо отражается на эффективности производства и требует выработки более эффективных решений относительно значений, принимаемых параметрами ТП. Ещё большее значение данное обстоятельство приобретает в условиях возрастающей роли производительности ТП для устойчивого развития предприятий в период, начиная с 2020 г. [6].

Таким образом, считаем, что разработка моделей, алгоритмов и иных информационно-аналитических решений в части управления ТП, связанной с диагностикой причин и определением степени развития микродефектов в кабельной изоляции, а также с принятием решений относительно значений параметров регулирования ТП, является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность производственной деятельности.

#### **Объект исследования.**

Объектом исследования является технологический процесс производства

кабельно-проводниковой продукции.

**Предметом исследования** является система управления технологическим процессом производства кабельно-проводниковой продукции.

### **Степень разработанности темы.**

Вопросам регулирования параметров ТП и уменьшения степени развития микродефектов в кабельной изоляции посвящено множество научных трудов, касающихся технологии производства кабелей, диагностики причин образования микродефектов и способов их устранения. Однако, к сожалению, в них мало внимания уделяется использованию современных подходов, моделей и алгоритмов в процессе обработки и формализации информации, решения слабо структурированных или неструктурированных задач, с которыми ежедневно приходится сталкиваться работникам промышленных предприятий. По-прежнему крайне низким остаётся уровень внедрения интеллектуальных систем в процессы управления ТП и принятия решений, что снижает их общую эффективность.

В настоящем исследовании также были использованы работы, касающиеся обнаружения и определения степени опасности присутствующих в изоляции кабелей микродефектов на основе метода частичных разрядов. В них описываются физические основы метода, способы регистрации сигналов частичных разрядов в кабельной изоляции и способы обработки полученных данных. При этом следует отметить недостаточное освещение проблемы наложения импульсов частичных разрядов друг на друга в процессе измерений, что способно существенно исказить результаты регистрации и привести к принятию ошибочных решений относительно регулирования параметров ТП.

### **Цели и задачи.**

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности производства силовых высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 6 – 35 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать интеллектуальную систему поддержки принятия решений (СППР), оказывающую информационно-аналитическую поддержку в процессе

управления ТП на основе регулирования целевых значений его параметров, которая позволила бы, во-первых, снизить затраты на диагностику причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции, а, во-вторых, повысить производительность процесса её наложения.

2. Разработать алгоритм селекции (обнаружения и выделения) сигналов частичных разрядов, позволяющий снизить влияние грубых погрешностей (ошибок наложения импульсов) на результаты измерений, что способствовало бы снижению затрат в процессе определения целевых значений параметров ТП.

3. Разработать программное обеспечение (ПО), реализующие информационно-аналитические решения под пунктами 1, 2, и

4. Провести экспериментальное исследование разработанных алгоритмов и систем.

#### **Научная новизна.**

Научную новизну представляют следующие результаты диссертации:

Научную новизну представляют следующие результаты диссертации:

1. Модель машины нечёткого логического вывода с базой знаний и механизмом обучения, выполняющая формализацию оценок правдоподобия возможных причин микродефектов по имеющемуся набору признаков.

2. Алгоритм оценки вероятностей невыполнения требований к техническим характеристикам кабельной продукции, основанный на анализе возможных траекторий системы.

3. Алгоритм селекции сигналов частичных разрядов, устойчивый к ошибкам наложения импульсов.

#### **Практическая значимость работы.**

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны алгоритмы и ПО интеллектуальной СППР, оказывающей поддержку при решении задач диагностики причин образования микродефектов в изоляции кабелей и определения оптимальных значений параметров ТП.

2. Разработаны алгоритмы и ПО, позволяющие производить устойчивую к ошибкам наложения селекцию сигналов частичных разрядов.

### **Методы исследования.**

Для разработки интеллектуальной части СППР использовался метод экспертных оценок. Разработка остальных компонентов системы производилась с помощью аналитических и статистических методов, теории принятия решений, методов дискретной математики и теоретико-множественных представлений, обеспечивающих требуемую функциональность и логическую взаимосвязанность компонентов системы. Дополнительно, для разработки алгоритма селекции сигналов частичных разрядов использовались методы теории обнаружения сигналов.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Разработанные в составе СППР алгоритмы и модели позволяют более эффективно диагностировать причину образования опасных микродефектов в кабельной изоляции и определять оптимальные значения параметров ТП, что снижает затраты и увеличивает производительность производственного процесса.

2. Разработанный алгоритм селекции сигналов частичных разрядов позволяет снизить влияние грубых погрешностей (ошибок наложения импульсов) на результаты измерений, что уменьшает число ошибочных воздействий в процессе определения целевых значений параметров регулирования ТП, – сокращаются соответствующие операционные затраты.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность разработанных информационно-аналитических решений.

### **Степень достоверности.**

Достоверность и обоснованность результатов и выводов настоящей научной работы подтверждаются преимуществом применения методов по организации интеллектуальных систем и формализации экспертных знаний, методов теории принятия решений, методов регистрации и анализа измерительной информации, следованием указаниям нормативно-технической документации в области испытания кабельной изоляции, проведением экспериментальной части исследования в условиях действующего предприятия на современном испытательном оборудовании, воспроизводимостью проводимых экспериментов

и использованием современных средств разработки ПО.

Разработанное по результатам диссертационной работы ПО внедрено в производственный процесс предприятий кабельной промышленности, – АО «Электрокабель» Кольчугинский завод» и ООО «Сарансккабель».

#### **Апробация результатов.**

Основное содержание и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийской НПК «Череповецкие научные чтения – 2012», Череповец, 2012; XLVI международной НПК «Наука и современность – 2016», Новосибирск, 2016; международной НПК «Научное обеспечение технического и технологического прогресса», Магнитогорск, 2018; XII международной НПК «European Scientific Conference», Пенза, 2018; международной НПК «Информационно-вычислительные технологии и их приложения», Пенза, 2019; IX всероссийской конференции с международным участием «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии», Оренбург, 2019.

Список публикаций, содержащий основные положения, выводы и практические результаты по теме диссертации включает 14 научных трудов, в том числе 5 научных статей, опубликованных в изданиях перечня ВАК, 6 материалов научных конференций, 1 патент на изобретение и 2 сертификата о регистрации программы для ЭВМ.

#### **Объём и краткое содержание работы.**

Общий объём работы – 169 страниц, диссертационная работа изложена на 153 страницах, иллюстрируется 34 рисунками и 11 таблицами, и содержит раздел приложений объёмом 16 страниц с 8 таблицами.

Первая глава посвящена изучению вопросов производства кабельной продукции, управления ТП, диагностики причин образования микродефектов в изоляции кабелей и определению степени их развития методом частичных разрядов.

Во второй главе осуществляется разработка компонентов интеллектуальной СППР, включающая разработку логико-математического аппарата и базы знаний.

Также во второй главе разрабатывается математический аппарат и процессы алгоритма селекции сигналов частичных разрядов.

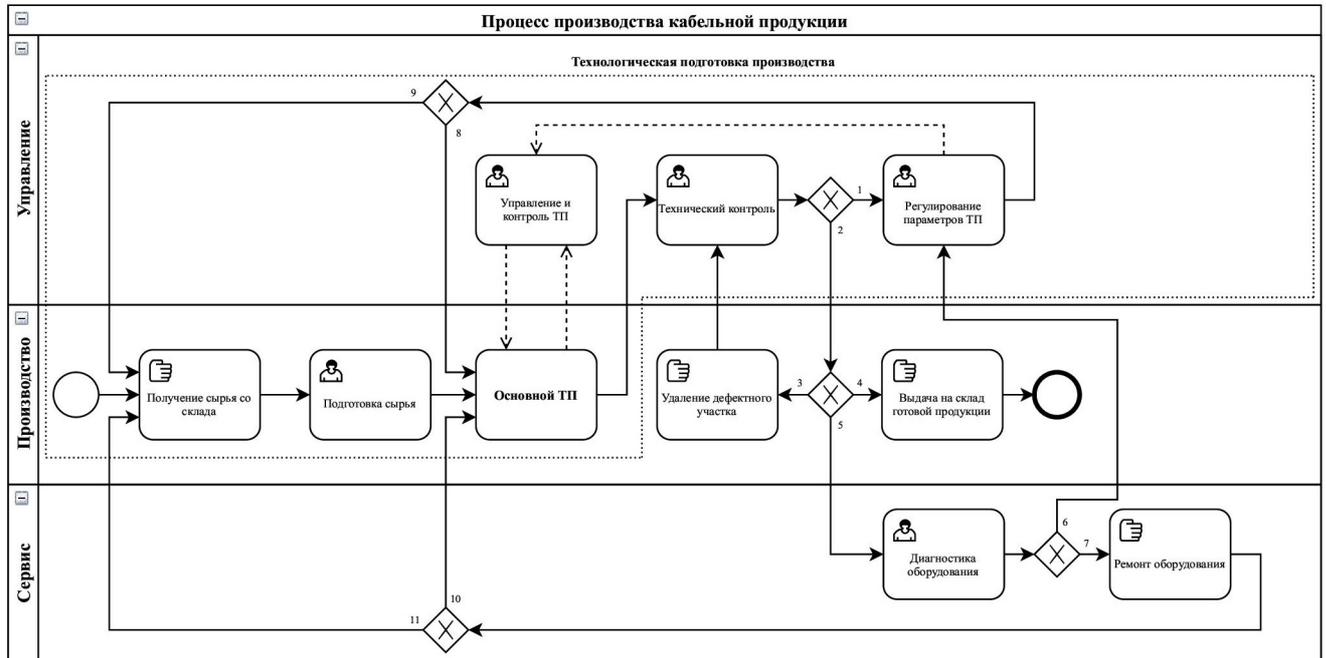
В третьей главе приводится описание разработанных алгоритмов, реализующих информационно-аналитические решения по второй главе.

В четвёртой главе приводятся результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов и систем.

# Глава 1. Современное состояние и проблемы производства кабелей

## 1.1. Система производства кабельной продукции

В современном индустриальном мире одно из важнейших мест в обеспечении надёжного электроснабжения промышленных, инфраструктурных и гражданских объектов занимает канализация электрической энергии посредством высоковольтных кабельных линий. Высоковольтный кабель представляет собой одну или несколько изолированных токопроводящих жил, заключённых в оболочку и имеющих (при необходимости) защитный покров [7]. Система производства кабелей включает в себя два основных потока, – управление и производство, как вспомогательный поток также выделяется сервис. На рисунке 1.1 изображена схема процесса производства кабельной продукции в нотации BPMN (Business Process Model and Notation).



Список условий на схеме:

- |   |  |
|---|--|
| 1 - требуется корректировка параметров ТП;        | 6 - оборудование исправно и требуется корректировка ТП;                |
| 2 - не требуется корректировка параметров ТП;     | 7 - оборудование неисправно;   |
| 3 - изменятся локализованные дефекты;             | 8, 9 - подготовленное сырьё имеется в наличии;                         |
| 4 - технические требования к изделию выполняются; | 10, 11 - требуется забрать со склада и подготовить новую партию сырья; |
| 5 - требуется проверка исправности оборудования;  |  |

Рисунок 1.1. BPMN-схема процесса производства кабельной продукции.

**Управление.** На современных предприятиях отрасли управление ТП производства кабелей осуществляется на базе автоматизированных систем управления и контроля производственных параметров ТП. Эти системы тесно взаимосвязаны между собой и фактически образуют единую распределённую интегрированную автоматизированную систему управления. Системы работают в едином информационном пространстве, взаимодействуя с единой базой данных, а результаты работы каждой из систем оказывают непосредственное влияние на работу остальных.

Взаимная интеграция и поддержка совместимости автоматизированных систем друг с другом осуществляется на базе CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support) или в российском варианте ИПИ-технологий (Информационная Поддержка Изделий). Основной целью этих технологий является создание единого информационного пространства и обеспечение обмена данными между различными системами и процессами, что позволяет управлять предприятием в соответствии с установленными регламентами и осуществлять сбор, хранение и анализ данных в едином информационном пространстве [8]. На рисунке 1.2 представлена иерархическая структура систем управления, обеспечивающих комплексное управление ТП.

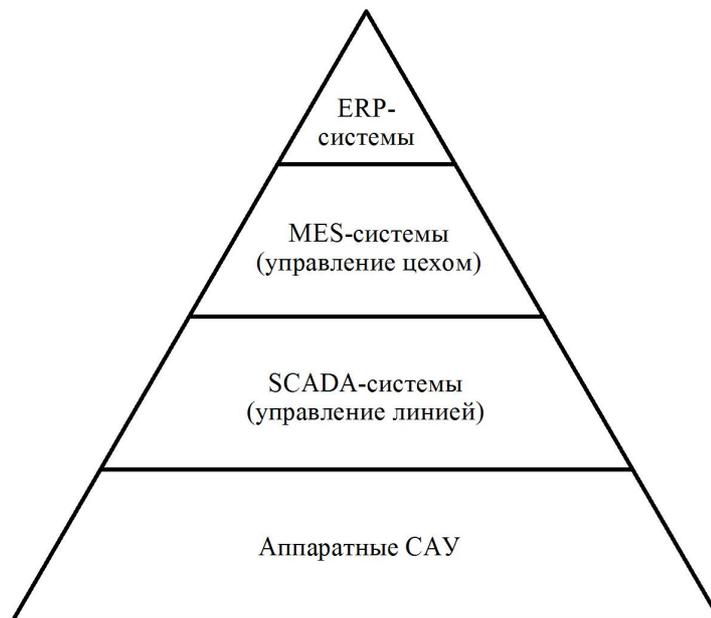


Рисунок 1.2. Структура автоматизированных систем управления производством кабельной продукции.

ERP-система (Enterprise Resource Planning) – автоматизированная система управления предприятием, решающая широкий круг задач в оказании информационно-аналитической поддержке персоналу предприятия в вопросах планирования и организации производства.

MES-система (Manufacturing Execution System) – автоматизированная система управления и контроля производственных процессов, обеспечивающая решение задач синхронизации, координации и оптимизации выполнения технологических операций.

SCADA-система (Supervisory Control And Data Acquisition) – автоматизированная система, предназначенная для осуществления технологического мониторинга, сбора данных и диспетчерского управления производственными процессами и отдельными операциями.

Аппаратные САУ (Системы Автоматического Управления) – системы, осуществляющие автоматическое управление функционированием аппаратов и производственного оборудования в режиме реального времени без участия человека.

Обязательным элементом системы управления производством кабельной продукции также является технический персонал предприятия, обладающий необходимыми знаниями, компетенциями и опытом. В сферу его ответственности входит решение неструктуризованных или слабо структуризованных задач, характеризующихся наличием высокой доли неопределённости, недостатком исходной информации, неформализуемых или слабо формализуемых факторов [9]. Участие подготовленных специалистов в процессе управления также позволяет в короткий срок при малых издержках получать удовлетворительные решения поставленных задач, решение которых на основе математических методов потребовало бы неприемлемых затрат времени и ресурсов.

**Основной технологический процесс.** Данный этап включает в себя несколько технологических операций и предназначен непосредственно для изготовления кабельных изделий, технологическая схема основного ТП по производству кабелей представлена на рисунке 1.3.

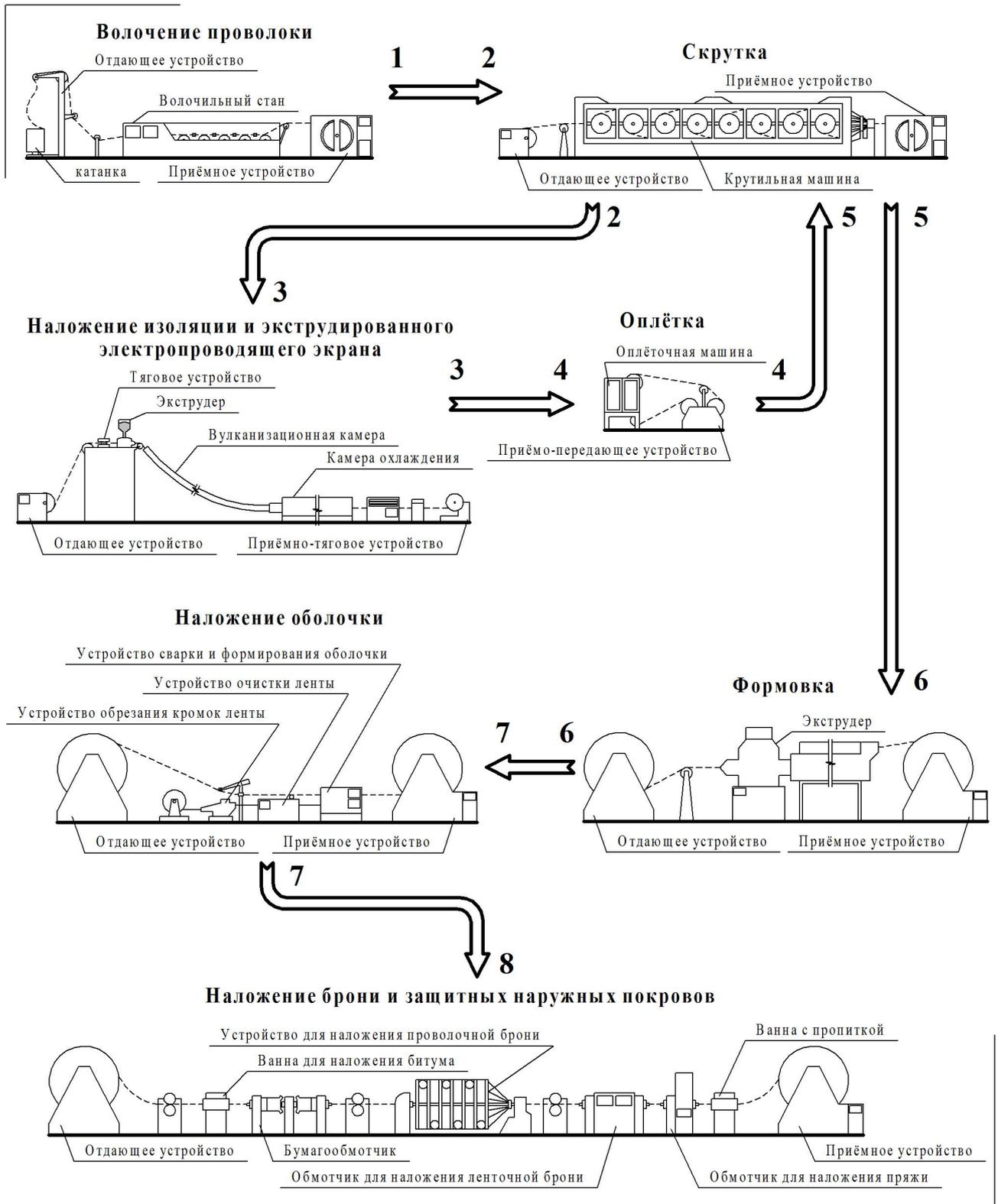


Рисунок 1.3. Принципиальная схема основного ТП производства кабелей.

В зависимости от марки кабеля и его конструкции состав операций может корректироваться, но обычно в обязательном порядке присутствуют следующие базовые процедуры [10-12]:

1. Волочение. Операция предназначена для изготовления проволоки для кабельных жил. В качестве сырья используется катанка – провод диаметром 3,5-10 мм. На специальном волочильном станке катанка протягивается через ряд отверстий, размеры которых меньше размеров исходной заготовки. Основной рабочей частью волочильного станка является волока, которая работает в условиях больших механических напряжений, поэтому её изготавливают из особо твёрдых сплавов, а в некоторых случаях из алмаза. В результате операции волочения из грубой катанки большого диаметра производится проволока меньшего диаметра.

2. Скрутка неизолированных жил. Операция предназначена для объединения отдельных элементов – проволок, в пучок – жилу. Скрутка осуществляется на специальных крутильных станках, на которых под действием приводного механизма проволока с вращающихся катушек через систему блоков подаётся в крутильную раму, откуда через распределительную розетку и скручивающий калибр по винтовой линии вокруг центрального элемента свивается в кабельную жилу.

3. Наложение изоляции и экструдированного электропроводящего экрана. Операция предназначена для изолирования токопроводящих жил друг от друга и от внешней среды. Наиболее распространённым изоляционным материалом для высоковольтных кабелей является сшитый полиэтилен, основным преимуществом которого над другими материалами является способность сопротивляться механическим воздействиям даже при температурах, превышающих температуру плавления. Данное свойство сшитого полиэтилена обусловлено наличием дополнительных поперечных связей между его макромолекулами, образующимися в результате процесса сшивания (вулканизации).

Наложение изоляции из сшитого полиэтилена, как правило, осуществляется совместно с наложением по неизолированной жиле и поверх изоляционного слоя полимерного электропроводящего экрана, служащего для выравнивания напряжённости электрического поля и создания гладкой и однородной контактной поверхности с изоляционным слоем. Полимерные композиции

сначала продавливаются через экструдер на поверхность жилы, после чего в специальной камере осуществляется вулканизация нанесённого на жилу полиэтилена с последующим охлаждением.

4. Оплётка. Поверх экструдированного экрана накладывается разделительный слой из лент электропроводящей бумаги или синтетической электропроводящей ленты, предназначенный для водоблокирования, механической и термической защиты экструдированного экрана от внешнего металлического. На данном этапе для устранения электрического поля на поверхности кабеля производится также наложение металлического экрана, представляющего собой композицию из медных проволок и лент, наматываемых поверх жил на специальных оплёточных машинах. По экрану в обязательном порядке накладывается разделительный слой из лент на основе кабельной бумаги, полимерных материалов или нетканого полотна, который предохраняет экран от попадания влаги и затекания в него полимерных композиций на этапе формовки.

5. Скрутка изолированных жил. Операция предназначена для придания кабельному изделию устойчивой формы и гибкости, выполняется на крутильных машинах. Необходимость скрутки жил объясняется и тем, что в её отсутствии при изгибе кабеля их внутренние слои будут сжиматься, а внешние – растягиваться, – это может привести к опасным деформациям и разрывам проводящих элементов конструкции. В результате операции скрутки создаётся прочный и эластичный пучок изолированных жил, образующий скелет кабельного изделия.

6. Формовка. Операция предназначена для придания кабелю практически круглой формы. Центральное заполнение выполняется жгутом ещё на этапе скрутки. Заполнение промежутков между жилами выполняется путём экструзии из полимерной композиции. В результате данной операции сечение кабеля приобретает круглую форму, удобную для хранения и монтажа.

7. Наложение оболочки. Операция предназначена для защиты жил кабеля от света, влаги, агрессивных химических и механических воздействий. В качестве материала для оболочек используются металлы, резины и пластмассы. Если основная изоляция кабеля обладает влагостойкостью, то такие кабели

изготавливают, как правило, в резиновой или пластмассовой оболочке, в противном случае используют металлические оболочки, имеющие наилучшие качества в отношении герметичности и водонепроницаемости. Металлические оболочки накладывают в виде сварных лент или методом прессования на специальных прессах, на которых металл выдавливается через кольцевое отверстие на движущуюся кабельную заготовку. Оболочки же из пластмасс и резин накладываются методом экструзии. В результате кабельное изделие получает надёжную внешнюю защиту.

8. Наложение брони и защитных наружных покровов. Операция предназначена для создания ещё большей защиты кабеля от механических и химических повреждений. Непосредственно перед бронированием на кабельное изделие наносится специальный разделительный слой (подушка под броню), защищающий оболочку кабеля от повреждения внешней бронёй. Подушка изготавливается из кабельной пряжи, креппированной бумаги, пластмассовых лент и шлангов с покрытием битумным составом поверх оболочки и подушки. В результате создаётся эластичное и безопасное покрытие для наложения брони.

Броня изготавливается двух типов: ленточная и проволочная. При отсутствии растягивающих усилий в эксплуатации на кабели накладывают броню из стальных лент, в противном случае кабели бронируют стальными проволоками.

На завершающем этапе для защиты брони кабеля от коррозии производится наложение наружных защитных покровов, конструкция и состав которых весьма разнообразны, так как определяются условиями эксплуатации и специфическими свойствами, которые хотят придать кабельному изделию (например – нераспространение горения или пониженное дымовыделение). Наложение наружного покрова завершает основной производственный процесс, на выходе которого мы имеем практически готовое изделие.

**Сервис.** К сервису относится деятельность различных служб, в задачу которых входит диагностика, обслуживание и ремонт технологического оборудования, систем снабжения ресурсами (электричество, газ, вода,...),

вентиляции, компьютеров, промышленных контроллеров и их ПО.

Таким образом, система производства кабелей является достаточно сложной системой, в функционировании которой задействовано множество персонала, автоматизированных управляющих систем и сложного технологического оборудования. При управлении подобными системами требуется решать большое количество неструктурированных и слабо структурированных задач, что вызывает потребность в разработке интеллектуальных СППР и человекомашинных систем, оказывающих информационно-аналитическую поддержку в принятии решений, снижающих объём ошибочных и излишних управляющих воздействий в процессе производства.

## 1.2. Процесс наложения электрической изоляции и образование опасных микродефектов в её структуре

Для обеспечения длительной и безопасной эксплуатации кабельных изделий значимым является выполнение всех операций ТП в соответствии с установленными требованиями к конструкции и характеристикам конечного изделия, однако особую важность имеет операция наложения электрической изоляции, так как в процессе эксплуатации она постоянно находится под воздействием высокого напряжения. Электрическая изоляция непосредственно влияет на безопасность и режимы работы электроустановки, повреждение изоляции может привести к поражению человека электрическим током и возникновению аварийных ситуаций на энергообъекте, сопровождающихся, как правило, отключением от сетей электроснабжения гражданских и промышленных объектов, недоотпуском электроэнергии и дорогостоящими ремонтными работами.

Как уже было отмечено, наибольшее распространение в настоящее время получила изоляция из сшитого полиэтилена, обладающая способностью сопротивляться механическим воздействиям даже при превышении температуры плавления, что при возникновении аварийных режимов имеет большое значение, так как существенно увеличивает шанс оставить линию в работе после отключения средствами релейной защиты и устранения локального повреждения.

Процесс наложения электрической изоляции из сшитого полиэтилена объединяет в себе четыре последовательных операции: подготовка сырья, экструзия полимерной композиции, сшивка полиэтилена (вулканизация) и охлаждение. В соответствии с работами [10-12] приведём более подробное описание операций процесса, а также сопутствующих при их выполнении микродефектов, образующихся в структуре изоляционного покрытия.

**1. Подготовка сырья.** Сырьё для наложения электрической изоляции производится в виде готовых полимерных композиций, содержащих в себе

помимо гранул полиэтилена различные химические добавки, прежде всего, катализаторы и специальные стабилизаторы – антиоксиданты, препятствующие термоокислительному разрушению молекул полиэтилена, а также – дезактиваторы меди (уменьшающие каталитическое действие меди на термоокислительные процессы), технический углерод (для предотвращения негативного воздействия ультрафиолетового излучения), каучуки (для сопротивления образованию трещин), антиперены (для противодействия горению), химические агенты для сшивки макромолекул полиэтилена и многие другие, необходимые для придания изоляции требуемых свойств и характеристик. Полимерные композиции изготавливаются на специализированных химических предприятиях и продаются в готовом виде. Состав композиции, концентрации веществ и содержание примесей оказывают значительное влияние на свойства конечного изделия, однако при этом немаловажную роль играет и подготовка сырья, которая включает:

- выдержку полимерной композиции перед использованием при температуре производственного помещения не менее 12 часов для предотвращения конденсации влаги;
- дополнительную сушку материала при содержании влаги более 0,1%;
- мероприятия по предотвращению попадания примесей (пыль и более крупные твёрдые частицы органических и неорганических веществ, капель воды и других жидкостей) в сырьё на всех этапах производственного процесса;
- соблюдение сроков и правил хранения полимерных композиций.

Отметим, что довольно часто именно вышеперечисленные факторы, а также марка и производитель полимерных композиций, становятся главными причинами образования в изоляции опасных микродефектов и ухудшения её характеристик.

**2. Экструзия полимерной композиции.** Основным оборудованием для наложения полимерной электрической изоляции является экструдер или червячный пресс. Поступающая в экструдер полимерная композиция

захватывается шнеком и проталкивает её к головке экструдера. По мере продвижения гранул внутри экструдера под действием механических усилий происходит их плавление и нагревание до высоких температур, иногда для создания требуемых температурных режимов применяется искусственный нагрев. Камера экструдера разделена на три зоны: в зоне I производится загрузка полимерного материала, в зоне II – сжатие и расплавление, в зоне III и в головке – выдавливание экструдата под большим давлением на жилу кабеля.

Так как процесс экструзии связан с высокими механическими напряжениями, то при его осуществлении образуется множество поверхностных микродефектов, причиной образования которых являются эластическая турбулентность и сильное трение в матрице экструдера.

В соответствии с [13-15] эластическая турбулентность – это явление неустойчивого течения потока расплава полимера, наблюдается при повышенных скоростях выдавливания расплава в процессе экструзии. Под воздействием высоких скоростей напряжения сдвига между слоями становятся выше сил адгезии к стенкам формирующего канала, в результате чего возникает местное проскальзывание расплава. После отрыва напряжения сдвига падают, и расплав снова сцепляется со стенками. Затем снова происходит отрыв и ситуация повторяется. Подобные пульсации в течение расплава приводят к образованию разрывов на поверхности изоляции. Помимо проскальзывания расплава в [14] приводятся и другие причины эластической турбулентности – образование трещин в упругих жидкостях под воздействием возникающих напряжений, гидродинамическая неустойчивость течения, проявление аномальных вязкостных свойств. В результате данного явления на поверхности изоляции образуются микротрещины и разрывы. В наиболее тяжёлых случаях поверхность приобретает шершавость и винтообразную форму.

Вследствие сильного трения в матрице экструдера и возникновения локальных перегревов расплава изоляции температура может подниматься на несколько десятков градусов выше допустимой нормы, что приводит к образованию продуктов сгорания, которые являются опасными микродефектами,

ухудшающими электрические и эксплуатационные свойства изоляции.

**3. Сшивка полиэтилена (вулканизация).** Сшивкой (вулканизацией) полиэтилена называется процесс образования поперечных связей между макромолекулами полиэтилена. Процесс сшивания осуществляется в специальных вулканизационных камерах, функционирование которых различается в зависимости от метода сшивания. Выделяют три различных метода: пероксидное, через органофункциональные группы и радиационное модифицирование.

Самым распространённым методом является пероксидное сшивание. При его применении в полимерную композицию добавляется пероксид дикумила, который при высоких температурах быстро распадается и вступает в химическую реакцию с молекулами полиэтилена. В результате реакции между макромолекулами полиэтилена образуются поперечные связи, как показано на рисунке 1.4. Данный метод получил своё широкое распространение благодаря высокой скорости вулканизации, которая составляет порядка нескольких десятков секунд, что существенно увеличивает производительность ТП.

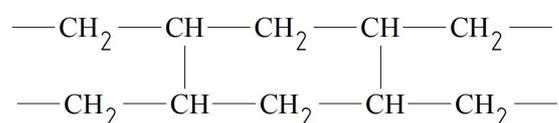


Рисунок 1.4. Внутримолекулярная структура сшитого полиэтилена при пероксидном методе сшивания.

Другой метод сшивания – через органофункциональные группы заключается во включении во внутримолекулярную структуру полиэтилена органофункциональных соединений на основе кремния (винилтриметоксисилан, винилтриэтоксисилан, винилтрисилан), которая затем приобретает вид, изображённый на рисунке 1.5.

Технология сшивания полиэтилена через прививание органофункциональных групп является более сложной, а процесс вулканизации – значительно более длительным, до нескольких десятков часов в зависимости от

толщины изоляции. Но при этом изоляционный материал получается более прочным за счёт большей энергии связи между молекулами и соединения до шести молекул полиэтилена в одном узле.

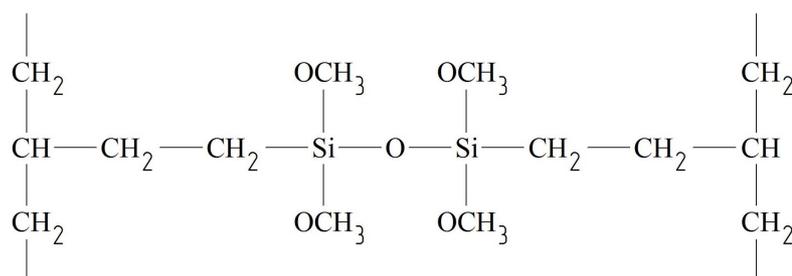


Рисунок 1.5. Внутримолекулярная структура сшитого полиэтилена при сшивании через прививание органофункциональных групп.

Последний метод, известный как радиационное модифицирование, использует в своей работе ионизирующее излучение, под воздействием которого между макромолекулами полиэтилена образуются поперечные связи, изображённые на рисунке 1.4. При этом кроме процесса сшивания под воздействием радиации параллельно происходят процессы деструкции самих макромолекул. Соответственно при использовании данного метода необходимо учитывать скорости этих процессов, зависящие от толщины изоляции, состава композиции полиэтилена, типа излучателя, поглощённой дозы излучения и энергии электронов.

Кроме сшитого полиэтилена в качестве изоляционного материала для высоковольтных кабелей применяют также резины, поливинилхлорид и бумажно-масляные композиции, но они менее распространены и применяются, как правило, или из-за экономических соображений или из-за потребности в каких-либо специфических свойствах.

В процессе сшивания молекул полиэтилена образуются различные продукты химических реакций и не вступившие в реакцию химические соединения, содержащиеся в полимерной композиции, что приводит к образованию таких микродефектов, как поры, полости, газовые и иные инородные включения, ухудшающие электрические свойства изоляции. При

пероксидном методе сшивания образуются кумилалкоголь,  $\alpha$ -метилстирол, ацетофенон, метан, вода; при сшивании через привитые органофункциональные группы – метанол, помимо которого в изоляции остаются не вступившие в реакцию молекулы воды; при использовании радиационного метода – большое число видов газов и прочих органических соединений, являющихся результатом деструктивных процессов при воздействии ионизирующего излучения. Особенно в данном отношении опасно образование молекул воды как побочного продукта химических реакций, скопления влаги в структуре диэлектрика в процессе эксплуатации приводит к образованию водных триингов, быстро разрушающих изоляционное покрытие.

**4. Охлаждение.** Охлаждение кабельной изоляции осуществляется в специальных водонаполненных камерах. Процесс охлаждения сопровождается такими явлениями, как эластическое восстановление и усадка.

Усадка – явление изменения размеров и формы термопластичных материалов вследствие процесса кристаллизации их молекулярной структуры. На молекулярном уровне данное явление объясняется уменьшением расстояний между молекулами из-за снижения тепловой энергии взаимодействия атомов, ионов и молекул при выходе расплава из головки экструдера и последующего охлаждения. При понижении температуры экструдата энергия связи частиц увеличивается, они становятся более медлительными и занимают меньший объём. Стягиваясь друг к другу, молекулы освобождают занятое ими пространство и становятся причиной образования большого числа микродефектов – усадочных раковин, пор и пустот.

Эластическое восстановление – явление изменения сечения и формы изоляционного полимерного покрытия под воздействием внутренних релаксационных процессов. Физику данного явления можно объяснить через накопление нормальных напряжений в процессе движения расплава по формирующему каналу. После выхода из канала макромолекулы постепенно переходят в равновесное состояние, упругие деформации снимаются – происходит восстановление внутренней структуры, внешне проявляющееся через

разбухание экструдата. Микродефекты здесь образуются при неправильном (слишком резком) охлаждении расплава на выходе из формующего канала, в результате чего релаксационные процессы останавливаются, не успев реализоваться в полной мере. В дальнейшем, в местах концентрации таких замороженных напряжений при изгибах и температурных колебаниях образуются микротрещины и микроразрывы.

Таким образом, процесс наложения изоляции на кабельную жилу представляет собой сложный процесс, управление которым требует использования современных средств автоматизации и контроля. При наложении изоляции образуются многочисленные микродефекты, ухудшающие её электрические свойства и являющиеся причиной её ускоренного старения. Под воздействием электрического напряжения микродефекты развиваются в триинги, – древовидные канальные образования внутри диэлектрического материала, разрастающиеся с течением времени и способные привести к перекрытию всей изоляции. Поэтому одной из важнейших задач при производстве кабельно-проводниковой продукции является удержание степени развития микродефектов в определённых пределах, безопасных для дальнейшей эксплуатации в течение установленного срока службы.

### 1.3. Управление и контроль процесса наложения электрической изоляции

При наложении на жилу электрической изоляции используется двухконтурная система управления, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.6.

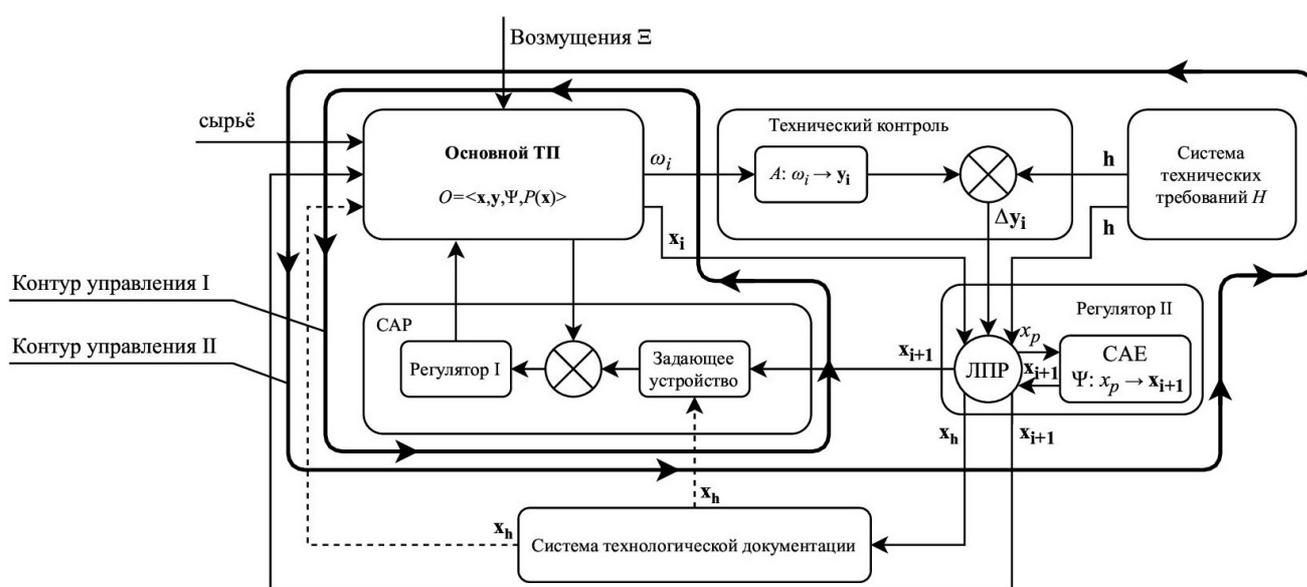


Рисунок 1.6. Принципиальная схема управления ТП наложения электрической изоляции.

Здесь:

$O = \langle x, y, \Psi, P(x) \rangle$  – система основного ТП, где:

$x$  – матрица-вектор состояния (режима функционирования) ТП в пространстве состояний  $X$ ,

$y$  – матрица-вектор состояния (технических характеристик) изоляции кабеля, производимого в режиме  $x$ ,

$\Psi$  – модель взаимосвязи параметров регулирования режима  $x$ ,

$P(x)$  – производительность ТП,

$\omega$  – производимый кабель,

$h$  – матрица-вектор нормативных требований к значениям технических характеристик изоляции кабелей,

$\Delta y_i$  – матрица-вектор невязок между векторами  $\mathbf{h}$  и  $y_i$ ,

$\mathbf{x}_h$  – матрица-вектор режима функционирования ТП, обеспечивающего выполнение технических требований  $\mathbf{h}$ ,

$\Xi$  – множество возмущений, воздействующих на ТП.

Внутренний контур I реализуется посредством системы автоматического регулирования (САР), основной целью которого является компенсация отклонений рабочих значений параметров ТП от целевых.

Внешний контур II реализует целевое управление внутренним контуром I через адаптацию состояния ТП к внешним возмущениям с целью обеспечения соответствия продукции (электрической изоляции) предъявляемым к ней техническим требованиям. Существует множество подходов к определению понятия «адаптация», но применительно к рассматриваемой системе наиболее правильным является рассматривать адаптацию как «...процесс изменения параметров и структуры системы, а управляющих воздействий на основе текущей информации с целью достижения определённого, обычно оптимального, состояния системы при начальной неопределённости и изменяющихся условиях работы» [16].

Внутренний контур I включается в работу совместно с основным ТП, регулирование которого осуществляется по принципу обратной связи, реализуемой через датчики и чувствительные элементы, устройство сравнения, задающее устройство и регулятор. Информация о состоянии ТП  $x(t)$  непрерывно или через малые промежутки времени посредством электрических сигналов поступает на устройство сравнения, где вычисляется разность между текущими значениями и целевыми значениями сигналов, формируемыми задающим устройством в зависимости от режима функционирования ТП  $x$ . Разность сигналов поступает в регулятор I, в котором вырабатываются управляющие воздействия, направленные на приведение значений параметров режима ТП в момент времени  $t$  к целевым.

Включение контура II производится в следующих случаях:

- при постановке на производство нового изделия (технологическая

подготовка производства),

- при изменении условий производства (ввод в производственный процесс нового оборудования, смена марки или поставщика сырья...),
- при внесении изменений в конструкцию изделия.

Отдельно здесь стоит выделить случаи воздействия на ТП случайных факторов (возмущений), в результате которого включение контура II может осуществляться также при приёмо-сдаточных и периодических испытаниях:

- при выходе технических характеристик изоляции за пределы допустимых значений.

Приёмка кабельных изделий осуществляют партиями кабелей одного макроразмера со сплошным контролем большинства технических характеристик (за исключением стойкости к тепловой деформации). Через каждые 6 месяцев дополнительно проводят периодические испытания, включающие помимо приёмо-сдаточных испытаний ещё ряд проверок. Если в процессе приёмки продукции предъявляемые кабельные изделия дважды не проходят контроль технических характеристик или по результатам периодических испытаний кабель не удовлетворяет техническим требованиям, в этом случае также задействуется внешний контур управления II. При этом кабель, не удовлетворяющий техническим требованиям на этапе приёмо-сдаточных испытаний, либо полностью утилизируется, если дефекты распространены по всей длине кабеля, либо вырезаются повреждённые участки, – если дефекты локализованы.

Основными компонентами контура II являются основной технологический процесс, САР, система технического контроля, регулятор II и система технических требований  $H$ .

Пространство состояний  $X$  описывается параметрами режимов работы основного технологического оборудования (таблица 1), используемого в процессе наложения на жилу электрической изоляции, к которому относят экструдер, вулканизационную камеру, камеру охлаждения, тяговые и приёмо-передающие устройства.

Таблица 1 – Регулируемые параметры ТП наложения электрической изоляции

№	Параметры регулирования	Группа	Технологическое оборудование
1	Производительность экструдера	1	Экструдер
2	Температура в зоне выдавливания	1	
3	Угол входа в матрицу	1	
4	Время вулканизации	1	Вулканизационная камера пероксидного сшивания
5	Температура вулканизации	1	
6	Давление в камере	-	
7	Время вулканизации	2	Вулканизационная камера сшивания через привитые органофункциональные группы
8	Температура вулканизации	2	
9	Влажность пара	2	
10	Время облучения	3	Комплекс радиационного модифицирования
11	Мощность излучения	3	
12	Время охлаждения	1	Камера охлаждения
13	Температура хладагента (воды)	1	
14	Сила натяжения заготовки	4	Тяговые и приёмо-передающие устройства
15	Скорость подачи заготовки	1	

Перечисленные параметры или факторы образуют независимые группы, связанные с определённым технологическим оборудованием, как показано в таблице. В рамках своей группы факторы являются взаимозависимыми через модель  $\Psi$ , включающую математические модели реологии, химии полимеров и радиационного модифицирования [10-20]. Информационно-аналитическая поддержка их расчёта производится с применением модулей конструкторской и технологической подготовки производства CAE (англ. Computer-aided engineering) автоматизированных ERP-систем управления производством. В качестве примера таких систем можно привести Clobbi, SisTrade, IT-Enterprise и др. Взаимосвязь факторов внутри группы приводит к тому, что на практике число факторов сокращается до числа независимых групп факторов. Отметим также, что в небольших пределах в рамках одной группы факторы могут рассматриваться как независимые, и ЛПП может изменять их значения, основываясь на своих знаниях и опыте, однако это требует высокой квалификации и понимания специфики производственных условий предприятия.

Рассмотрим систему технического контроля, осуществляющую отображение  $A: \omega_i \rightarrow y_i$ ,  $y_i \in Y$ , где  $Y$  – пространство состояний (технических характеристик изоляции кабелей, устанавливаемых государственными стандартами ГОСТ Р 55025-2012, ГОСТ Р МЭК 60840-2011, ГОСТ Р МЭК 62067-2011, техническими условиями и специальными программами испытаний [21-23]). Для идентификации состояния кабеля и получения отображения  $A$  используется специальное испытательное оборудование, измерительные комплексы, методики проведения измерений и испытаний. Пространство  $Y$ , в которое производится отображение объекта  $\omega_i$ , к примеру, для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ, формируется набором технических характеристик (таблица 2). В зависимости от специфических свойств, которые хотят придать кабельному изделию (например, низкое дымо- и газовыделение при горении и тлении) перечень технических характеристик может быть расширен.

Таблица 2 – Технические характеристики кабельной изоляции из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ

№	Технические характеристики	Требования
1	Электрическое сопротивление	нормируется ТУ
2	Объёмное электрическое сопротивление при 20°C	не менее $10^{14}$ Ом·см
3	Объёмное электрическое сопротивление при 70°C	не менее $10^{11}$ Ом·см
4	Тангенс угла диэлектрических потерь	не более $30 \cdot 10^{-4}$
5	Уровень частичных разрядов	не более 5 пикокулон
6	Уровень частичных разрядов после испытания на изгиб	не более 5 пикокулон
7	Уровень частичных разрядов после циклов нагрева/охлаждения	не более 5 пикокулон
8	Удельное сопротивление электропроводящего экрана по жиле	не более 1000 Ом·м
9	Удельное сопротивление электропроводящего экрана по изоляции	не более 500 Ом·м
10	Пробивная напряжённость электропроводящего экрана	не менее 23 кВ/мм
11	Пробивное напряжение	не менее $25U_0$
12	Стойкость к воздействию импульсного напряжения	да/нет
13	Стойкость к воздействию переменного напряжения	да/нет
14	Размер водного триинга при пробое электропроводящего экрана	не более 500 мкм
15	Толщина изоляции	не менее $0,1 + 0,1s$
16	Толщина электропроводящего экрана	$0,6(0,9) \pm 0,3$ мм

## Продолжение таблицы 2

№	Технические характеристики	Требования
17	Разность толщины изоляции в одном сечении	не более 15%
18	Размер поверхностных микродефектов изоляции	не более 200 мкм
19	Высота выступов на электропроводящем экране	не более 80 мкм
20	Отношение высоты к основанию выступа на электропроводящем экране	не более 1/3
21	Относительное удлинение при разрыве	не менее 200%
22	Прочность при разрыве	не менее 12,5 Н/мм <sup>2</sup>
23	Относительное удлинение под нагрузкой	не более 175%
24	Остаточное относительное удлинение	не более 15%
25	Усадка	не более 4%
26	Водопоглощение	не более 1 мг/см <sup>2</sup>
27	Стойкость к навиванию	да/нет
28	Стойкость к повышенной температуре	да/нет
29	Стойкость к пониженной температуре	да/нет
30	Стойкость к воздействию повышенной влажности	да/нет
31	Стойкость к растрескиванию при повышенной температуре	да/нет
32	Стойкость к старению при повышенной температуре	да/нет
33	Усилие отделения электропроводящего экрана от изоляции	от 0,35 до 20 Н
34	Срок службы	нормируется ТУ
35	Нераспространение горения	да/нет

Система технических требований  $H$  представляет собой множество требований к различным типам кабелей, различающихся по конструкции, номинальному напряжению, материалу изоляции и специфическим требованиям, которые к ним могут предъявляться. При управлении ТП по внешнему контуру П, как уже было отмечено, существующие математические модели реологии, химии полимеров и радиационного модифицирования, которые позволяют определять оптимальный режим функционирования ТП, удовлетворяющий, как правило, большинству требований к характеристикам изоляции. Проблема заключается в том, что имеющиеся математические модели не учитывают всего спектра производственных факторов на конкретном предприятии. В результате под их действием, рассматриваемым далее в качестве возмущений  $\Xi$  (износ и конструктивные особенности оборудования, вибрации, биения, качество

сырья...), некоторые технические характеристика выходят за допустимые пределы. Наиболее чувствительными в данном отношении являются микродефекты изоляции, степень развития которых оценивается по характеристикам 5, 6, 7, 14, 18, 19, 20 (позиции характеристик в таблице 2). В этом случае возникает задача адаптации параметров ТП к возмущениям  $\Xi$ .

Помимо выполнения технических требований в процессе адаптации ЛПР должен учитывать возможное снижение производительности ТП, возникающее вследствие регулирования связанных с ним параметров, и затраты на экспериментирование, связанные с потерей сырья на производство опытных образцов кабеля и использованием производственной линии. Характеристикой, учитывающей данные факторы, является полезность состояния (режима функционирования) ТП  $A(E(P(\mathbf{x})), E(C(n)))$ , под которой понимается разность экономических оценок производительности  $E(P(\mathbf{x}))$  и затрат на управление через контур П  $E(C(n))$  при обязательном выполнении требований к техническим характеристикам продукции. Оценки могут иметь денежное выражение или могут быть представлены в условных единицах. В общем случае задача адаптации состояния ТП имеет следующий вид:

$$A(E(P(\mathbf{x})), E(C(n))) = E(P(\mathbf{x})) - E(C(n)) \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} \mu(y_k(\mathbf{x}, w(\Xi))) + \varepsilon_k \leq h_k \text{ для } \forall k \in K, \\ C(n) \leq C_{\max}(n), \\ \mathbf{x} \in X_{\psi}, \end{cases}$$

где:

$K$  – пространство состояний изоляции кабелей, характеризующее степень развития микродефектов,  $K \subseteq Y$ ,

$k$  – одномерное подпространство пространства  $K$ ,

$\mathbf{x}$  – матрица-вектор состояния (режима функционирования) ТП при производстве изоляции кабеля,

$C(n)$  – стоимость управления через контур П,

$E(P(\mathbf{x}))$  – экономическая оценка производительности ТП  $P(\mathbf{x})$ ,

$E(C(n))$  – экономическая оценка стоимости управления  $C(n)$ ,

$A(E(P(\mathbf{x})), E(C(n)))$  – полезность состояния  $\mathbf{x}$  ТП,

$X_\Psi$  – множество режимов ТП, соответствующих модели  $\Psi$ ,

$w(\Xi)$  – плотность распределения значений возмущающих факторов  $\Xi$ ,

$y_k(\mathbf{x}, w(\Xi))$  – случайная величина, характеризующая значения, принимаемые проекцией вектора  $\mathbf{y}(\mathbf{x})$  в  $k$ -ом подпространстве,

$\mu(y_k(\mathbf{x}, w(\Xi)))$  – математическое ожидание случайной величины  $y_k(\mathbf{x}, w(\Xi))$ ,

$\varepsilon_k$  – максимальное расхождение между значениями, принимаемыми случайной величиной  $y_k(\mathbf{x}, w(\Xi))$  и её математическим ожиданием  $\mu(y_k(\mathbf{x}, w(\Xi)))$ ,

$h_k$  – требование к значению технической характеристики  $y_k$ .

Строгое решение задачи (1) приводит к необходимости построения статистической модели ТП с учётом возмущений среды  $\Xi$ , что является достаточно сложной задачей как с технической стороны, так и с позиции экономической целесообразности. Поэтому на практике, в подобных случаях, используют алгоритмы рекуррентной адаптации, преобразующие задачу (1) в задачу оптимизации на определённом шаге рекуррентного алгоритма [24]. В связи с этим рассмотрим алгоритм  $\Lambda$  с участием ЛПР, реализованный во внешнем контуре  $\Pi$  (см. рисунок 1.6), граф алгоритма представлен на рисунке 1.7.

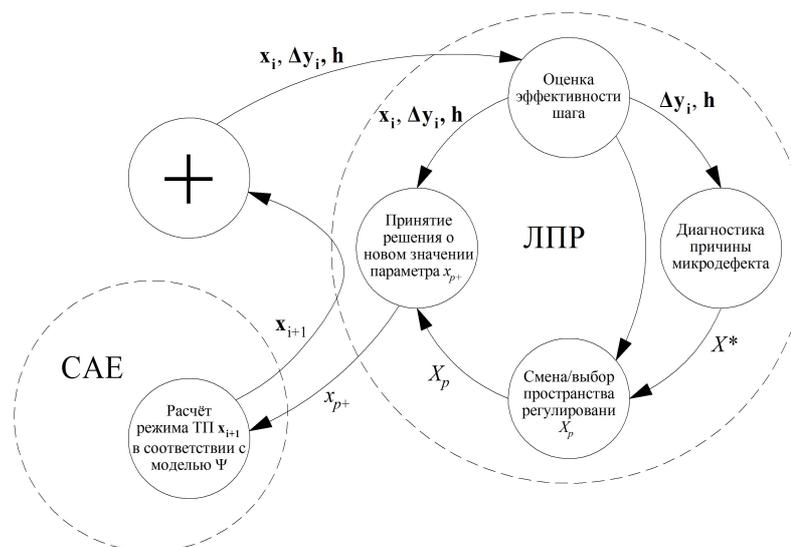


Рисунок 1.7. Граф алгоритма  $\Lambda$  регулирования параметров ТП через контур  $\Pi$ .

Здесь:

$X^*$  – пространство состояний ТП, соответствующее определённой причине образования опасных микродефектов,  $X^* \subseteq X$ ,

$X_p$  – пространство выбранного параметра регулирования,  $X_p \subseteq X^* \subseteq X$ ,

$x_{p+}$  – значение выбранного параметра регулирования на следующем шаге,

$x_i$  – матрица-вектор состояния (режима функционирования) ТП при производстве изоляции кабеля  $\omega_i$  на  $i$  шаге,

$h$  – матрица-вектор нормативных требований к значениям технических характеристик изоляции кабелей,

$\Delta y_i$  – матрица-вектор невязок между векторами  $h$  и  $y_i$ ,

$x_{i+1}$  – матрица-вектор режима функционирования ТП на  $i + 1$  шаге.

Так как технические характеристики пространства  $Y$  связаны с группами факторов и с отдельными факторами пространства  $X$ , и с сырьевыми факторами, а тип взаимосвязи, в общем, является известным как из математических моделей реологии, химии полимеров и радиационного модифицирования, так и из многочисленных исследований по данной тематике [25-29], то ЛПР способен определять и регулировать параметры ТП в направлении уменьшения степени развития микродефектов.

Управление ТП через внешний контур П является недостаточно эффективным, так как имеет высокую чувствительность к квалификации ЛПР. Особенно сильно это выражено при решении слабо структуризованных задач, характеризующихся наличием неопределённостей, неформализуемых или слабо формализуемых факторов, к которым, в первую очередь, относится диагностика причин образования микродефектов и принятие решений о новых значениях параметра регулирования.

Диагностика позволяет сократить факторное пространство  $X$  и сделать управление более эффективным. Ошибки при решении данной задачи приводят к существенным экономическим потерям и являются крайне нежелательными. Диагностика причин образования микродефектов производится в условиях

неопределённости, так как, во-первых, часть микродефектов скрыта от визуального наблюдения, во-вторых, имеются затруднения в точном определении типа поверхностных микродефектов, и, в-третьих, отсутствуют формальные механизмы оценки косвенных признаков при нахождении их значений в пределах нормы. Приведённые обстоятельства неполноты исходной информации требуют применения метода последовательных проверок, заключающегося в последовательной проверке гипотез, выдвигаемых относительно возможных причин микродефектов. Одним из существенных недостатков такого подхода к диагностированию причин образования микродефектов являются высокие требования к квалификации ЛПП. В то же время для оказания помощи в решении подобных проблем сейчас активно развивается направление по созданию интеллектуальных СППР. В качестве примера таких систем можно привести СППР поиска причин аварийных ситуаций в стекольной промышленности [30] или диагностики неисправностей автоматизированных станочных модулей [31].

Принятие решений о новых значениях параметров регулирования также сильно зависит от квалификации ЛПП, и если для оценок исходов альтернативных решений применяются экономические модели, то оценки вероятностей исходов носят полностью субъективный характер, к тому же, как правило, изменяющиеся линейно. Рассмотрим структуру задачи ЛПП, решаемую на каждой итерации алгоритма  $\Lambda$ :

$$\mu(A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))), p_j) \rightarrow \max \quad (2)$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} x_p \in [x_{p1}, x_{p2}], \\ n \in [n_1, n_2], \\ \mathbf{x}(x_p) \in X_\Psi, \end{cases}$$

где:

$x_p$  – значение выбранного параметра регулирования ТП одного из альтернативных состояний (режимов функционирования) ТП,

$\mathbf{x}(x_p)$  – матрица-вектор одного из альтернативных состояний (режимов

функционирования) ТП,

$p_j$  – вероятность невыполнения условия:

$$y_k(\mathbf{x}(x_p)) + e_k + \delta_k \leq h_k \text{ для } \forall k \in K \quad (3)$$

для  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП, где  $K$  – пространство состояний изоляции кабелей, характеризующее степень развития микродефектов ( $K \subseteq Y$ ),  $k$  – одномерное подпространство пространства  $K$ ,  $y_k(\mathbf{x}(x_p))$  – проекция вектора технических характеристик изоляции кабеля  $\mathbf{y}(\mathbf{x}(x_p))$  в  $k$ -ое подпространство,  $e_k$  – абсолютная погрешность измерений величины  $y_k(\mathbf{x}(x_p))$ ,  $h_k$  – требование к значению технической характеристики  $y_k$ ,  $\delta_k$  – требуемый запас устойчивости системы по отношению к  $h_k$ ,

$n$  – число экспериментов, соответствующих следующему шагу алгоритма  $\Lambda$ ,

$\mu(A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))), p_j)$  – ожидаемая полезность  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП,

$X_\psi$  – множество режимов ТП, соответствующих модели  $\Psi$ ,

$[x_{p1}, x_{p2}]$  – область определения значений  $x_{pij}$  с заданным шагом дискретизации  $\Delta x_p$ ,

$[n_1, n_2]$  – область определения значений  $n_i$  с шагом  $\Delta n = 1$ .

Решение задачи (2) после выполнения диагностики причины образования опасных микродефектов начинается с выбора пространства регулируемого параметра  $X_p$ . Выбор производится случайным образом или на основе интуиции ЛПР. Затем ЛПР определяет расчётную область  $[x_{p1}, x_{p2}]$ , одно значение берётся из текущего режима ТП (при котором условие (3) не выполняется), а другое выбирается как соответствующее высокому уровню субъективной вероятности выполнения условия (3) без учёта производительности ТП. После предварительного определения  $[x_{p1}, x_{p2}]$  производится опытный образец кабеля в новом режиме. Если в результате технического контроля данного образца условие (3) выполняется, то пространство  $X_p$  используется для решения задачи (2), в противном случае либо выбирается другое пространство, либо выбирается новое граничное значение по усмотрению ЛПР и процедура повторяется. В результате

должна быть определена область  $[x_{p1}, x_{p2}]$ , на одной из границ которой условие (3) выполняется, а на другой – нет. Далее экономическим отделом предприятия разрабатывается модель полезности, определяемая как разница экономических оценок производительности ТП  $E(P(x(x_p)))$  и стоимости управления  $E(C(n))$  (затрат на экспериментирование). При невозможности разработать такую модель (в условиях ограничений по времени или нехватке данных) ЛПР строит её, руководствуясь собственным опытом и интуицией. После задания экономической модели производится определение следующего значения параметра  $x_p$  через решение оптимизационной задачи (2). Проблема заключается в том, что с одной стороны ЛПР должен отслеживать значения сразу по нескольким техническим характеристикам, а с другой, что при определении ожидаемой полезности он пользуется субъективными значениями вероятностей. Несмотря на то, что в теории принятия решений субъективные вероятности находят широкое применение, в данном случае, в силу линейности человеческого мышления, происходит завышение вероятности неблагоприятных исходов, что негативно сказывается на производительности ТП.

Слабым звеном контура II также является система технического контроля, результаты работы которой часто заставляют ЛПР принимать ошибочные и неэффективные решения. В этом отношении наибольшие проблемы связаны с определением уровня частичных разрядов в изоляции кабелей (технические характеристики 5, 6, 7 по таблице 2), но более подробно о них будет сказано в параграфах 1.4, 1.5 и 1.6.

Таким образом, несмотря на то, что современные автоматизированные системы, используемые в кабельной промышленности, и оказывают широкую информационно-аналитическую поддержку, она является недостаточной. В связи с этим возникает необходимость создания новых моделей, алгоритмов и механизмов поддержки принятия решений, помогающих ЛПР в решении задач диагностики и регулирования параметров ТП наложения электрической изоляции.

#### 1.4. Образование частичных разрядов в кабельной изоляции

Микродефекты, содержащиеся в кабельной изоляции, при подаче напряжения становятся источниками частичных разрядов, под воздействием которых происходит увеличение их размеров и разрушение внутренней структуры диэлектрика. Согласно ГОСТ Р 55191-2012 «частичный разряд (ЧР) (partial discharge): Электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами» [32]. Явление возникновения частичных разрядов известно достаточно давно, начиная с 30-ых годов 20-ого века, когда появились первые высоковольтные установки [33, 34]. Однако в то время при производстве электрической изоляции закладывался достаточно большой запас прочности, и большой опасности эти разряды не представляли. С развитием электроэнергетики и народного хозяйства класс рабочего напряжения электроустановок стремительно повышался, что привело к значительному удорожанию изоляционных конструкций и материалов, – появилась необходимость экономить и выбирать экономически обоснованные решения. В результате, воздействие частичных разрядов стало более существенным, и для предотвращения возможных аварийных ситуаций был усилен контроль над их активностью.

Опасность микродефектов обусловлена в первую очередь тем, что их появление приводит к неравномерности распределения электрического поля, что упрощённо представлено на рисунке 1.8а.

На рисунке представлен диэлектрик 2, находящийся между двумя проводящими поверхностями 1, к которым приложено напряжение  $U$ . В диэлектрике присутствует инородное включение 3 толщиной  $d_v$  и включённый с ним последовательно участок однородного диэлектрического материала толщиной  $d_{\text{пд}}$ . Диэлектрические проницаемости включения  $\epsilon_v$  и диэлектрика  $\epsilon$  различны, что приводит к образованию емкостного делителя напряжений, схема замещения которого представлена на рисунке 1.8б.

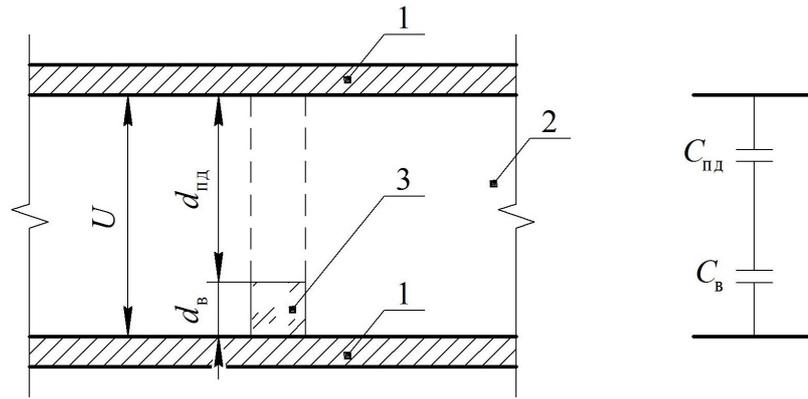


Рисунок 1.8. Схема образования частичного разряда: а) – схема изоляционного промежутка; б) – эквивалентная схема замещения.

В соответствии со схемой замещения напряжённость электрического поля на включении определяется следующим образом:

$$E_{\varepsilon} = \frac{U_{\varepsilon}}{d_{\varepsilon}} = \frac{UC_{nd}}{d_{\varepsilon}(C_{nd} + C_{\varepsilon})} = \frac{U\varepsilon}{d_{nd}d_{\varepsilon}\left(\frac{\varepsilon}{d_{nd}} + \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{d_{\varepsilon}}\right)} = \frac{U\varepsilon}{\varepsilon_{\varepsilon}d_{nd} + \varepsilon d_{\varepsilon}}$$

Из формулы видно, что напряжённость на включении  $E_{\varepsilon}$  будет больше напряжённости на остальной части диэлектрика при  $\varepsilon_{\varepsilon} < \varepsilon$ . По мере возрастания напряжения  $U$  происходит накопление поверхностного электрического заряда на границе раздела между ними, и после достижения некоторого критического значения происходит пробой полости микродефекта, т.е. происходит частичный разряд [33].

Образование частичных разрядов при воздействии переменного напряжения носит детерминированный характер и зависит от его фазы и, конечно, амплитудного значения. Согласно [35] «Частичные разряды возникают только на участках роста напряжённости электромагнитного поля (приложенного напряжения), на участках снижения напряжённости электромагнитного поля они не возникают». Для иллюстрации этого утверждения обратимся к рисунку 1.9.

Из рисунка видно, что при достижении на включении некоторого критического значения напряжения  $U_{\varepsilon}$  (напряжение возникновения частичных разрядов) происходит пробой диэлектрического промежутка, т.е. образуется

частичный разряд. После пробоя напряжение на включении падает до  $U_{\text{п}}$  (напряжение погасания частичных разрядов), и разряд гаснет, затем оно снова растёт в соответствии с напряжением сети, и при достижении им значения  $U_{\text{в}}$  происходит частичный разряд [36]. Этот процесс повторяется до начала процесса уменьшения напряжения сети, в течение которого частичные разряды не образуются.

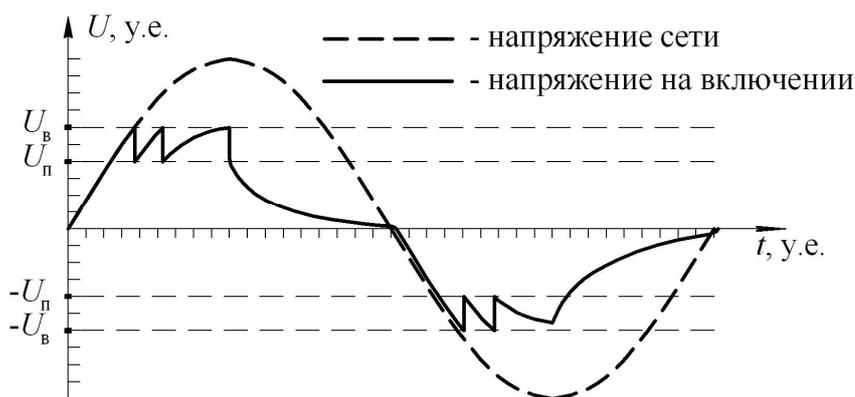


Рисунок 1.9. График зависимости напряжения на включении от напряжения сети во времени, где  $U$  — напряжение,  $t$  — время.

Вопросы физического и химического воздействия частичных разрядов на изоляцию рассматривались в научных трудах [37-42]. Согласно данным исследованиям частичные разряды обладают разрушающим действием на изоляцию. Их образование сопровождается явлениями электронно-ионной бомбардировки и фотонной ионизации внутримолекулярной структуры диэлектрика. Электронно-ионная бомбардировка возникает под действием электрического поля, когда свободные ионы и электроны разгоняются и соударяются с атомами и молекулами диэлектрика. В зависимости от количества сообщённой энергии происходит возбуждение атомов, связанное с переходом электрона на более удалённую от ядра орбиту или ионизация молекул, т.е. расщепление на электроны и положительные ионы. При определённых обстоятельствах электрон, столкнувшись с молекулой, может перевести её в возбуждённое состояние, которое сопровождается изменениями в движении электронов, связанных с ней. Такая молекула спустя некоторое время отдаёт свою

избыточную энергию, испуская фотон. В случае если электрон находился на внутренних энергетических уровнях атомного ядра, энергия излучаемого фотона может превышать энергию ионизации молекул. Такой фотон, столкнувшись с другой молекулой, ионизирует её, и процесс повторяется. Это явление получило название фотонной ионизации, которая благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особо быстрому развитию дефектов. На рисунке 1.10 показан процесс разрушения изоляции и образования электропроводящего канала под воздействием электронно-ионной бомбардировки и фотонной ионизации.

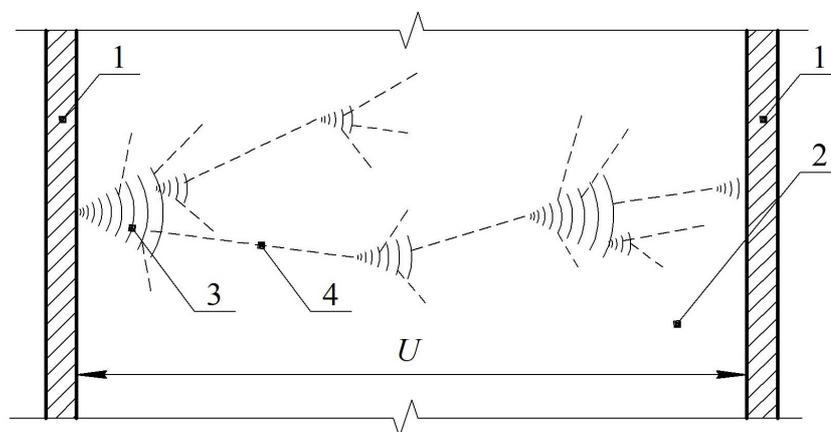


Рисунок 1.10. Схема развития электропроводящего канала в диэлектрике, где 1 – проводник, 2 – диэлектрик, 3 – электронная лавина, 4 – фотонный след.

В присутствии влаги эти процессы становятся ещё более разрушительными, так как происходит образование пузырьков газа, которые снижают диэлектрические свойства изоляции. Постоянно повторяясь, частичные разряды постепенно разрушают внутреннюю структуру диэлектрика, образуя древовидные полости в его толще. С течением времени, если не принимать необходимых мер, они разрастаются, приводя, в конечном счёте, к электрическому пробое всей изоляции с соответствующими последствиями.

Образование частичных разрядов также сопровождается протеканием сложных химических реакций с образованием водорода, ацетилена, этилена, метана, этана, пропана, пропилена, оксида углерода и других соединений. В

кабелях с бумажно-масляной изоляцией происходит образование X-воска, который «состоит из олигомеризованных углеводородов масел, содержащих активные перекисные и полярные карбонильные и карбоксильные группы» [43]. Появление X-воска способствует ухудшению отвода тепла, возникновению локальных перегревов, ускорению процессов старения изоляции и увеличению диэлектрических потерь.

Другим фактором, оказывающим сильное разрушительное воздействие, является тепловая эрозия, возникающая в результате разрядной активности. Она не разрушает изоляцию непосредственно, однако является мощным катализатором для протекания химических процессов, также снижающих её электрическую прочность.

Суммируя вышеизложенную информацию можно сделать вывод, что образование частичных разрядов в кабельной изоляции – процесс сложный и многогранный, учитывающий в себе весь спектр разрушающих факторов. Поэтому метод частичных разрядов является универсальным методом для определения микродефектов различного рода в кабельных изоляционных конструкциях.

## 1.5. Система регистрации сигналов частичных разрядов

На затраты времени и ресурсов по выявлению микродефектов и адаптации состояния (режима функционирования) ТП наложения электрической изоляции к условиям производства существенное влияние оказывают результаты измерения уровня частичных разрядов в кабельной изоляции. Связано это в первую очередь с тем, что опасность микродефектов определяется величиной генерируемых ими импульсов частичных разрядов. Соответственно, ошибки в определении их амплитуды могут приводить к неправильным заключениям о степени опасности имеющихся микродефектов.

Существует достаточно большое число методов регистрации сигналов частичных разрядов, обусловленных сложностью явления, сопровождающегося колебательными процессами в измерительной схеме, акустическим шумом, электромагнитным и оптическим излучениями, большинство из этих методов достаточно подробно рассмотрены в работах [44-51]. Но наиболее корректным является электрический контактный метод регистрации, который позволяет произвести градуировку измерительной схемы. Именно он и используется при регистрации частичных разрядов в кабельной изоляции.

В основу работы метода положена регистрация переходного процесса, образующегося при возникновении частичных разрядов. Переходный процесс возникает в результате шунтирования ёмкости включения нелинейным сопротивлением плазменного канала при её пробое [36, 45], как показано в схеме замещения на рисунке 1.11, где  $U$  – напряжение на изоляции,  $C_B$  – ёмкость включения,  $C_{\text{пд}}$  – ёмкость последовательно включённого диэлектрика,  $R_k$  – нелинейное сопротивление плазменного канала. Вследствие пробоя микродефекта ёмкость измерительной схемы изменяется, что приводит к перераспределению электрического заряда между её элементами.

Здесь следует отметить, что для удобства описания разрядного процесса во включении рассматривается не изменение ёмкости системы, а величина

некоторого фиктивного заряда, который, будучи введён в неё, вызовет такое же изменение напряжения, при этом ёмкость считается постоянной. Величина этого заряда называется кажущимся зарядом частичного разряда. Приведём более строгое определение этого понятия: «кажущийся заряд  $q$  (apparent charge  $q$ ): Абсолютное значение такого заряда, мгновенное введение которого между электродами испытуемого объекта, установленного в испытательной схеме, могло бы дать такое же показание на измерительном приборе, как и сам импульс ЧР» [52]. Максимальное значение кажущегося заряда частичного разряда является основным показателем при оценке степени развития микродефектов в кабельной изоляции, и для типовых и квалификационных испытаний не должно превышать 5 пикокулон, для приёмо-сдаточных испытаний – 10 пикокулон [21-23].

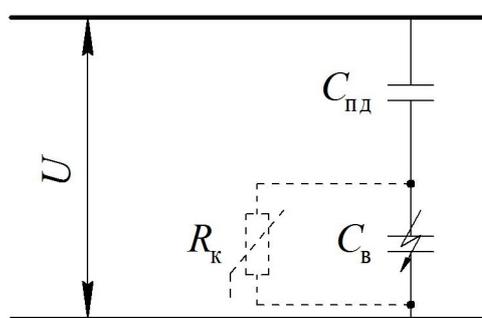


Рисунок 1.11. Схема замещения изоляционного промежутка в момент пробоя диэлектрического включения.

В связи с тем, что уровень частичных разрядов оценивается и нормируется в пикокулонах, а регистрируемое изменение напряжения в мВ, перед проведением измерения производится градуировка измерительной схемы по специальной методике [53]. Эта процедура позволяет определить градуировочный коэффициент, произведение которого с показаниями измерительного прибора даёт величину заряда в пикокулонах, инжектируемого в схему градуировочными генератором и конденсатором. Генератор с определённой частотой следования формирует прямоугольные импульсы с очень крутым передним фронтом, порядка нескольких наносекунд, с той же периодичностью заряжается и разряжается подключённый к нему конденсатор. Форма генерируемых таким образом

сигналов близка к форме импульсов частичных разрядов, что позволяет адекватно оценивать величину заряда, вызвавшего изменения напряжения в схеме.

Регистрация частичных разрядов производится с использованием чувствительных элементов одного из двух типов, – резистивным или индуктивно-резистивным; выбор элемента зависит от конструктивных особенностей объекта испытаний, уровня помех и используемого измерительного прибора [54]. Для регистрации импульсов частичных разрядов в кабельной изоляции в соответствии с ГОСТ 28114-89 [55] применяется пять видов схем: 1) с входным узлом и соединительным конденсатором, включёнными последовательно; 2) с входным узлом и соединительным конденсатором, включёнными параллельно; 3) мостовая схема; 4) с конечным импедансом и 5) с подавителем отражений. При определении и регулировании параметров ТП наложения электрической изоляции используются схемы 1 и 2 (рисунок 1.12), что, во-первых, вызвано использованием маслонаполненных концевых муфт для подавления коронных разрядов, а, во-вторых, – использованием образцов кабелей малой длины, в результате чего отражения от противоположного конца кабеля отсутствуют, и объект испытания может быть представлен сосредоточенной ёмкостью.

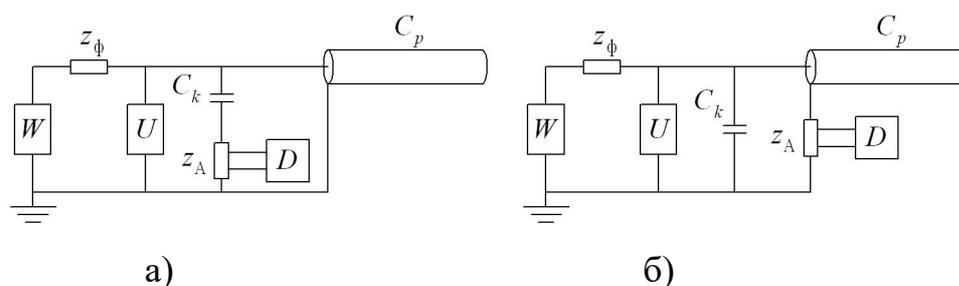


Рисунок 1.12. Схемы регистрации импульсов частичных разрядов: а) – схема 1, б) – схема 2.

На представленных схемах  $W$  – источник высокого напряжения,  $U$  – высоковольтный вольтметр,  $z_\phi$  – фильтр (блокирующий импеданс),  $z_A$  – чувствительный элемент,  $D$  – измерительный прибор,  $C_k$  – конденсатор связи,  $C_p$  – образец кабеля (объект испытаний). Так как  $W$  и  $z_\phi$  обладают высокой индуктивностью, то через ветвь их включения высокочастотный ток частичных

разрядов практически равен нулю. Реакция на частичный разряд оставшейся части схемы зависит от типа чувствительного элемента. В случае активного сопротивления форма переходного процесса имеет вид убывающей экспоненциальной функции [33, 36, 56]:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t}, \quad \alpha = \frac{1}{RC},$$

где  $U_m$  – амплитуда импульса,  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $R$  – активное сопротивление чувствительного элемента,  $C$  – эквивалентная ёмкость схемы относительно  $z_A$ .

При использовании индуктивно-резистивного элемента схема регистрации приобретает вид последовательного  $RLC$ -контура, переходный процесс в котором в ветви  $RL$  описывается функцией [33, 36, 56]:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \left( \cos(\omega t) - \frac{\alpha}{\omega} \sin(\omega t) \right), \quad \alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2},$$

где  $U_m$  – амплитуда импульса,  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\omega$  – частота собственных колебаний,  $R$  – активное сопротивление чувствительного элемента,  $L$  – индуктивность чувствительного элемента,  $C$  – эквивалентная ёмкость схемы. Но так как обычно выполняется соотношение  $\alpha^2 \ll 1/LC$ , то:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \cos(\omega t). \quad (4)$$

Рассмотрим функциональную организацию системы регистрации сигналов частичных разрядов, представленную на рисунке 1.13.

Основными компонентами системы являются: 1) – регулирующий низковольтный трансформатор (автотрансформатор), 2) – фильтр нижних частот (ФНЧ), 3) – возбуждающий трансформатор, 4) – управляемый реактор, 5) – блокирующий импеданс, 6) – объект испытания, 7) – конденсатор связи/делитель напряжения, 8) – чувствительный элемент, 9) – полосовой фильтр, 10) – регистратор частичных разрядов (усилитель и осциллограф), 11) – измеритель напряжения, 12) – компьютер, 13) – панель управления испытательной установкой; тонкой линией показаны силовые цепи, тонкой пунктирной – цепи обмена данными и измерения, толстой пунктирной – экранирование.

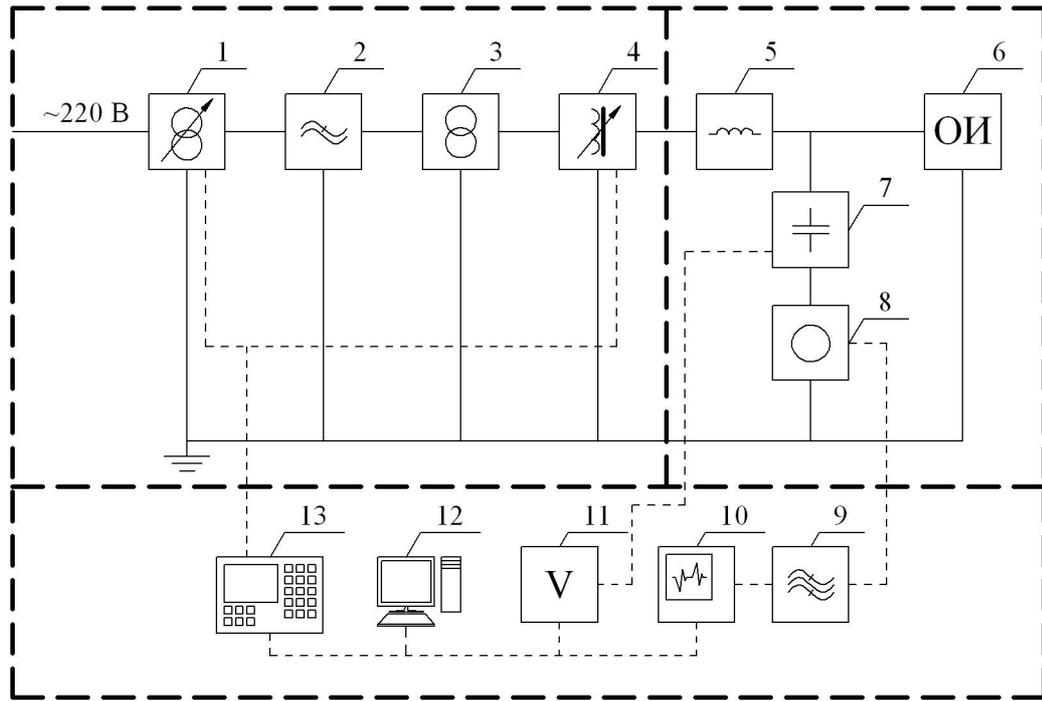


Рисунок 1.13. Функциональная схема организации системы регистрации сигналов частичных разрядов.

Функционирует система следующим образом: перед началом проведения измерений через панель управления испытательной установкой (13) или компьютер (12) к приводам регулирующего трансформатора (1) и реактора (4) в автоматическом режиме подаются управляющие сигналы для создания в измерительной цепи высокого напряжения правильной синусоидальной формы. Управляющие сигналы формируются в зависимости от показаний измерителя испытательного напряжения (11). Наличие реактора (4) необходимо для компенсации емкостных токов в электрической цепи. Фильтр нижних частот (2) и блокирующий импеданс (5) в свою очередь предназначены для защиты измерительной схемы от высокочастотных помех, передающихся по цепи питания. Регистрация частичных разрядов начинается с подачи команды с компьютера (12) на регистратор частичных разрядов (10), при этом сигнал с чувствительного элемента (8) проходит через полосовой фильтр (9), захватывающий частотный спектр частичных разрядов. Конденсатор связи (7) служит для создания замкнутого контура протекания токов частичных разрядов и

защиты измерительной цепи от воздействия испытательного напряжения. После завершения регистрации сигналов частичных разрядов измерительная информация передаётся в компьютер (12), где обрабатывается с помощью специализированного ПО.

Другой отличительной особенностью систем регистрации сигналов частичных разрядов являются меры по подавлению внешних и внутренних помех, способных существенно исказить результаты измерений, к ним относятся:

1. Измерения выполняются в экранированном помещении, которое полностью подавляет внешние электромагнитные излучения.

2. Измерительная схема снабжается собственным изолированным заземляющим устройством, препятствующим распространению помех через контур заземления.

3. В цепи питания устанавливается фильтр нижних частот, как показано на рисунке 1.13, который не позволяет высокочастотным помехам проникнуть в схему измерений.

4. Соединение открытых концов кабеля с питающей линией и оконцовка производятся через специальные кабельные муфты, заполненные трансформаторным маслом, препятствующим образованию коронных разрядов.

5. В качестве элементов измерительной схемы используется оборудование с собственным уровнем частичных разрядов не более 5 пикокулон.

В совокупности перечисленные мероприятия работают достаточно эффективно, но полностью помехи не подавляют – в регистрируемом сигнале на определённом уровне остаётся присутствие шумовых помех, влияние которых необходимо учитывать при анализе сигналов.

Определённый интерес вызывает и используемое в системе ПО, представленное набором следующих функциональных модулей:

- модуль контроля оборудования – предназначен для диагностики и мониторинга состояния силового оборудования,
- модуль управления напряжением – предназначен для регулирования

уровня испытательного напряжения и управления реактором,

- анализатор регистрируемого сигнала – предназначен для селекции импульсов частичных разрядов и определение величины максимального разряда,
- модуль градуировки схемы – предназначен для определения градуировочного коэффициента.

С измерением уровня частичных разрядов в наибольшей степени связан анализатор регистрируемого сигнала, включающий в себя алгоритмы селекции импульсов частичных разрядов, определения их амплитудных значений и статистической обработки. Поэтому совершенствование методов и алгоритмов данного компонента является одной из приоритетных задач, решение которой способно снизить влияние ошибок наложения импульсов на результаты измерений и тем самым увеличить эффективность и надёжность решений, принимаемых при определении и регулировании параметров ТП наложения электрической изоляции.

## 1.6. Анализ сигналов частичных разрядов

Для определения уровня частичных разрядов зарегистрированный сигнал в измерительной схеме должен быть соответствующим образом обработан и проанализирован. Здесь следует отметить, что механизм обработки зарегистрированного сигнала ЧР не регламентирован нормативными документами, и производители испытательных систем самостоятельно разрабатывают его логику, стараясь сделать результаты более информативными. Современные системы, как правило, поддерживают два режима работы, – детектирование и анализ частичных разрядов [57]. Детектирование представляет собой экспресс-анализ уровня частичных разрядов, определяя в качестве уровня частичных разрядов среднее значение частичных разрядов по результатам нескольких измерений после соответствующей статистической обработки, в качестве результата одного измерения принимается значение частичного разряда, соответствующее импульсу с наибольшей амплитудой. Анализ частичных разрядов предполагает более широкое использование различных инструментов анализа сигналов, которые позволяют определять тип микродефекта, количество дефектов и отстраиваться от помех.

Среди инструментов анализа сигналов частичных разрядов наиболее широко используемыми являются следующие [35, 57-59]:

- Многомерная классификация частичных разрядов по типам микродефектов на основе распределений максимальных значений частичных разрядов к фазе испытательного напряжения  $\varphi$ , средних значений частичных разрядов к  $\varphi$ , числа импульсов к  $\varphi$ , числа разрядов к их величине и числа разрядов к их энергии.

- Кластерный анализ на TFM-плоскости (Time Frequency Map), заключающийся в кластеризации импульсных скоплений в системе координат TF (T – длительность импульса, F – частота импульса), результатом анализа является

набор кластеров импульсов, соответствующих микродефектам в объекте испытаний или помехам.

- Анализ PRPD-распределения (Phase Resolved Partial Discharge), позволяющий идентифицировать тип микродефекта в зависимости от положения генерируемых им импульсов в фазе испытательного напряжения, анализ выполняется после проведения кластерного анализа на TFM-плоскости.

Также продолжают разрабатываться и развиваться и другие методы анализа регистрируемых сигналов частичных разрядов, направленные, главным образом, на помехоподавление и идентификацию типов микродефектов, к ним относятся вейвлет-преобразование [60-62], нейронные сети [63-66], фрактальный анализ [67], кластерный анализ [68, 69] и прочие...

Поскольку при регистрации частичных разрядов в заводских условиях удаётся создать условия для эффективного подавления внешних и внутренних помех, то наиболее существенным фактором, влияющим на результаты регистрации сигналов частичных разрядов, как в режиме детектирования, так и анализа, становятся ошибки наложения импульсов. В ГОСТ Р 55191-2012, являющимся переводом известного международного стандарта IEC 60270:2000, даётся следующее определение данному явлению: «ошибка от наложения импульсов (superposition error): Ошибка измерения, возникающая, когда интервал времени между входными импульсами тока меньше, чем время реакции на одиночный импульс» [52]. Согласно тому же источнику ошибки наложения могут существенно влиять на результаты измерений: «... ошибки наложения могут достигать до 100% и более в зависимости от частоты повторения импульсов и характеристик измерительной схемы». Как видно из описания данного явления в стандарте, измерения, выполненные в присутствии ошибок наложения импульсов, содержат грубые погрешности, существенно искажающие результаты и способные привести к ошибочным действиям по управлению ТП. При этом классические статистические методы по устранению из выборки измерений, содержащих грубые погрешности здесь, как правило, не работают, так как их число обычно очень велико и может охватывать до 100% выборки. И хотя

качество такой измерительной информации для принятия решений является весьма низким, она считается пригодной, так как при её использовании фактически происходит завышение (а не занижение) технических требований к изоляции, пусть это и влечёт дополнительные издержки.

Простейшим и наиболее распространённым способом по противодействию ошибкам наложения является исключение грубых погрешностей из результатов измерений [33, 35], однако данный способ хорош лишь тогда, когда доля таких грубых ошибок невелика, в противном случае уровень частичных разрядов оказывается сильно завышен.

Также число ошибок наложения существенно сокращается с уменьшением времени разрешения импульсов, однако при этом, как правило, ухудшаются показатели чувствительности измерительной схемы и точности измерений. Уменьшение времени разрешения импульсов достигается за счёт регистрации сигналов частичных разрядов в более широком частотном диапазоне. Борьба с ошибками наложений в определённом смысле всегда является компромиссом между чувствительностью измерительной схемы, точностью и временем разрешения импульсов, что объясняется увеличением мощности шумовых помех и уменьшением времени разрешения при увеличении ширины полосы частот регистрации сигналов [70].

Известны и другие способы противодействия ошибкам наложения, которые в силу ряда причин не используются при проведении испытаний на частичные разряды, но могут представлять практический интерес при решении подобных задач. Например, в [71, 72] приводится описание системы регистрации частичных разрядов (Extended Resolution Analyzer – ERA) с двумя измерительными преобразователями – основным и вспомогательным, работающими в разных частотных диапазонах. Основной измерительный преобразователь работает в диапазоне от десятков килогерц до 400 кГц, а дополнительный – в более широком частотном диапазоне до нескольких МГц. На рисунке 1.14 условно проиллюстрирован принцип работы такой системы.

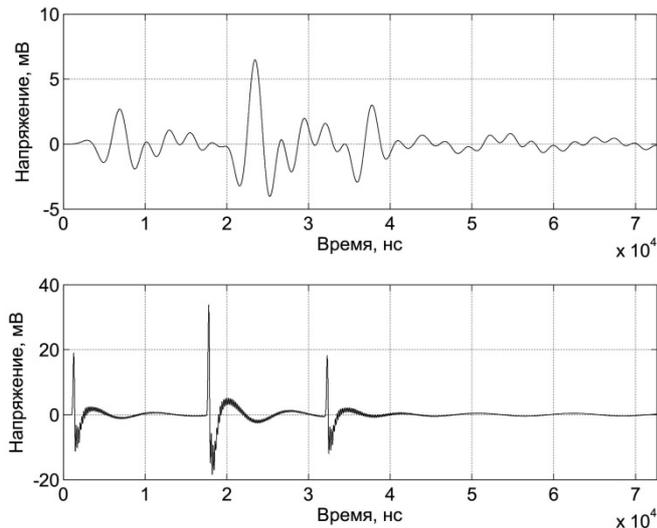


Рисунок 1.14. Отклики основного и вспомогательного преобразователей на сигналы частичных разрядов.

В соответствии с ERA-алгоритмом система реагирует на превышение некоторого порогового значения сигнала от вспомогательного измерительного преобразователя, который таким образом сигнализирует о возникновении импульса частичного разряда. Далее в определённой временной зоне сигнала с основного измерительного преобразователя определяется амплитуда импульса. Отличительной особенностью использования системы ERA является более сложная процедура градуировки измерительной схемы, в процессе которой строится масштабируемая модель импульса частичного разряда. Соответственно, после определения амплитуды импульса модель масштабируется и встраивается в зарегистрированный сигнал. Затем при определении амплитуд последующих импульсов в случае наложения производится вычитание значений построенной модели. Модели строятся для каждого импульса, обнаруженного с помощью вспомогательного измерительного преобразователя, что даёт возможность определять амплитуды сигналов даже при многократном наложении.

Основной причиной, по которой данный метод не используется в системах технического контроля, является возможность в лабораторных условиях проводить измерения в значительно более широком диапазоне, чем диапазон, в котором работают вспомогательные преобразователи, что делает применение

последних нецелесообразным.

Также известен способ измерения уровня ЧР, в соответствии с которым частота следования частичных разрядов уменьшается за счёт снижения воздействующего высокого напряжения [74]. Однако данный метод не может быть использован при испытании кабельной изоляции, так как стандартами жёстко закреплены уровни воздействующего испытательного напряжения.

Таким образом, для корректной работы системы регистрации сигналов частичных разрядов большое значение имеет противодействие ошибкам наложения импульсов частичных разрядов. Как показало исследование, существующие методы и алгоритмы решения данной задачи не всегда эффективны и имеют определённые ограничения, поэтому их развитие и совершенствование позволит не только сократить влияние ошибок наложения на результаты измерений, но и уменьшить затраты времени и ресурсов в процессе принятия решений при управлении производственным процессом.

### 1.7. Выводы по первой главе

В первой главе были рассмотрены вопросы, касающиеся технологии производства кабельной продукции, наложения электрической изоляции и образования опасных микродефектов. В данном контексте были рассмотрены имеющиеся проблемы, связанные с диагностикой причин образования опасных микродефектов и регулированием параметров ТП. Кроме того, был подробно рассмотрен метод частичных разрядов, являющийся основным методом по определению степени опасности внутренних и поверхностных микродефектов электрической изоляции. Отдельный параграф был посвящен обработке результатов измерений сигналов частичных разрядов с обзором современных методов и алгоритмов для решения данной задачи. По результатам проведённого исследования были сделаны следующие выводы:

1. Диагностика причин образования опасных микродефектов является слабо структурированной задачей, содержит в себе значительную долю неопределённости, что создаёт для ЛПП определённые трудности в вопросах формализации оценок правдоподобия возможных причин микродефектов по имеющемуся набору признаков и вызывает необходимость в информационно-аналитической поддержке, позволяющей снизить число ошибок, увеличивающих затраты времени и ресурсов, и снижающих эффективность производственного процесса.

2. В процессе формализации ожидаемых полезностей альтернативных режимов функционирования ТП наложения электрической изоляции необходимо отслеживать одновременно несколько технических характеристик, что в совокупности с использованием субъективного подхода к определению вероятностей невыполнения требований к техническим характеристикам может приводить к принятию ошибочных решений и снижению производительности ТП. Соответственно необходима разработка алгоритма расчёта этих вероятностей с последующей его интеграцией в информационно-аналитическую систему,

осуществляющую формализацию ожидаемых полезностей режимов функционирования ТП наложения электрической изоляции.

3. Надёжность и эффективность решений, принимаемых ЛПР при определении и регулировании параметров ТП, связана также с негативным влиянием ошибок наложения импульсов на результаты измерений уровня частичных разрядов в изоляции кабелей, в результате которых уровень частичных разрядов оказывается завышенным, что вызывает образование дополнительных издержек (затрат времени и ресурсов на проведение экспериментов). Для решения данной проблемы необходима разработка специального алгоритма селекции сигналов частичных разрядов, устойчивого к ошибкам наложения импульсов.

## **Глава 2. Разработка логико-математического аппарата, алгоритмов и информационно-аналитических структур управления производством кабельной продукции**

### **2.1. Модель интеллектуальной системы поддержки принятия решений**

#### **2.1.1. Архитектура и задачи системы поддержки принятия решений**

В соответствии с поставленными перед СППР задачами разрабатываемая система имеет модульную структуру с общим интерфейсом пользователя. Каждый модуль состоит из нескольких компонентов, взаимодействие которых позволяет решать поставленные задачи. Состав и назначение компонентов модулей определяются в соответствии с выбранными методами решения. Рассмотрим математическую постановку задач СППР, методы решения и разработанную на их основе архитектуру системы.

##### **Задача 1 – диагностика причин образования опасных микродефектов.**

Задача по диагностике причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции в контексте общей задачи поддержки принятия решений представляет собой задачу классификации.

Пусть имеется множество объектов классификации  $\Omega$ , в нашем случае это образцы кабеля, элементы данного множества –  $\omega \in \Omega$ . Существует индикаторная функция  $g(\omega)$ , разбивающая множество объектов  $\Omega$  на  $V$  классов, представляющих собой причины образования опасных микродефектов, функция  $g(\omega)$  – не задана. Определено также пространство признаков объектов  $\Theta$ , описывающее технические характеристики изоляции, тип поверхностных микродефектов и исключения. Требуется найти решающее правило  $\hat{g}(\theta)$  (под решающим правилом понимаем механизм отображения входного вектора признаков причин микродефектов  $\theta$  в нечёткое множество классов причин

микродефектов  $\tilde{V}^*$ ):

$$\hat{g} : \theta \rightarrow \tilde{V}^* \quad (5)$$

и увеличить качество классификации  $Q_g$  по мере накопления диагностической информации при заданном пользователем объеме  $N$  итераций поиска лучших параметров правила  $\hat{g}(\theta)$ :

$$Q_g(\mathbf{P}_g^i) - \varepsilon_i > Q_g(\mathbf{P}_g^{i-1}) + \varepsilon_{i-1}, \quad (6)$$

где:

$\theta$  – матрица-вектор значений признаков причин образования опасных микродефектов,

$\tilde{V}^*$  – нечёткое множество вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ , в котором каждому классу причин образования опасных микродефектов  $v_i$  соответствует его степени принадлежности  $\mu(v_i)$ ,

$Q_g$  – показатель качества классификации правила  $\hat{g}(\theta)$ ,

$\mathbf{P}_g$  – параметрическая матрица решающего правила  $\hat{g}(\theta)$ ,

$\varepsilon$  – предельная ошибка оценки качества классификации  $Q_g$ ,

$i$  – номер обучающего цикла.

Для определения решающего правила  $\hat{g}(\theta)$  были разработаны база знаний и машина нечёткого логического вывода, аккумулирующие и использующие опыт экспертов рассматриваемой предметной области. Оценка качества классификации  $Q_g$  производится на основе макроусреднения  $F_1$ -метрики. Увеличение  $Q_g$  осуществляется на основе метода деформируемого многогранника. Здесь следует отметить, что задача (6) может быть решена не для каждого обучающего цикла в силу ограничений по числу итераций и объёму диагностической информации, влияющей на величину ошибки  $\varepsilon$ . Однако по мере накопления данных диагностики и увеличении числа итераций  $N$  задача может быть решена в последующих обучающих циклах.

Соответственно модуль диагностики должен включать четыре логических компонента: машина нечёткого логического вывода, компонент обучения, базу знаний и базу данных.

## Задача 2 – оптимизация параметров регулирования ТП наложения электрической изоляции.

Оптимизация параметров регулирования (задача (2)) осуществляется на основе критерия ожидаемой полезности и подчиняется стандартному механизму принятия решений в условиях риска [75]. Определение вероятностей альтернативных решений производится на основе разработанного нами алгоритма, использующего для решения данной задачи анализ вероятностей возможных траекторий системы с последующим сложением вероятностей по всем характеристикам  $y_k$ . Полезности альтернативных решений определяются или на основе готовой специально разработанной экономической модели, или на основе субъективной кусочно-линейной оценочной модели ЛПР. На выходе пользователю предоставляются данные по всем альтернативным решениям в порядке убывания их ожидаемой полезности.

Соответственно модуль оптимизации СППР должен включать три логических компонента: компонент анализа альтернатив, компонент оценки полезности и компонент оценки вероятностей.

Для решения поставленных задач была разработана интеллектуальная СППР с внутренней архитектурой, схема которой представлена на рисунке 2.1.

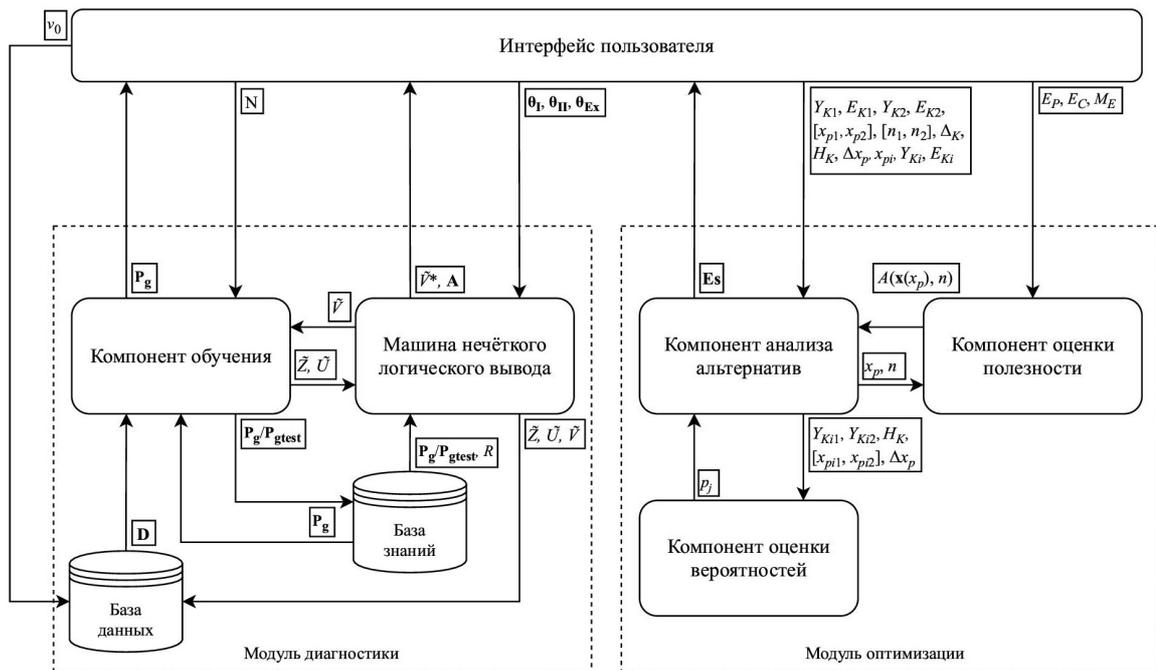


Рисунок 2.1. Архитектура разработанной интеллектуальной СППР.

Здесь:

$\theta_I$  – матрица-вектор признаков причин образования опасных микродефектов по значениям технических характеристик,  $\theta \in \Theta_I$ ,

$\theta_{II}$  – матрица-вектор признаков причин образования опасных микродефектов по типу поверхностных микродефектов,  $\theta_{II} \in \Theta_{II}$ ,

$\theta_{Ex}$  – матрица-вектор исключаяющих признаков причин образования опасных микродефектов,  $\theta_{Ex} \in \Theta_{Ex}$ ,

$A$  – массив рекомендаций по устранению причин образования опасных микродефектов,

$P_g$  – параметрическая матрица базы знаний,

$P_{gtest}$  – тестовая параметрическая матрица базы знаний,

$D$  – массив данных накопленных результатов диагностики,

$Es$  – массив ожидаемых полезностей и вероятностей невыполнения условия (3) всех альтернативных решений в порядке убывания их ожидаемой полезности,

$\tilde{Z}$  – нечёткое множество технических характеристик  $z_i$  со степенью принадлежности  $\mu(z_i)$  вида  $\{z_i, \mu(z_i) \mid z_i \in Z\}$ ,  $Z$  – множество анализируемых технических характеристик,

$\tilde{U}$  – нечёткое множество типов поверхностных микродефектов  $u_i$  со степенью принадлежности  $\mu(u_i)$  вида  $\{u_i, \mu(u_i) \mid u_i \in U\}$ ,  $U$  – множество типов поверхностных микродефектов,

$\tilde{V}$  – нечёткое множество классов причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ ,  $V$  – множество классов причин образования опасных микродефектов,

$\tilde{V}^*$  – результирующее нечёткое множество классов причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ ,

$R$  – множество продукционных правил,

$N$  – число итераций обучающего цикла,

$v_0$  – класс истинной причины образования опасных микродефектов в

объекте  $\omega$ ,

$E_P$  – множество оценок производительности  $P(\mathbf{x}(x_p))$  в узловых точках,

$E_C$  – множество оценок стоимости управления  $C(n)$  в узловых точках,

$M_E$  – готовая специальная экономическая модель оценок полезности,

$[x_{p1}, x_{p2}]$  – область определения значений  $x_p$  с заданным шагом дискретизации  $\Delta x_p$ ,

$[n_1, n_2]$  – область определения значений  $n$  с шагом  $\Delta n = 1$ ,

$x_{pi}$  – значение параметра регулирования  $x_p$  на  $i$ -ом шаге алгоритма  $\Lambda$ ,

$Y_{K1}$  – множество значений технических характеристик кабельной изоляции на пространстве  $K$  в режиме  $\mathbf{x}(x_{p1})$ ,

$Y_{K2}$  – множество значений технических характеристик кабельной изоляции на пространстве  $K$  в режиме  $\mathbf{x}(x_{p2})$ ,

$Y_{Ki}$  – множество значений технических характеристик кабельной изоляции на пространстве  $K$  в режиме  $\mathbf{x}(x_{pi})$ ,

$E_{K1}$  – множество значений абсолютных погрешностей измерений технических характеристик  $Y_{K1}$  кабельной изоляции на пространстве  $K$  в режиме  $\mathbf{x}(x_{p1})$ ,

$E_{K2}$  – множество значений абсолютных погрешностей измерений технических характеристик  $Y_{K2}$  кабельной изоляции на пространстве  $K$  в режиме  $\mathbf{x}(x_{p2})$ ,

$E_{Ki}$  – множество значений абсолютных погрешностей измерений технических характеристик  $Y_{Ki}$  кабельной изоляции на пространстве  $K$  в режиме  $\mathbf{x}(x_{pi})$ ,

$H_K$  – множество требований к техническим характеристикам кабельной изоляции на пространстве  $K$ ,

$\Delta_K$  – множество требований к запасу устойчивости значений технических характеристик кабельной изоляции на пространстве  $K$ ,

$A(\mathbf{x}(x_p), n)$  – полезность некоторого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП  $\mathbf{x}(x_p)$  при числе экспериментов  $n$  с учётом последующей итерации,

$p_j$  – вероятность невыполнения условия (3) для  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП.

В соответствии с представленной схемой СППР содержит в себе следующие функциональные элементы:

1. Интерфейс пользователя – предназначен для взаимодействия ЛПР с программным комплексом.

2. Машина нечёткого логического вывода – предназначена для извлечения и обработки экспертной информации из базы знаний.

3. Компонент обучения – предназначен для корректировки параметров продукционных правил с целью повышения качества классификации.

4. База знаний – предназначена для хранения экспертной информации выбранной предметной области.

5. База данных – предназначена для хранения данных, поступающих на вход и выход нечёткого классификатора в процессе эксплуатации системы.

6. Компонент анализа альтернатив – предназначен для расчёта ожидаемых полезностей альтернативных решений (режимов функционирования ТП) на следующем шаге алгоритма  $\Lambda$ .

7. Компонент оценки полезности – предназначен для оценки полезностей альтернативных решений (режимов функционирования ТП) на следующем шаге алгоритма  $\Lambda$ .

8. Компонент оценки вероятностей – предназначен для оценки вероятностей невыполнения условия (3) при реализации альтернативных решений (режимов функционирования ТП) на следующем шаге алгоритма  $\Lambda$ .

Логико-математический аппарат функционирования каждой из перечисленных компонент подробно рассматривается в последующих параграфах. Здесь лишь отметим, что модуль диагностики оказывает помощь в определении причин образования опасных микродефектов только для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 6 до 35 кВ и отражает специфику их изготовления. Кабели данного класса были выбраны исходя из их востребованности рынком и доли (более 90%), которую они занимают в общем

объёме производства кабельной продукции. При необходимости система может быть расширена на кабели других типов и классов напряжений путём добавления новых производционных правил и функций принадлежности.

### 2.1.2. База знаний

База знаний СППР построена на основе модифицированной производционной модели, в которой знания представлены набором правил, включающих весовые коэффициенты логических выражений [76-78]. Перечень разработанных производционных правил представлен в Приложении А таблице А.4, число правил соответствует числу возможных причин образования опасных микродефектов. Для составления производционных правил базы знаний была использована экспертная информация, что обусловлено следующими причинами:

1. В процессе диагностики причин микродефектов кабельной изоляции используются признаки, по которым ранее статистическая информация не накапливалась, но которые активно использовались при решении данной задачи.

2. Накопление и сбор статистической информации с учётом новых признаков потребует неприемлемых затрат времени.

Сбор экспертной информации проводился методом очного анкетирования. Цель проведения экспертизы формулировалась следующим образом: сбор информации о значениях технических характеристик кабелей на напряжение от 6 до 35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и их взаимосвязи с параметрами регулирования ТП наложения электрической изоляции (таблица 1), вызывающими образование опасных микродефектов.

Формирование экспертной группы производилось комбинацией нескольких способов – на основе взаимных рекомендаций, формальных признаков и собственных самооценок экспертов. Каждый эксперт помимо получения рекомендации должен был соответствовать следующим требованиям:

1. Наличие профильного очного высшего образования.

2. Занимаемая должность связана с производством или испытанием кабельной изоляции (технолог, инженер отдела технического контроля, инженер испытательной лаборатории и производные).

3. Стаж работы в занимаемой должности не менее 10 лет.

Набор экспертов в рабочую группу и оценивание знаний производились на основе их собственных самооценок по подготовке сырья, экструзии и вулканизации кабельной изоляции. Целевым показателем была оценка не ниже 8 по 10-тибалльной шкале. В результате была сформирована рабочая группа из двенадцати экспертов, имеющая следующие оценки:

- в области подготовки сырья – 8,75,
- в области экструзии – 8,08,
- в области вулканизации – 8,08.

Отметим, что численность экспертной группы из 12 человек находится в наиболее оптимальном диапазоне от 5 до 15 человек [79-81].

Для сбора интересующей информации экспертам предлагалось ответить на вопросы из анкеты, макет которой представлен на рисунке 2.2. Подготовка анкеты осуществлялась на основе технической литературы и нормативных документов.

<b>Анкета</b>
<p><b>Описание ситуации:</b>  <i>Пусть для изготовленного образца кабеля выполняются все технические требования к изоляции кроме требования к уровню частичных разрядов. Требуется определить причину образования опасных частичных разрядов, используя результаты технического контроля других показателей, косвенно указывающих на возможную причину. Считать при этом оборудование производственной линии исправным.</i></p> <p><b>Вопросы:</b>  <i>1 - 8. Как вы считаете, какие технические характеристики кабельной изоляции и в какой мере связаны с образованием микродефектов, способных вызвать в изоляции опасные частичные разряды вследствие &lt;причина <math>v_i, v_i \in V</math>&gt;?</i></p> <p><i>Перечень технических характеристик</i></p> <p><i>9. Укажите для каждой технической характеристики предельное значение, начиная с которого она начинает учитываться при диагностике причины образования микродефектов, способных вызвать опасные частичные разряды?</i></p> <p><i>Перечень технических характеристик</i></p> <p><i>10. Укажите для каждой технической характеристики предельное значение, начиная при котором она оказывает сильное влияние на диагностику причины образования микродефектов, способных вызвать опасные частичные разряды?</i></p> <p><i>Перечень технических характеристик</i></p>

Рисунок 2.2. Макет анкеты экспертного опроса.

Для определения меры взаимосвязи показателей качества и причин образования опасных микродефектов использовалась оценочная шкала, представленная в таблице 3.

Таблица 3 – Оценочная шкала меры взаимосвязи значений технических характеристик и причин образования опасных микродефектов

Ранг	Вербальная оценка
0	«отсутствует»
1	«очень низкая»
2	«низкая»
3	«средняя»
4	«высокая»
5	«очень высокая»

В результате проведения экспертного опроса были сформированы соответствующие массивы данных, обработка которых производилась в соответствии с подходами, изложенными Бешелевым С.Д. и Гурвич Ф.Г. в [82], включающими оценку качества собранной информации, оценку компетентности экспертов с последующим усреднением ответов. Для оценки качества собранной информации был произведён расчёт коэффициентов вариации  $k_V$  по следующей формуле [82]:

$$k_V = \frac{\sigma}{x_{\text{ср}}} \cdot 100\%,$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение,  $x_{\text{ср}}$  – среднее арифметическое оценок.

В результате расчёта наибольшее значение коэффициента вариации оказалось равным 20,1%, среднее – 9,8%. В соответствии с [83] интерпретация значений  $k_V$  осуществляется по следующей шкале:

- до 10% – слабые колебания в ответах экспертов,
- от 10 до 25% – умеренные колебания,
- выше 25% – высокие колебания.

Соответственно в целом проведённое исследование можно определить как имеющее низкую вероятность ошибок экспертных оценок, в наиболее неоднозначном вопросе – как умеренную.

Для определения весовых коэффициентов логических выражений продукционных правил  $w_{ij}$ , где  $i$  – номер продукционного правила,  $j$  – номер логического выражения, производится расчёт коэффициентов компетентности экспертов, определение которых согласно [84-86] является слабо структурированной задачей, что делает эти оценки весьма условными. Следуя рекомендациям тех же источников, для определения коэффициентов компетентности мы использовали комбинацию нескольких оценок, в результате которой расчётная формула приняла следующий вид [87]:

$$k_c = k_{\text{стаж}} \cdot k_{\text{долж}} \cdot k_{\text{др}} \cdot (2 - k_{\Delta}), \quad (7)$$

где  $k_{\text{стаж}}$  – коэффициент стажа,  $k_{\text{долж}}$  – коэффициент занимаемой должности,  $k_{\text{др}}$  – коэффициент доли рынка предприятия,  $k_{\Delta}$  – коэффициент отклонения суждения эксперта. Коэффициенты  $k_{\text{стаж}}$ ,  $k_{\text{долж}}$  и  $k_{\text{др}}$  принимаются в соответствии с таблицей 4, коэффициент  $k_{\Delta}$  рассчитывается по формуле [86]:

$$k_{\Delta} = \frac{\Delta_i}{\Delta_{\text{max}}},$$

где  $\Delta_i$  – абсолютное значение отклонения суждения  $i$ -ого эксперта от среднего,  $\Delta_{\text{max}}$  – максимальное отклонение от среднего.

Таблица 4 – Шкала оценки коэффициентов  $k_{\text{стаж}}$ ,  $k_{\text{долж}}$  и  $k_{\text{др}}$

Стаж, $k_{\text{стаж}}$		Должность, $k_{\text{долж}}$		Доля рынка, $k_{\text{др}}$
от 10 до 15 лет	1,5	исполнитель	1,5	1 + $\omega/\omega_{\text{max}}$
от 15 до 25 лет	1,75	управляющий СЗ	1,75	
более 25 лет	2	управляющий ВЗ	2	
СЗ – среднее звено (начальник отдела, цеха, заведующий лабораторией ...); ВЗ – высшее звено (главный инженер, главный технолог, директор по качеству ...); $\omega$ – занимаемая предприятием доля российского рынка [88].				

Результаты расчётов коэффициентов компетентности представлены в Приложении А таблице А.2. Полученные по (7) оценки позволяют зафиксировать

групповые результаты ответов на вопросы анкеты как средневзвешенные значения по всем экспертам, в качестве весов выступают соответствующие коэффициенты  $k_c$ . Групповые ответы на вопросы 1-8 определяют весовые коэффициенты  $w_{ij}$  логических выражений продукционных правил, множество которых в рамках задачи (6) представлено параметрической матрицей  $\mathbf{P}_g$  решающего правила  $\hat{g}(\theta)$ , приведённой также в Приложении А таблице А.5.

### 2.1.3. Машина нечёткого логического вывода

В основе работы разработанной нами машины нечёткого логического вывода лежит механизм нечёткого абдуктивного вывода, заключающийся в определении наиболее правдоподобного объяснения (причины) относительно имеющегося наблюдения (результата) [89]. Включение нечёткой логики в процесс абдуктивного вывода является развитием существующих подходов в данном направлении, описанных в работах [90, 91]. Основным отличием разработанного нами механизма является использование в качестве критерия правдоподобия не покрытий множеств, а степени принадлежности  $\mu(v_i)$  класса возможных причин микродефектов  $v_i$  некоторому результирующему нечёткому множеству  $\tilde{V}^*$ , являющимся покрытием всех классов возможных причин. Кроме того, в системе присутствуют дополнительные функциональные блоки (два фаззификатора для разных типов данных, формирователь исключений и оператор пересечения), а в качестве функций активации используется взвешенное среднее.

Функциональная схема машины для решения задачи (5) разработана и представлена на рисунке 2.3 [87], где:

$\theta_I$  – матрица-вектор значений признаков,  $\theta_I \in \Theta_I$ ,

$\theta_{II}$  – матрица-вектор значений признаков,  $\theta_{II} \in \Theta_{II}$ ,

$\theta_{Ex}$  – матрица-вектор исключений,  $\theta_{Ex} \in \Theta_{Ex}$ ,

$Z$  – множество анализируемых технических характеристик,

$U$  – множество типов поверхностных микродефектов,

$V$  – множество классов причин образования опасных микродефектов,  
 $\tilde{Z}$  – нечёткое множество технических характеристик  $z_i$  со степенью принадлежности  $\mu(z_i)$  вида  $\{z_i, \mu(z_i) \mid z_i \in Z\}$ ,  $Z$  – множество анализируемых технических характеристик,

$\tilde{U}$  – нечёткое множество типов поверхностных микродефектов  $u_i$  со степенью принадлежности  $\mu(u_i)$  вида  $\{u_i, \mu(u_i) \mid u_i \in U\}$ ,  $U$  – множество типов поверхностных микродефектов,

$\tilde{V}$  – нечёткое множество классов причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ ,

$\tilde{V}_{\text{ex}}$  – нечёткое множество исключений по классам причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ ,

$\tilde{V}^*$  – результирующее нечёткое множество классов причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ ,

$R$  – набор продукционных правил,

$P_g$  – параметрическая матрица базы знаний,

$P_{g\text{test}}$  – тестовая параметрическая матрица базы знаний,

$Q_g$  – показатель качества классификации.

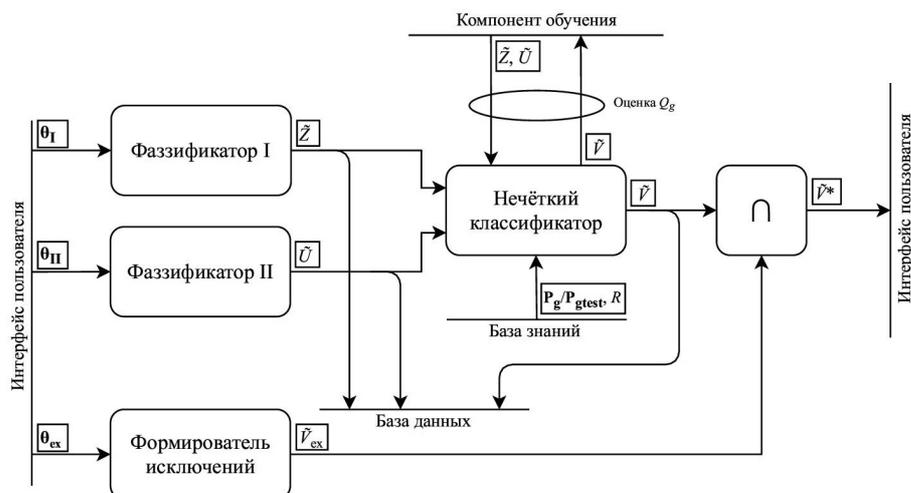


Рисунок 2.3. Функциональная схема машины нечёткого логического вывода.

Описания пространств  $\Theta_I$ ,  $\Theta_{II}$ ,  $\Theta_{Ex}$  и множеств  $Z$ ,  $U$ ,  $V$ , используемых в машине нечёткого логического вывода, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Множества и пространства машины нечёткого логического вывода

Пространства	
Наименование	Измерения
$\Theta_I$	1) тангенс угла диэлектрических потерь, 2) содержание гель-фракции, 3) относительное удлинение под нагрузкой, 4) остаточное относительное удлинение после снятия нагрузки, 5) усадка, 6) водопоглощение, 7) величина выступов на электропроводящем экране, 8) отношение высоты к основанию выступа на электропроводящем экране, 9) размер поверхностных микродефектов изоляции
$\Theta_{II}$	1) трещина/усадочная раковина, 2) трещина/твёрдая частица, 3) трещина/пора, 4) трещина/область нагара, 5) твёрдая частица/усадочная раковина, 6) твёрдая частица/пора, 7) твёрдая частица/область нагара, 8) область нагара/усадочная раковина, 9) область нагара/пора, 10) пора/усадочная раковина
$\Theta_{Ex}$	1) эластическая турбулентность, 2) эластическое восстановление, 3) усадка, 4) трение в матрице, 5) высокое содержание примесей в сырье, 6) высокое содержание влаги в сырье, 7) продукты химических реакций, 8) поверхностные дефекты экрана, 9) выполнение измерений частичных разрядов до проведения специальных испытаний, 10) выполнение измерений частичных разрядов после испытания на изгиб, 11) выполнение измерений частичных разрядов после воздействия циклов нагрева и охлаждения
Множества	
Наименование	Элементы
$Z$	1) тангенс угла диэлектрических потерь, 2) содержание гель-фракции, 3) относительное удлинение под нагрузкой, 4) остаточное относительное удлинение после снятия нагрузки, 5) усадка, 6) водопоглощение, 7) величина выступов на электропроводящем экране, 8) отношение высоты к основанию выступа на электропроводящем экране, 9) размер трещин на поверхности изоляции, 10) размер усадочных раковин на поверхности изоляции, 11) размер твёрдых частиц на поверхности изоляции, 12) размер пор на поверхности изоляции, 13) размер областей нагара на поверхности изоляции
$U$	1) трещины, 2) усадочные раковины, 3) твёрдые частицы, 4) поры, 5) области нагара
$V$	1) эластическая турбулентность, 2) эластическое восстановление, 3) усадка, 4) трение в матрице, 5) высокое содержание примесей в сырье, 6) высокое содержание влаги в сырье, 7) продукты химических реакций, 8) поверхностные дефекты экрана

Принцип работы машины нечёткого логического вывода: на первом этапе выполняется фаззификация данных, включающих значения технических характеристик и различимость типов поверхностных микродефектов, полученных от ЛПР через интерфейс пользователя. Полученные нечёткие множества  $\tilde{Z}$  и  $\tilde{U}$  передаются в нечёткий классификатор, который в соответствии с продукционными правилами  $R$  и параметрической матрицей  $P_g$  формирует прообраз нечёткого множества причин образования опасного микродефекта  $\tilde{V}$ . Формирователь исключений на основе входной информации формирует свой

прообраз  $\tilde{V}_{ex}$ , пересечение которого с  $\tilde{V}$  образует результирующее нечёткое множество  $\tilde{V}^*$ , которое и передаётся конечному пользователю – ЛПР. Множество  $\tilde{V}^*$  не даёт окончательный ответ о причинах образования опасных микродефектов, а лишь сообщает ЛПР об их выраженности, что помогает ему самостоятельно принять окончательное решение.

Машина нечёткого логического вывода также используется в процессе параметрической оптимизации весов логических выражений продукционных правил, при которой информация на вход нечёткого классификатора поступает непосредственно от компонента параметрической оптимизации. Машина в данном случае работает аналогичным образом.

Рассмотрим более подробно работу каждого блока.

**Фаззификатор I** служит для вычисления степени принадлежности входных данных контроля технических характеристик кабельной изоляции некоторым нечётким множествам. Для выполнения фаззификации используются функции принадлежности следующих видов:

для технических характеристик с одним левым ограничителем:

$$\mu(x) = \begin{cases} ax + b & \text{для } c_1 < x \leq c_2, \\ 1 & \text{для } x \leq c_1, \\ 0 & \text{для } x > c_2; \end{cases}$$

для технических характеристик с одним правым ограничителем:

$$\mu(x) = \begin{cases} ax + b & \text{для } c_1 < x \leq c_2, \\ 0 & \text{для } x \leq c_1, \\ 1 & \text{для } x > c_2; \end{cases}$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты функции принадлежности,  $c_1$ ,  $c_2$  – границы областей определения функции принадлежности. На выходе фаззификатора мы получаем множество  $\tilde{Z}$ .

**Фаззификатор II** предназначен для определения типа микродефекта на основе парных сравнений узнаваемости различных типов микродефектов  $u_i \in U$  в имеющемся образе. Матрица суждений **B** формируется на основе вектора  $\theta_{II}$ , получаемого на основе различения ЛПР альтернативных типов микродефектов,

шкала для построения матрицы суждений представлена в таблице 6 [92].

Согласно методу парных сравнений [92] элементами матрицы **B** будут парные оценки степени узнаваемости двух типов микродефектов. При заполнении матрицы в каждую строку, соответствующую определённому типу, помещаются вербальные оценки его узнаваемости относительно другого типа.

Таблица 6 – Шкала для построения матрицы суждений

Ранг	Вербальная оценка
1	«отсутствует преимущество»
3	«слабое преимущество»
5	«существенное преимущество»
7	«очевидное преимущество»
9	«несомненное преимущество»

В результате формируется матрица суждений следующего вида:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & b_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{51} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \text{ причём } b_{ij} = (b_{ji})^{-1}.$$

Далее решается матричное уравнение:

$$\mathbf{B}\mathbf{w} = \lambda\mathbf{w},$$

где  $\lambda$  – собственное значение матрицы. Уравнение имеет отличное от  $\mathbf{w} = 0$  решение только при  $\Delta(\mathbf{B} - \lambda\mathbf{E}) = 0$ . Тогда после выражения определителя получается уравнение пятой степени относительно нуля. Решая его, получаем пять корней и выбираем наибольший  $\lambda_{\max}$ , после чего составляем новое уравнение:

$$(\mathbf{B} - \lambda_{\max}\mathbf{E})\mathbf{w} = 0.$$

При его решении получаем систему линейных алгебраических уравнений, которая имеет только нулевое решение. Для нахождения вектора  $\mathbf{w}$  одно из уравнений заменяется условием нормировки ( $\sum w_i = 1$ ). В результате решения системы определяются значения элементов вектора  $\mathbf{w}$ , каждый из которых ставится в соответствии степени принадлежности образа микродефекта

соответствующему типу. И окончательно получаем на выходе множество значений функции принадлежности по каждому классу микродефектов  $\tilde{U}$ .

**Нечёткий классификатор** предназначен для получения нечёткого прообраза причин микродефектов  $\tilde{V}$ . В соответствии с [93] процедура классификации включает в себя 3 этапа: вычисление степени выполнения продукционных правил, активация и аккумуляция исходов правил.

Степень выполнения правил  $R$ , содержащих веса в логических выражениях левой части, рассчитывается методом средней взвешенной суммы значений функций принадлежности логических выражений, часто используемым в системах диагностики [76-78]. Конъюнкция между элементами множеств  $U$  и  $Z$  выполняется с помощью оператора PROD, отражающего более сильную взаимосвязь типа микродефекта и степени его развития.

Далее производится активация заключений правил, функции принадлежности которых  $\mu(v_i)$   $v_i \in V$  являются синглетонами, равными единице. Соответственно, в результате процедуры активации получаем значения функций принадлежности исходов правил, равные степени выполнения их левой части. Последующая аккумуляция объединяет исходы правил в единый прообраз причины образования опасных микродефектов  $\tilde{V}$ .

**Формирователь исключений** предназначен для получения прообраза  $\tilde{V}_{ex}$ , который синтезируется на основе исключения тех или иных причин микродефектов в цикле алгоритма  $\Lambda$ , на основе субъективных оценок ЛПР, а также на основе дополнительной информации относительно уровня ЧР, например, до и после испытания циклами нагрева и охлаждения.

**Оператор пересечения** предназначен для выполнения операции пересечения прообразов  $\tilde{V}$  и  $\tilde{V}_{ex}$  с помощью оператора MIN. На выходе получаем результирующий образ причин образования опасных микродефектов  $\tilde{V}^*$ .

### 2.1.4. Компонент обучения

Для реализации компонента обучения была разработана функциональная схема, представленная на рисунке 2.2.

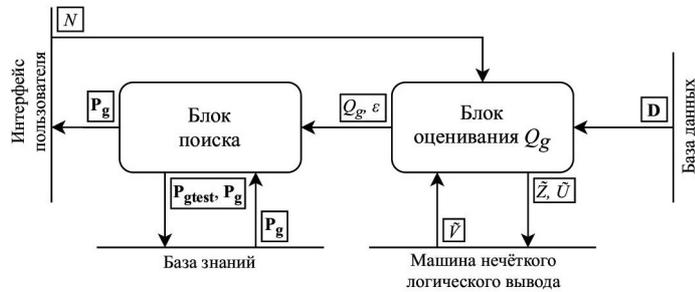


Рисунок 2.4. Функциональная схема компонента обучения.

Здесь:

$P_{gtest}$  – тестовая параметрическая матрица базы знаний,

$P_g$  – параметрическая матрица базы знаний,

$D$  – массив данных накопленных результатов диагностики,

$\tilde{Z}$  – нечёткое множество технических характеристик  $z_i$  со степенью принадлежности  $\mu(z_i)$  вида  $\{z_i, \mu(z_i) \mid z_i \in Z\}$ ,

$\tilde{U}$  – нечёткое множество типов поверхностных микродефектов  $u_i$  со степенью принадлежности  $\mu(u_i)$  вида  $\{u_i, \mu(u_i) \mid u_i \in U\}$ ,

$\tilde{V}$  – нечёткое множество классов причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in V\}$ ,

$Q_g$  – показатель качества классификации,

$N$  – число итераций обучающего цикла,

$\varepsilon$  – предельная ошибка оценки качества классификации  $Q_g$ .

Принцип работы компонента обучения: для решения задачи увеличения величины  $Q_g$  используется метод деформируемых многогранников, корректирующий веса логических выражений продукционных правил  $w_{ij}$  ( $i$  – номер продукционного правила,  $j$  – номер логического выражения) по мере накопления информации в базе данных по результатам диагностики.

Инициирование процесса обучения производится пользователем при условии накопления достаточного объёма диагностической информации  $\mathbf{D}$ . В процессе обучения для каждого тестового набора весов  $\mathbf{P}_{\text{gtest}}$ , образующего вершины многогранника в пространстве поиска  $W$ , данные  $\mathbf{D}$  пропускаются через машину нечёткого логического вывода, результаты работы которой используются для расчёта показателя  $Q_g$  и ошибки  $\varepsilon$ . Данная процедура повторяется заданное пользователем число  $N$  раз. Если в процессе поиска было найдено решение, удовлетворяющее условию (6), то оно принимается в качестве нового набора параметров (матрица  $\mathbf{P}_g$ ) решающего правила  $\hat{g}(\theta)$ .

Рассмотрим более подробно работу каждого блока.

**Блок поиска** предназначен для поиска более эффективной конфигурации решающего правила  $\hat{g}(\theta)$ , для чего используется метод деформируемого многогранника, функционирующий по следующему алгоритму [94, 95]:

1) Выбор начального приближения, определяемого начальной экспертной информацией или предшествующими результатами обучения:

$$\mathbf{s}^{(0)} = [s_1^{(0)} \ s_2^{(0)} \ \dots \ s_n^{(0)}],$$

где координаты вектора вершины  $\mathbf{s}^{(0)}$  соответствуют весам логических выражений продукционных правил  $w_{ij}$ , хранящимся в исходной матрице  $\mathbf{P}_g$  на  $i-1$  цикле обучения.

2) Определение вершин многогранника в соответствии с таблицей 7 и формулами:

$$d_1 = \frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} + n - 1), \quad d_2 = \frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} - 1),$$

где  $d_1, d_2$  – координаты вершин многогранника,  $n$  – размерность пространства  $W$ ,  $t$  – длина ребра.

В соответствии с бальной дифференциацией, предлагаемой экспертам при оценивании важности технических характеристик, примем  $t = 1$ .

Таблица 7 – Координаты вершин многогранника

№ вершины	$s_1$	$s_2$	$s_3$	...	$s_n$
1	$s_1^{(0)}$	$s_2^{(0)}$	$s_3^{(0)}$	...	$s_n^{(0)}$
2	$s_1^{(0)} + d_1$	$s_2^{(0)} + d_2$	$s_3^{(0)} + d_2$	...	$s_n^{(0)} + d_2$
3	$s_1^{(0)} + d_2$	$s_2^{(0)} + d_1$	$s_3^{(0)} + d_2$	...	$s_n^{(0)} + d_2$
...	...	...	...	...	...
$n + 1$	$s_1^{(0)} + d_2$	$s_2^{(0)} + d_2$	$s_3^{(0)} + d_2$	...	$s_n^{(0)} + d_n$

3) Вычислить значения целевой функции  $Q_g$  в вершинах многогранника.

4) Определение вершин  $\check{\mathbf{s}} = \operatorname{argmin}(Q_g(\mathbf{s}))$ ,  $\hat{\mathbf{s}} = \operatorname{argmax}(Q_g(\mathbf{s}))$  и координат центра  $\mathbf{s}_{\text{цт}}$  тяжести без учёта вершины  $\check{\mathbf{s}}$ :

$$\mathbf{s}_{\text{цт}} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{n+1} \mathbf{s}_i - \check{\mathbf{s}} \right).$$

5) Отражение вершины  $\check{\mathbf{s}}$  относительно  $\mathbf{s}_{\text{цт}}$ :

$$\mathbf{s}_r(\text{reflection}) = \mathbf{s}_{\text{цт}} + \alpha(\mathbf{s}_{\text{цт}} - \check{\mathbf{s}}),$$

где  $\mathbf{s}_r$  – вектор отражённой вершины,  $\alpha$  – коэффициент отражения ( $\alpha = 1$ ).

6) Вычисление  $Q_g(\mathbf{s}_r)$ .

7) Если  $Q_g(\mathbf{s}_r) \geq Q_g(\hat{\mathbf{s}})$ :

7.1) Растяжение вершины  $\mathbf{s}_r$  относительно  $\mathbf{s}_{\text{цт}}$ :

$$\mathbf{s}_e(\text{expansion}) = \mathbf{s}_{\text{цт}} + \gamma(\mathbf{s}_r - \mathbf{s}_{\text{цт}}),$$

где  $\mathbf{s}_e$  – вектор растягиваемой вершины,  $\gamma$  – коэффициент растяжения ( $\gamma = 2$ ).

7.2) Вычисление  $Q_g(\mathbf{s}_e)$ .

7.3) Если  $Q_g(\mathbf{s}_e) > Q_g(\mathbf{s}_r)$ : замена  $\check{\mathbf{s}}$  на  $\mathbf{s}_e$ .

7.4) Если  $Q_g(\mathbf{s}_e) \leq Q_g(\mathbf{s}_r)$ : замена  $\check{\mathbf{s}}$  на  $\mathbf{s}_r$ .

8) Если  $Q_g(\check{\mathbf{s}}) < Q_g(\mathbf{s}_r) < Q_g(\hat{\mathbf{s}})$ :

8.1) Сжатие вершины  $\mathbf{s}_r$  относительно  $\mathbf{s}_{\text{цт}}$ :

$$\mathbf{s}_c(\text{contract}) = \mathbf{s}_{\text{цт}} + \beta(\check{\mathbf{s}} - \mathbf{s}_{\text{цт}}),$$

где  $\mathbf{s}_c$  – вектор сжимаемой вершины,  $\beta$  – коэффициент сжатия ( $\beta = 0,5$ ).

8.2) Вычисление  $Q_g(\mathbf{s}_c)$ .

8.3) Если  $Q_g(\mathbf{s}_c) > Q_g(\mathbf{s}_r)$ : замена  $\check{\mathbf{s}}$  на  $\mathbf{s}_c$ .

8.4) Если  $Q_g(\mathbf{s}_c) \leq Q_g(\mathbf{s}_r)$ : замена  $\check{\mathbf{s}}$  на  $\mathbf{s}_r$ .

9) Если  $Q_g(\mathbf{s}_r) \leq Q_g(\check{\mathbf{s}})$ :

9.1) Редукция многогранника (сдвиг всех вершин многогранника на половину расстояния к  $\hat{\mathbf{s}}$ ):

$$\mathbf{s}^{(i)} = \hat{\mathbf{s}} + 0,5(\mathbf{s}^{(i)} - \hat{\mathbf{s}}),$$

$\mathbf{s}^{(i)}$  – вектор  $i$ -ой вершины.

9.2) Вычисление значения целевой функции  $Q_g$  в вершинах многогранника.

10) Если  $k$  (номер итерации) =  $N$ : остановить обучение, рассчитать ошибку  $\varepsilon$  для  $Q_g(\hat{\mathbf{s}})$  и  $Q_g(\mathbf{P}_g)$ , и если  $Q_g(\hat{\mathbf{s}}) - \varepsilon(Q_g(\hat{\mathbf{s}})) > Q_g(\mathbf{P}_g) + \varepsilon(Q_g(\mathbf{P}_g))$  принять  $\mathbf{P}_g$ :  $\hat{\mathbf{s}} \rightarrow \mathbf{P}_g$ .

Иначе: переход к п. 4.

Отметим, что вышеописанный процесс обучения может быть инициализирован только при накоплении в базе данных определённого объёма информации.

**Блок оценивания  $Q_g$**  предназначен для оценки качества классификации  $Q_g$ . Для расчёта  $Q_g$  в базе данных накапливается определённый объём данных, размер которых определяется исходя из следующих условий:

1) данные должны быть накоплены по каждому классу  $v_i$ ,  $v_i \in V$ ,

2) по каждому классу  $v_i$  должно быть накоплено, по меньшей мере, 30 наблюдений (именно такой объём данных рекомендуется в [96] для приблизительной оценки дисперсии генеральной совокупности в отсутствии априорной информации),

3) данные диагностики должны содержать минимум одну ошибку классификации.

Структура базы данных для хранения диагностической информации **D** представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Структура базы данных для хранения диагностической информации

№	$\tilde{Z}$	$\tilde{U}$	$\tilde{V}$	$v_0$	Дата & Время
1	$\tilde{Z}_1$	$\tilde{U}_1$	$\tilde{V}_1$	$v_{01}$	[ГГГГ-ММ-ДД чч:мм:сс] <sub>1</sub>
2	$\tilde{Z}_2$	$\tilde{U}_2$	$\tilde{V}_2$	$v_{02}$	[ГГГГ-ММ-ДД чч:мм:сс] <sub>2</sub>
...	...	...	...	...	...

Для расчёта качества классификации  $Q_g$  используется макроусреднение  $F_1$ -метрики, рассчитываемой отдельно для каждого класса множества  $V$ , что с одной стороны позволяет сбалансировать точность  $Pr$  и полноту  $Re$  оценки  $Q_g$ , а с другой – учитывать метрики классов в одинаковой степени. Соответственно для каждого класса рассчитываются точность  $Pr$ , полнота  $Re$  и  $F_1$ -метрика [97]:

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP}, Re = \frac{TP}{TP + FN}, F_1 = \frac{2 \cdot Pr \cdot Re}{Pr + Re},$$

где  $TP$  – доля истинно-положительных результатов,  $FP$  – доля ложно-положительных результатов,  $FN$  – доля ложно-отрицательных результатов классификации. Несмотря на то, что в оригинале используются количественные характеристики, их можно заменить на доли, что при сокращении даст те же результаты.

Далее через макроусреднение определяется качество классификации  $Q_g$ :

$$Q_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{1i},$$

где  $n$  – число классов.

На следующем этапе рассчитывается величина предельной ошибки  $\varepsilon$ , возникающей вследствие ограниченности числа наблюдений.

Для расчёта  $\varepsilon$  представим  $F_1$ -метрику через величины  $TP$ ,  $FP$  и  $FN$ . В результате несложных преобразований получим следующее выражение:

$$F_1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (8)$$

Так как оценка  $Q_g$  является результатом косвенных измерений, то  $\varepsilon$  определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F_{1i}}{\partial TP_i} \Delta_{TPi} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F_{1i}}{\partial FP_i} \Delta_{FPi} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F_{1i}}{\partial FN_i} \Delta_{FNi} \right)^2}.$$

С учётом (8) частные производные  $F_1$ -метрики по  $TP$ ,  $FP$  и  $FN$  вычисляются посредством следующих выражений:

$$\frac{\partial F_1}{\partial TP} = \frac{2(FP + FN)}{(2TP + FP + FN)^2},$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial FP} = \frac{\partial F_1}{\partial FN} = -\frac{1}{(2TP + FP + FN)^2}.$$

Погрешности  $\Delta$  при определении  $TP$ ,  $FP$  и  $FN$  вычисляются как предельные ошибки при оценивании долей объектов с определённым признаком [96]:

$$\Delta = z_\alpha s_p$$

где  $z_\alpha$  –  $z$ -оценка разброса доли объектов,  $s_p$  – стандартная ошибка средней.  $Z$ -оценки определяются для уровня  $\alpha = 0,05$ .

Величина  $Q_g$  рассчитывается для каждой вершины многогранника, используемой при поиске лучшей комбинации весов  $w_{ij}$  решающего правила  $\hat{g}(\theta)$ .

### 2.1.5. Компонент анализа альтернатив

Компонент анализа альтернатив не имеет каких-либо внутренних взаимодействующих блоков, и для описания его функционирования может быть использована схема, представленная на рисунке 2.1.

Основной задачей компонента является расчёт ожидаемых полезностей альтернативных решений (режимов функционирования ТП), из которых затем выбирается решение с наибольшей ожидаемой полезностью. Ожидаемая полезность каждого  $j$ -ого альтернативного решения рассчитывается по формуле:

$$\mu(A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))), p_j) = (1 - p_j)A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))) + p_j A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p^*))), E(C(n))), \quad (9)$$

где:

$x_p$  – значение выбранного параметра регулирования ТП,

$\mathbf{x}(x_p)$  – матрица-вектор состояния (режима функционирования) ТП,

$\mathbf{x}(x_p^*)$  – матрица-вектор состояния (режима функционирования) ТП с наибольшей полезностью, удовлетворяющая условию (3),

$p_j$  – вероятность невыполнения условия (3) для  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП,

$n$  – число экспериментов, соответствующих следующему шагу алгоритма  $\Lambda$ ,

$A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n)))$  – полезность  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП,

$A(E(P(\mathbf{x}(x_p^*))), E(C(n)))$  – полезность состояния (режима функционирования) ТП  $\mathbf{x}(x_p^*)$ ,

$\mu(A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))), p_j)$  – ожидаемая полезность  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования) ТП.

Границы области поиска решений  $[x_{pi1}, x_{pi2}]$  корректируются на каждой итерации алгоритма  $\Lambda$  таким образом, чтобы точки  $x_{pi1}$  и  $x_{pi2}$  были соседними точками, и чтобы в одном из соответствующих состояний системы  $O$  условия (3) выполнялись, а в другом не выполнялись. В результате на каждой новой итерации алгоритма  $\Lambda$  происходит сужение области поиска решений.

Значения величин  $A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n)))$  и  $p_j$  рассчитываются соответственно в компонентах оценки полезности и оценки вероятностей.

Для оценки целесообразности дальнейшего экспериментирования в анализ дополнительно включается состояние  $x_p^*$  с полезностью  $A(E(P(\mathbf{x}(x_p^*))), E(C(\dot{n})))$ , где  $\dot{n}$  – число проведённых экспериментов на данном шаге. Если полезность  $A(E(P(\mathbf{x}(x_p^*))), E(C(\dot{n})))$  оказывается наибольшей в сравнении с остальными состояниями, то дальнейшее экспериментирование считается экономически нецелесообразным.

На выходе компонента в интерфейс пользователя передаётся массив  $\mathbf{E}_s$ , содержащий информацию по ожидаемым полезностям и вероятностям невыполнения условия (3) всех альтернативных решений в порядке убывания их ожидаемой полезности.

### 2.1.6. Компонент оценки полезности

Компонент оценки полезности также не имеет дополнительных внутренних блоков и может быть описан с помощью схемы, представленной на рисунке 2.1. В компоненте предусмотрена возможность ввода как готовых специальных экономических моделей с уровнями дискретизации  $\Delta x_p$  и  $\Delta n$ , так и субъективных моделей, синтезирующихся автоматически на основе суждений ЛПР.

Готовые модели  $M_E$  используются непосредственно для определения значений полезности  $A_f(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n)))$ , причём в них может учитываться большее число оказывающих влияние факторов.

Субъективная модель синтезируется на основе субъективных оценок ЛПР производительности ТП  $E(P(\mathbf{x}(x_p)))$  и стоимости управления (затрат на экспериментирование)  $E(C(n))$ , вводимых через интерфейс пользователя в семи узловых точках  $x_p$  и  $n$  (множества  $E_P$  и  $E_C$ ). Экономические оценки ранжируются в соответствии с семиуровневым классификатором, приведённым в таблице 9.

Таблица 9 – Классификатор субъективных экономических оценок ЛПР

Ранг	Вербальная оценка
7	«очень высокая»
6	«высокая»
5	«выше среднего»
4	«средняя»
3	«ниже среднего»
2	«низкая»
1	«очень низкая»

При выборе структуры модели нами рассматривались различные варианты [98, 99], однако в силу того, что на основе современных исследований в области когнитивной психологии при решении подобного рода задач человек оперирует линейными моделями [100-102], считаем, наиболее целесообразным использование кусочно-линейной модели оценивания производительности ТП

$E(P(\mathbf{x}(x_p)))$  и стоимости управления (затрат на экспериментирование)  $E(C(n))$ .

Общий вид кусочно-линейной модели оценивания представлен ниже:

$$E(\tau) = \begin{cases} a_1\tau + b_1, \tau \in [\tau_1, \tau_2], \\ a_2\tau + b_2, \tau \in [\tau_2, \tau_3], \\ a_3\tau + b_3, \tau \in [\tau_3, \tau_4], \\ a_4\tau + b_4, \tau \in [\tau_4, \tau_5], \\ a_5\tau + b_5, \tau \in [\tau_5, \tau_6], \\ a_6\tau + b_6, \tau \in [\tau_6, \tau_7], \end{cases} \quad (10)$$

где  $\tau$  – оцениваемая величина ( $P(\mathbf{x}(x_p))$  или  $C(n)$ ),  $E(\tau)$  – оценка величины  $\tau$ ,  $a_1 \dots a_6$  – параметры модели,  $b_1 \dots b_6$  – параметры модели,  $\tau_1 \dots \tau_7$  – узловые точки.

Модель (10) строится и для производительности ТП  $E(P(\mathbf{x}(x_p)))$  и для стоимости управления (затрат на экспериментирование)  $E(C(n))$ , после чего определяется полезность:

$$A(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))) = E(P(\mathbf{x})) - E(C(n)).$$

Полученные значения полезности рассчитываются для каждого  $j$ -ого альтернативного состояния (режима функционирования ТП) и передаются в компонент анализа альтернатив.

### 2.1.7. Компонент оценки вероятностей

Компонент оценки вероятностей  $p_j$  также не имеет дополнительных внутренних блоков и может быть описан с помощью схемы, представленной на рисунке 2.1. Оценка вероятностей невыполнения условия (3) на множестве состояний ТП осуществляется на основе анализа вероятностей возможных траекторий  $\rho$  системы  $O$ . Рассмотрим одну из технических характеристик  $y_k$  для которой условие (3) выполняется в состоянии  $\mathbf{x}(x_{pi1})$  и не выполняется в состоянии  $\mathbf{x}(x_{pi2})$ , или наоборот, что сопровождается аналогичными рассуждениями. Так как состояние ТП зависит от  $x_{pi}$  через модель  $\Psi$ , то описание состояний можно упростить и характеризовать только значением  $x_p$ . Для иллюстрации решаемой

задачи обратимся к рисунку 2.5.

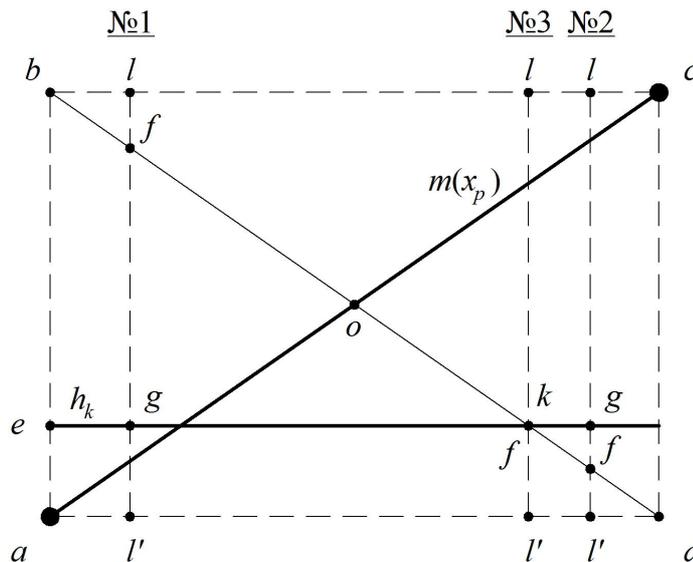


Рисунок 2.5. Графическая интерпретация задачи определения вероятностей невыполнения условия (3).

Введём для удобства следующее обозначение:  $\dot{y}_k = y_k + e_k + \Delta_k$ . Траектория системы, соединяющая точки  $a (x_{pi1}, \dot{y}_{ki1})$  и  $c (x_{pi2}, \dot{y}_{ki2})$ , нам неизвестна, но в то же время с высокой долей уверенности можно утверждать, что функция, её описывающая, непрерывна и монотонна. Математическим ожиданием всех возможных траекторий (случайного процесса) является прямая  $m(x_p)$ , соединяющая точки  $a$  и  $c$ . Прямая  $h_k$  обозначает уровень, который не должны превышать значения характеристики  $\dot{y}_k$ .

Для оценки вероятности изменения состояния системы по той или иной траектории рассмотрим диагональ  $bd$ . Будем считать, что вероятности координат точек пересечения случайных траекторий, а, следовательно, и самих траекторий  $\rho$ , пересекающих данные отрезки, уменьшаются в направлении точек углов  $b$  и  $d$ . На основе принципа максимума энтропии априори полагаем, что в данном случае имеет место нормальный или близкий к нормальному закон распределения  $w_{bd}(\rho)$  (известно, что среди непрерывных распределений, заданных на всей числовой оси и имеющих конечный второй момент, нормальное распределение имеет максимальную энтропию [103]), как показано на рисунке 2.6.

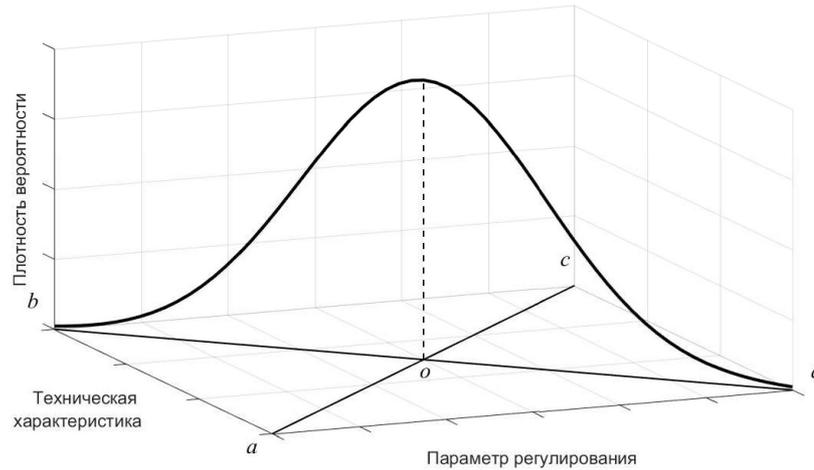


Рисунок 2.6. Распределение плотности вероятности траекторий  $\rho$ , пересекающих диагональ прямоугольника  $abcd$ .

Длины отрезков  $bo$  и  $od$  принимаются равными  $3\sigma$ , где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение траектории от её математического ожидания. Данное значение в соответствии с «правилом трёх сигм» характеризует доверительный интервал значений случайной величины (в нашем случае координаты случайной траектории, пересекающей один из отрезков) [104]. Величина  $\sigma$  соответственно равна  $1/6$   $bd$ , а математическое ожидание – координате точки  $o$  (точка пересечения диагоналей прямоугольника  $abcd$ ).

Определение вероятностей  $p_{jk}$  невыполнения условия (3) для различных сечений исследуемого пространства (прямоугольника  $abcd$ ) осуществляется на основе расчёта нижних границ значений вероятности  $p_{jk}$  и противоположной ей по смыслу вероятности  $q_{jk}$ , и перераспределением оставшейся доли траекторий в соответствии с соотношением размеров имеющихся коридоров. Для расчёта величины  $p_{jk}$  некоторого значения  $x_p$  (сечение  $ll'$ ) нами был разработан алгоритм, представляющий следующую последовательность действий:

1) Определение вероятности выхода траектории системы за границы доверительного интервала  $p_{err}$  (для значения  $3\sigma$   $p_{err} = 0,28\%$ ).

2) Если точка  $f$  выше линии  $h_k$  (случай №1 рисунок 2.5):

2.1) Определение нижней границы  $p_l$  вероятности  $p_{jk}$  как доли общего числа траекторий, пересекающих отрезок  $lf$ :

$$p_l = 0,5 - 0,5 p_{err} - \Phi(of),$$

где  $\Phi(of)$  – вероятностный интеграл по отрезку  $of$ .

2.2) Определение нижней границы  $q_l$  вероятности  $q_{jk}$  как доли общего числа траекторий, пересекающих отрезок  $kd$ :

$$q_l = 0,5 - 0,5 p_{err} - \Phi(ok),$$

где  $\Phi(ok)$  – вероятностный интеграл по отрезку  $ok$ .

2.3) Определение оставшейся доли траекторий  $p_{rem}$ :

$$p_{rem} = 1 - p_{err} - p_l - q_l.$$

2.4) Определение доли оставшихся траекторий, пролегающих выше линии  $h_k$ :

$$p_{rem}^* = \frac{fg}{fg + gl'} \cdot p_{rem}.$$

2.5) Определение вероятности  $p_{jk} = p_{err} + p_l + p_{rem}^*$ .

3) Если точка  $f$  ниже линии  $h_k$  (случай №2 рисунок 2.5):

3.1) Определение нижней границы  $q_l$  вероятности  $q_{jk}$  как доли общего числа траекторий, пересекающих отрезок  $fd$ :

$$q_l = 0,5 - 0,5 p_{err} - \Phi(of),$$

где  $\Phi(of)$  – вероятностный интеграл по отрезку  $of$ .

3.2) Определение оставшейся доли траекторий  $p_{rem}$ :

$$p_{rem} = 1 - p_{err} - q_l.$$

3.3) Определение доли оставшихся траекторий, пролегающих выше линии  $h_k$ :

$$p_{rem}^* = \frac{lg}{lg + gf} \cdot p_{rem}.$$

3.4) Определение вероятности  $p_{jk} = p_{err} + p_{rem}^*$ .

4) Если точка  $f$  лежит на линии  $h_k$  (случай №3 рисунок 2.5):

4.1) Определение нижней границы  $q_l$  вероятности  $q_{jk}$  как доли общего числа траекторий, пересекающих отрезок  $kd$ :

$$q_l = 0,5 - 0,5 p_{err} - \Phi(ok).$$

4.2) Определение вероятности  $p_{jk} = 1 - q_l$ .

На основе приведённого алгоритма рассчитываются  $p_{jk}$  по всем  $k$ . Результирующее значение  $p_j$  вычисляется как сумма вероятностей  $p_{jk}$ , после чего передаётся компоненту анализа альтернатив.

## 2.2. Разработка математического аппарата алгоритма селекции сигналов частичных разрядов

### 2.2.1. Процессная схема алгоритма

Как нами было определено в параграфах 1.6 и 1.7 актуальной задачей совершенствования методов обработки измерительной информации сигналов частичных разрядов является снижение влияния ошибок наложения импульсов на результаты измерений, что формально выражается в уменьшении вероятности присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений, которая без использования специальных алгоритмов равна вероятности ошибок наложения импульсов. Решение данной задачи позволит повысить качество измерительной информации, поступающей на вход Регулятора II (см. рисунок 1.6), что приведёт к уменьшению числа ошибочных управляющих воздействий и повышению эффективности функционирования всей системы.

Решение данной задачи возможно за счёт разработки специального алгоритма обнаружения и выделения перекрывающихся импульсов, что должно привести к снижению доли грубых погрешностей. Соответственно возникает задача обнаружения и выделения перекрывающихся импульсов. Характерной чертой данного явления является существенное искажение формы сигнала в области наложения, выражаемое в резком расхождении ожидаемых и наблюдаемых его значений. Тогда задача обнаружения сводится к проверке статистических гипотез об отсутствии  $H_0$  и наличии  $H_1$  наложения одного сигнала на другой, проверка которых осуществляется на основе Байесовского критерия оптимального обнаружения, в соответствии с которым минимизируется средний риск появления ошибок 1-ого (ложной тревоги) и 2-ого (пропуска сигнала) рода.

Так как импульс частичных разрядов имеет крутой передний фронт, то наложение на сигнал сопровождается появлением нового экстремума. Следовательно, для определения наложений нам будет достаточно исследовать

только точки экстремума. Кроме того, данная мера позволяет снизить негативное влияние шумовых помех.

Для решения задачи обнаружения и выделения (селекции) перекрывающихся импульсов в соответствии с основными положениями, изложенными в [105], была разработана процессная схема алгоритма, представленная на рисунке 2.7.

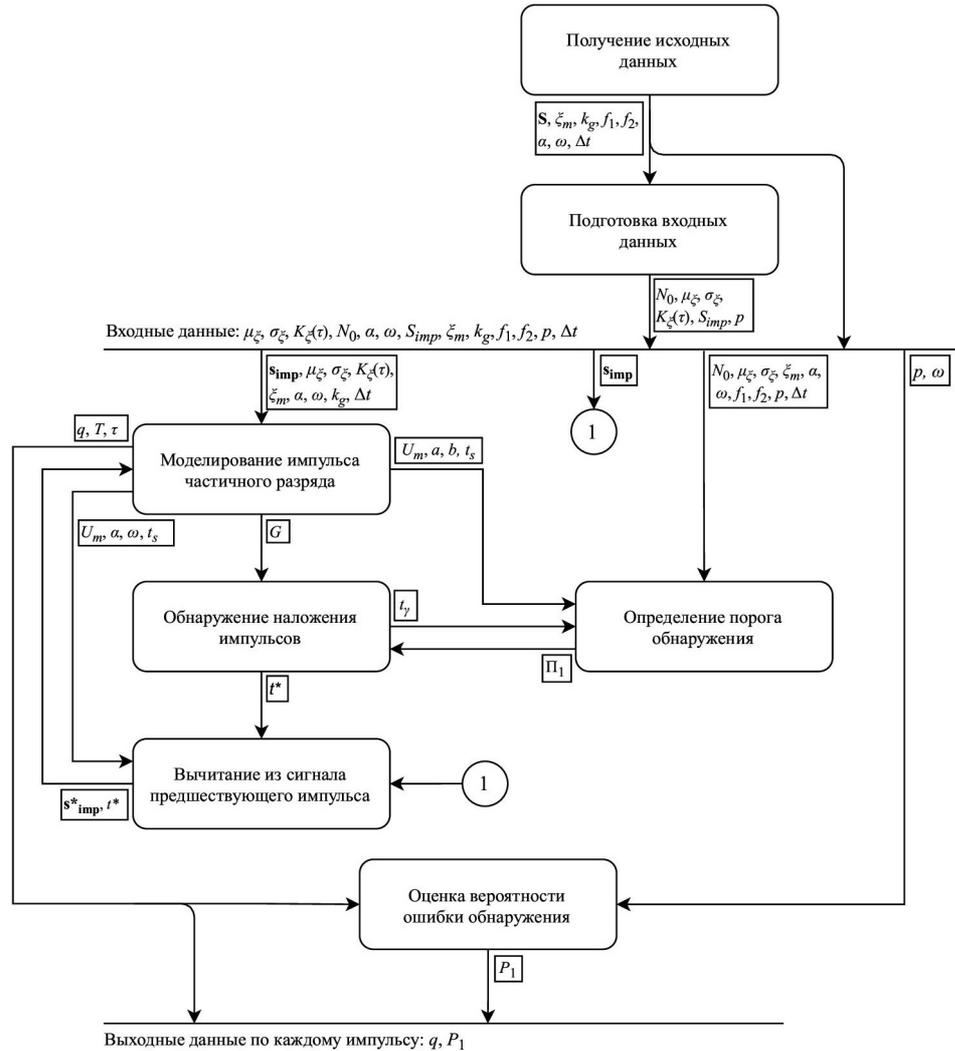


Рисунок 2.7. Процессная схема алгоритма селекции сигналов частичных разрядов.

Здесь:

$S$  – массив значений зарегистрированного сигнала частичных разрядов,

$\xi_m$  – наибольшее отклонение шумовой помехи,

$k_g$  – градуировочный коэффициент,

$f_1$  и  $f_2$  – нижняя и верхняя граничные частоты полосового фильтра,

$\omega$  – частота собственных колебаний,  
 $\alpha$  – коэффициент затухания,  
 $\Delta t$  – дискретизация по времени,  
 $\Delta u$  – дискретизация по напряжению,  
 $N_0$  – односторонняя спектральная плотность шумового процесса  $\xi$ ,  
 $\mu_\xi$  – математическое ожидание шумового процесса  $\xi$ ,  
 $\sigma_\xi$  – среднее квадратичное отклонение шумового процесса  $\xi$ ,  
 $w(\xi)$  – дискретная плотность распределения вероятности шумового процесса  $\xi$ ,  
 $S_{imp}$  – множество импульсных пакетов сигналов частичных разрядов  $S_{imp}$ ,  
 $p$  – вероятность наложения импульсов,  
 $U_m$  – амплитуда импульса частичного разряда,  
 $a, b$  – параметра аппроксимации сигнала в квазилинейной области,  
 $t_s$  – начальный момент переходного процесса импульса частичного разряда,  
 $q$  – величина частичного разряда (в пикокулонах),  
 $T$  – длительность импульса частичного разряда,  
 $\tau$  – длительность переднего фронта импульса частичного разряда,  
 $G$  – множество точек экстремума в импульсном пакете,  
 $t_\gamma$  – момент времени некоторой точки экстремума,  
 $t^*$  – момент времени экстремума, предшествующего точке обнаруженного наложения импульсов,  
 $\Pi_1$  – порог обнаружения наложения импульсов для сечения  $t_\gamma$ ,  
 $P_1$  – вероятность ошибки селекции.

Работает алгоритм следующим образом: для каждого импульсного пакета  $S_{imp}$ , содержащего сигналы частичных разрядов, выполняется моделирование первого импульса, данные по которому  $(q, T, \tau)$  передаются на выход схемы. Далее осуществляется поиск точки наложения второго импульса, для чего разница ожидаемых и реальных значений сигнала в точках экстремума  $G$  сравнивается с порогом обнаружения  $\Pi_1$ . В случае обнаружения наложения из пакета вычитается модель предшествующего импульса, в преобразованном пакете

$s^*_{\text{imp}}$  начиная с момента  $t^*$  (крайняя точка, до которой наложений не происходило) аналогичным образом производится поиск новых наложений импульсов, но уже с учётом ошибок аппроксимации моделей предшествующих импульсов. Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут конец импульсного пакета или его значения не уменьшатся до критически значимых. На выход расчётной схемы дополнительно передаётся значение ошибки селекции  $P_1$ , учитывающей наложения сигналов в области от начала импульса до завершения первого полупериода переходного процесса.

Обозначим условия применимости метода:

1. Измерительная схема достаточно хорошо защищена от внешних импульсных и периодических сигналов помех, так что их влиянием можно пренебречь или учитывать как шумовые помехи.
2. Статистические параметры шумовых помех подчинены нормальному закону распределения.
3. Регистрация импульсов ЧР производится с помощью индуктивного чувствительного элемента.
4. Полоса пропускания фильтра соответствует частотному составу входных импульсов.
5. Отражения сигналов от противоположного конца кабеля отсутствуют.

### 2.2.2. Байесовский критерий оптимального обнаружения

Для проверки статистических гипотез о наличии  $H_1$  и отсутствии  $H_0$  наложения сигналов в разработанном нами алгоритме используется Байесовский критерий оптимального обнаружения, минимизирующий средний уровень риска  $\bar{R}$ , который для сигнала равен [106, 107]:

$$\bar{R} = a_{00}z_{00} + a_{01}z_{01} + a_{10}z_{10} + a_{11}z_{11} = a_{00}qF^* + a_{01}qF + a_{10}pD + a_{11}pD^*,$$

где  $a_{ij}$  – потери при различных исходах обнаружения сигнала,  $i$  – наличие/отсутствие сигнала,  $j$  – обнаружение/необнаружение сигнала,  $z_{ij}$  –

условные вероятности соответствующих ситуаций,  $p$  – вероятность присутствия сигнала,  $q = 1 - p$  – вероятность отсутствия сигнала,  $F$  – вероятность ложной тревоги (ошибка первого рода),  $F^* = 1 - F$  – вероятность правильного необнаружения,  $D$  – вероятность пропуска сигнала (ошибка второго рода),  $D^* = 1 - D$  – вероятность правильного обнаружения.

С учётом нулевых потерь при правильном обнаружении  $a_{11} = 0$  и правильном необнаружении сигнала  $a_{00} = 0$  имеем:

$$\bar{R} = a_{01}qF + a_{10}pD.$$

Произведём замену  $F = 1 - F^*$ :

$$\bar{R} = a_{01}q + a_{10}pD - a_{01}qF^*.$$

Вероятности событий  $F^*$  и  $D$  равны площади под графиком плотности распределения вероятности помехи и суммы сигнала с помехой:

$$F^* = \int_{-\infty}^z w(z | H_0) dz, \quad D = \int_{-\infty}^z w(z | H_1) dz,$$

где  $w(z | H_0)$  – плотность распределения вероятности значений помех;  $w(z | H_1)$  – плотность распределения вероятности значений сигнала на фоне помех.

Считая, что потери при возникновении ошибок равны друг другу  $a_{10} = a_{01}$ , получаем:

$$qw(z | H_0) = pw(z | H_1). \quad (11)$$

Графически решение данного уравнения выглядит как нахождение  $z$ -координаты точки пересечения функций  $w(z | H_0)$  и  $w(z | H_1)$ .

### 2.2.3. Подготовка входных данных

Определение исходных данных, поступающих на вход подпроцесса «Подготовка входных данных» (см. рисунок 2.7), производится в соответствии с ГОСТ 28114-89 [55], из справочных данных по используемому измерительному оборудованию и путём проведения дополнительных измерений параметров схемы (для расчёта  $\omega$  и  $\alpha$ ).

На этапе подготовки входных данных решаются следующие задачи:

1. Определение статистических параметров шумового процесса (математическое ожидание  $\mu_\xi$ , среднее квадратичное отклонение  $\sigma_\xi$ , автокорреляционная функция  $K_\xi(\tau)$  и односторонняя спектральная плотность  $N_0$ ).
2. Обнаружение и выделение импульсных пакетов сигналов частичных разрядов  $s_{imp}$ , формирующих множество  $S_{imp}$ .
3. Определение вероятности наложения импульсов  $p$ .
4. Определение дискретной плотности распределения шума  $w(\xi_i)$ .

**Задача 1.** Шумовой процесс в измерительной схеме является суммой большого числа независимых колебательных процессов сопоставимых масштабов и в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей подчиняется нормальному закону распределения вероятностей [108]. С учётом того, что регистрируемый сигнал проходит через датчик, представляющий собой полосовой фильтр, шум приобретает характер широкополосного гауссовского процесса  $\xi$  с равномерно распределённой спектральной плотностью.

Для нахождения среднего квадратичного отклонения  $\sigma_\xi$  воспользуемся «правилом трёх сигм» [104], согласно которому:

$$\sigma_\xi = \frac{\xi_m}{3}.$$

При этом случайная величина помехи  $\xi$  попадает на отрезок  $[-\xi_m, \xi_m]$  с вероятностью 99,72%.

Определение односторонней спектральной плотности  $N_0$  осуществляется на основе первого следствия теоремы Хинчина-Винера, в соответствии с которым автокорреляционная функция шумового процесса имеет вид [109]:

$$K_\xi(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{i2\pi f\tau} df = \int_0^{+\infty} N_0 e^{i2\pi f\tau} df,$$

где  $K_\xi(\tau)$  – автокорреляционная функция случайного шумового процесса  $\xi$ ,  $S(f)$  – функция спектральной плотности мощности,  $N_0$  – односторонняя спектральная плотность мощности,  $f$  – частота,  $\tau$  – параметр сдвига. С учётом того, что функции  $K_\xi(\tau)$  и  $S(f)$  являются чётными, выражение для  $K_\xi(\tau)$  принимает вид:

$$K_{\xi}(\tau) = N_0 \int_0^{+\infty} \cos(2\pi f\tau) df.$$

Задавая пределы интегрирования для полосы пропускания датчика ЧР окончательно получим:

$$K_{\xi}(\tau) = N_0 \int_{f_1}^{f_2} \cos(2\pi f\tau) df = N_0 \int_{f_1}^{f_2} \frac{\cos(k)}{2\pi\tau} dk = \frac{N_0}{2\pi\tau} (\sin(2\pi f_2\tau) - \sin(2\pi f_1\tau)).$$

Так как  $K_{\xi}(\tau)$  при  $\tau = 0$  равна  $\sigma_{\xi}^2$ , то  $N_0$ :

$$\sigma_{\xi}^2 = K_{\xi}(0) = N_0 \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sin(2\pi f_2\tau) - \sin(2\pi f_1\tau)}{2\pi\tau} = N_0(f_2 - f_1) \Rightarrow N_0 = \frac{\sigma_{\xi}^2}{f_2 - f_1}$$

Таким образом, при решении данной задачи мы получаем параметры шумового процесса  $\mu_{\xi}$ ,  $\sigma_{\xi}$ ,  $K_{\xi}(\tau)$  и  $N_0$ .

**Задача 2.** Для обнаружения и выделения импульсных пакетов сигналов ЧР  $\mathbf{s}_{\text{imp}}$  используется энергетический обнаружитель сигналов, схема которого представлена на рисунке 2.8 [110].

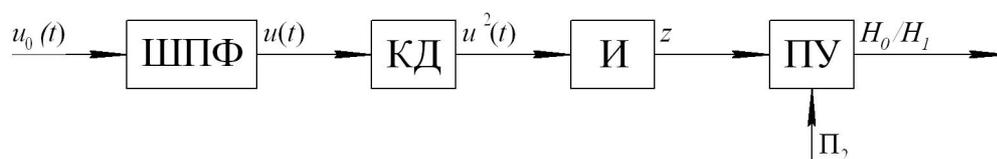


Рисунок 2.8. Схема энергетического обнаружителя.

Принцип работы обнаружителя следующий: входной сигнал  $u_0(t)$  пропускается через широкополосный фильтр ШПФ и поступает на квадратичный детектор КД, с выхода которого сигнал  $u^2(t)$  преобразуется интегратором И в величину  $z$ , характеризующую энергию сигнала на интервале времени  $T_{\text{и}}$ ; далее на пороговом устройстве ПУ  $z$  сравнивается с пороговым значением  $\Pi_2$ , после чего принимается одна из гипотез о наличии  $H_1$  или отсутствии сигнала  $H_0$ .

На выходе интегратора И величина  $z$  определяется из выражения:

$$z = \frac{2}{N_0 T_{\text{и}}} \int u^2(t) dt.$$

Определение порога  $\Pi_2$  осуществляется на основе Байесовского критерия

оптимального обнаружения. Вследствие полной неопределённости относительно вероятностей наличия и отсутствия сигналов принимаем их равными 0,5. Тогда при условии, что величина  $z$  характеризует не амплитуду, а энергию сигнала, выражение (11) примет вид:

$$w(z | H_0) = w(z | H_1). \quad (12)$$

Графическое представление порога обнаружения  $\Pi_2$  для некоторых заданных характеристик сигнала и помех изображено на рисунке 2.9.

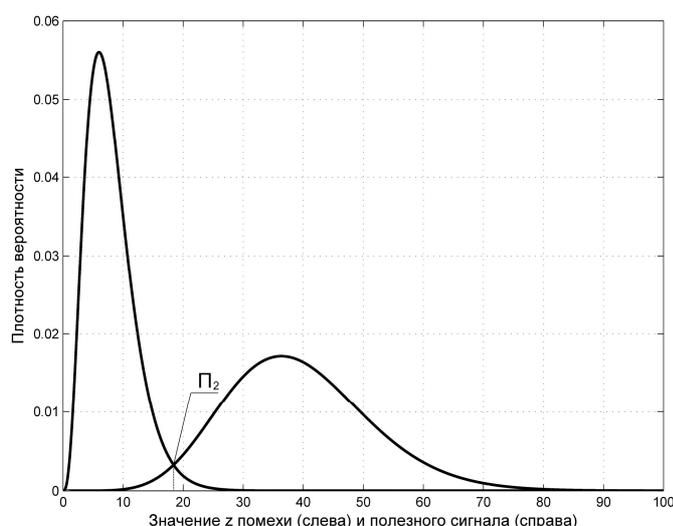


Рисунок 2.9. Графическое представление порога обнаружения  $\Pi_2$ .

Плотности распределения вероятности в (12) равны [111]:

$$w(z | H_0) = \frac{z^{L-1} e^{-\frac{z}{2}}}{2^L \Gamma(L)},$$

$$w(z | H_1) = \left(\frac{z}{\lambda}\right)^{\frac{L-1}{2}} \frac{e^{\left(-\frac{z+\lambda}{2}\right)} I_{L-1}(\sqrt{z\lambda})}{2},$$

где  $L$  – число степеней свободы,  $\Gamma$  – гамма-функция,  $I_n$  – модифицированная функция Бесселя первого рода  $n$ -ого порядка,  $\lambda$  – параметр нецентральности.

Величины  $L$  и  $\lambda$  соответственно равны:

$$L = \lfloor T_{\text{н}} W_s \rfloor, \quad \lambda = \frac{2E_s}{N_0},$$

где  $W_s$  – полоса пропускания ШПФ,  $E_s$  – энергия сигнала в полосе частот  $W_s$  и в интервале времени  $T_n$ .

Энергии сигнала  $E_s$  в соответствии с (4) равна:

$$E_s = U_{\min}^2 \int_{t_x}^{t_x + T_n} e^{-2\alpha t} \cos^2(\omega t) dt,$$

где  $U_{\min} = 2\xi_m$  – минимальная амплитуда импульса частичного разряда;  $t_x$  – момент времени, соответствующий фазе  $\pi/2$  переходного процесса;  $T_n$  – интервал времени, равный периоду собственных колебаний в измерительной схеме. Тогда в соответствии с [112] имеем:

$$E_s = \left( \frac{U_{\min}^2 \cos^2(\omega t) e^{-2\alpha t}}{-2\alpha} + \frac{U_{\min}^2 \omega e^{-2\alpha t} (\alpha \sin(2\omega t) + \omega \cos(2\omega t))}{4\alpha(\omega^2 + \alpha^2)} \right) \Bigg|_{t_x}^{t_x + T_n}.$$

Для устранения ошибок первого рода (ложной тревоги) на выделенный таким образом импульсный пакет  $\mathbf{s}_{\text{imp}}$  накладывается дополнительное условие:

$$\max(|u(t_i)|) \geq 2\xi_m \mid t_i \in [0, T(\mathbf{s}_{\text{imp}})] \text{ с шагом } \Delta t, \quad (13)$$

где  $u(t_i)$  – значения сигнала на временных отсчётах  $t_i$  импульсного пакета  $\mathbf{s}_{\text{imp}}$ ,  $T(\mathbf{s}_{\text{imp}})$  – длительность импульсного пакета  $\mathbf{s}_{\text{imp}}$ .

Если для какого-либо выделенного импульсного пакета данное условие не выполняется, то он удаляется из списка выделенных пакетов. В результате решения поставленной задачи по обнаружению импульсных пакетов получаем множество импульсных пакетов  $S_{\text{imp}}$ .

**Задача 3.** При нахождении величины  $p$  отметим, что процесс образования ЧР носит стохастический характер, так как кабельная изоляция содержит большое число микродефектов, генерирующих импульсы частичных разрядов в зависимости от типа, геометрических размеров, амплитуды испытательного напряжения и концентрации продуктов сопутствующих химических реакций в полости включения. Тогда вероятность  $p$  наложения импульсов частичных разрядов определяется как отношение общей длительности обнаруженных сигналов без учёта (12)  $T_+$  к длительности всего зарегистрированного сигнала  $T_s$ .

**Задача 4.** Определение дискретной плотности распределения вероятности  $w(\xi)$  производится для композиции с дискретной плотностью вероятности ошибки аппроксимации при определении порога обнаружения  $\Pi_1$ . За границы области определения функции  $w(\xi)$  приняты значения  $\mu_\xi - 3\sigma_\xi$  и  $\mu_\xi + 3\sigma_\xi$ , шаг дискретизации  $w(\xi)$  соответствует уровню дискретизации сигнала по напряжению  $\Delta u$ . Преобразование к дискретному виду производится по формуле:

$$w(\xi_i) = \frac{1}{2} \cdot \left| \Phi \left( \frac{\xi_2 - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) - \Phi \left( \frac{\xi_1 - \mu_\xi}{\sigma_\xi} \right) \right|,$$

где  $\Phi$  – вероятностный интеграл,  $\xi_1$  и  $\xi_2$  – границы области интегрирования  $[\xi_1, \xi_2]$ ,  $\xi_i$  – центр отрезка  $[\xi_1, \xi_2]$ .

#### 2.2.4. Моделирование импульса частичного разряда

Для моделирования импульса частичного разряда решаются следующие задачи:

1. Определение множества  $G = \{(t_1, u(t_1)), (t_i, u(t_i)) \dots (t_n, u(t_n))\}$  точек экстремума в импульсном пакете.
2. Моделирование импульса частичного разряда (определение момента  $t_s$  и амплитуды импульса  $U_m$ ).
3. Определение величины частичного разряда  $q$ , длительности переднего фронта  $\tau$  и всего импульса  $T$  частичного разряда.

**Задача 1.** Для определения точек экстремума в импульсном пакете применяется метод парабол, который состоит в использовании  $t$ -координаты точки экстремума аппроксимирующей функции параболы в качестве одной из координат экстремума сигнала в некоторой локальной области  $D$  [113]. Для нахождения локальной области  $D$  используется последовательность итераций с шагом  $\Delta D$ , равным 10 нс. После задания области  $D$  в ней производится аппроксимация сигнала параболой  $f(t)$ .

После нахождения коэффициентов аппроксимирующей функции  $f(t)$

определяется  $t$ -координата точки экстремума параболы  $t_{ex}$ :

$$f'(t) = 0 \Rightarrow 2at + b = 0 \Rightarrow t_{ex} = -\frac{b}{2a}.$$

Если полученное значение  $t_{ex} \in D$ , то оно принимается в качестве  $t$ -координаты точки экстремума сигнала, в противном случае расчётная область увеличивается на  $\Delta D$ , и операция повторяется. После нахождения первого экстремума, начиная с момента  $t_1$  ( $t$ -координата первой точки экстремума), иницируется новая локальная область  $D$ , в которой снова производится построение парабол до тех пор, пока  $t$ -координата точки экстремума не попадёт в заданную локальную область.

Для устранения влияния на процесс поиска экстремумов шумовой составляющей и асимметрии сигнала, возникающей в результате наложений импульсов, нами вводится следующая система дополнительных условий [114]:

$$\begin{cases} |u(t_i) - u(t_{i-1})| > \xi_m, & i \geq 2, \\ \text{sgn}(a_i) \neq \text{sgn}(a_{i-1}), & i \geq 2, |a| > \delta, \end{cases}$$

где  $u(t_i)$  и  $u(t_{i-1})$  – значения сигнала  $i$ -ого и предшествующего экстремумов,  $a_i$  и  $a_{i-1}$  – коэффициенты парабол  $i$ -ого и предшествующего экстремумов,  $\delta$  – предельное значение коэффициента  $a_\xi$  аппроксимирующей функции параболы шумового процесса  $\xi$ .

Расчёт параметра  $\delta$  основывается на представлении аппроксимирующей в области  $D$  сигнал параболы в виде суммы парабол от истинного значения сигнала и шумового процесса  $\xi$ . Тогда, учитывая, что при построении параболы производится минимизация функционала квадрата ошибки, при использовании метода Крамера имеем:

$$a_\xi = \frac{\Delta a}{\Delta}, \quad (14)$$

где:

$$\begin{aligned}
\Delta &= \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i & n \\ \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i \\ \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^2 \end{vmatrix} = \left( \sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^3 + \sum_{i=1}^n t_i^4 \cdot \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2 + n \cdot \left( \sum_{i=1}^n t_i^3 \right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n t_i^4 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 - \\
&- 2 \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3, \\
\Delta_a &= \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n \xi_i & \sum_{i=1}^n t_i & n \\ \sum_{i=1}^n \xi_i t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i \\ \sum_{i=1}^n \xi_i t_i^2 & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^2 \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \left( \sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^2 + \sum_{i=1}^n \xi_i t_i^2 \cdot \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2 + n \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i t_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3 - \\
&- n \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot \sum_{i=1}^n \xi_i t_i^2 - \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n \xi_i t_i \cdot \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n t_i = \\
&= \begin{vmatrix} c_1 = \left( \sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^2 & c_2 = \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2 & c_3 = n \sum_{i=1}^n t_i^3 \\ c_4 = n \cdot \sum_{i=1}^n t_i & c_5 = \sum_{i=1}^n t_i^3 \cdot \sum_{i=1}^n t_i & c_6 = \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n t_i \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^n c_1 \xi_i + \sum_{i=1}^n c_2 \xi_i t_i^2 + \sum_{i=1}^n c_3 \xi_i t_i - \\
&- \sum_{i=1}^n c_4 \xi_i t_i^2 - \sum_{i=1}^n c_5 \xi_i - \sum_{i=1}^n c_6 \xi_i t_i = \sum_{i=1}^n \left( c_1 \xi_i + c_2 \xi_i t_i^2 + c_3 \xi_i t_i - c_4 \xi_i t_i^2 - c_5 \xi_i - c_6 \xi_i t_i \right) = \\
&= \sum_{i=1}^n \xi_i \left( c_1 + c_2 t_i^2 + c_3 t_i - c_4 t_i^2 - c_5 - c_6 t_i \right) = \mathcal{G}_i = c_1 + c_2 t_i^2 + c_3 t_i - c_4 t_i^2 - c_5 - c_6 t_i \Big| = \sum_{i=1}^n \xi_i \mathcal{G}_i.
\end{aligned}$$

Параметр  $a_\xi$  является случайной величиной и зависит от характеристик шумового процесса  $\xi$ . Так как шумовой процесс подчиняется нормальному закону распределения, то и коэффициент  $a_\xi$  в силу линейности совершаемых при его расчёте преобразований, также подчиняется нормальному закону распределения. При расчёте  $a_\xi$  в числителе формулы (14) присутствуют случайные составляющие  $\xi_i$ , над которыми производятся операции умножения на число и сложения, выполняющиеся в соответствии со следующими выражениями [108]:

$$\mu(c \cdot \xi_i) = c\mu(\xi_i),$$

$$\mu\left(\sum_{i=1}^n \xi_i\right) = \sum_{i=1}^n \mu(\xi_i),$$

$$\sigma^2\left(\sum_{i=1}^n \xi_i\right) = \sum_{i=1}^n \sigma^2(\xi_i) + 2 \sum_{i<j} K_{ij},$$

где  $\mu$  – математическое ожидание,  $\sigma^2$  – дисперсия,  $c$  – произвольная константа,  $K_{ij}$  – корреляционный момент величин  $i$ -ого и  $j$ -ого сечений шумового процесса  $\xi$ .

В результате мы определяем математическое ожидание  $\mu(a_\xi)$  и дисперсию  $\sigma^2(a_\xi)$  случайной величины  $a_\xi$ , в качестве значения  $\delta$  принимаем  $\delta = \mu(a_\xi) + 3\sigma(a_\xi)$ . Значения  $\delta$  для каждой области  $D$  определённого размера представляют собой фиксированные значения, которые сохраняются во временной памяти и повторно используются.

Координаты найденных точек экстремума образуют искомое множество  $G = \{(t_1, u(t_1)), (t_i, u(t_i)) \dots (t_n, u(t_n))\}$ .

**Задача 2.** Для моделирования импульса частичного разряда принимается предположение, что на отрезке от начала импульса до завершения первого полупериода переходного процесса ошибки наложения отсутствуют. Для определения возможности встраивания модели импульса в сигнал проверяется выполнение условия:

$$\text{sgn}(u(t_1)) \neq \text{sgn}(u(t_2)), \quad (15)$$

где  $u(t_1)$  и  $u(t_2)$  – ординаты точек первого и второго экстремумов.

Если условие (15) не выполняется, то поиск наложений не производится, а амплитуда импульса принимается равной значению ординаты первого экстремума, то есть  $u(t_1)$ . Аналогичные действия осуществляются, если число точек экстремума равно единице.

Определение начального момента переходного процесса  $t_s$  производится на основе аппроксимации  $Y(t)$  сигнала на квазилинейном отрезке  $W = [t_0 - T/8, t_0 + T/8]$  ( $T$  – период собственных колебаний,  $t_0$  – точка пересечения сигналом оси времени  $OT$  на отрезке  $[t_1, t_2]$ ), на котором модель импульса (4) практически линейна. Тогда момент  $t_s$  рассчитывается следующим образом:

$$Y(t_x) = 0 \Rightarrow at_x + b = 0 \Rightarrow t_x = -\frac{b}{a} \Rightarrow t_s = t_x - \frac{T}{4}. \quad (16)$$

Амплитуда импульса  $U_m$  определяется как произведение максимального по модулю значения сигнала на отрезке  $[0, t_x]$  (в системе отсчёта импульса) на знак ординаты  $u(t_1)$  первой точки экстремума:

$$U_m = \text{sgn}(u(t_1)) \cdot \max(u(t) | t \in [0, t_x]).$$

**Задача 3.** Величина частичного разряда  $q$  определяется по формуле:

$$q = k_g \cdot U_m,$$

где  $k_g$  – градуировочный коэффициент измерительной схемы.

Длительность интервала времени  $\tau$  определяется как удвоенный временной отрезок от момента, соответствующего амплитуде  $0,5U_m$  на переднем фронте до момента возникновения переходного процесса  $t_s$ .

Длительность всего импульса  $T$  определяется суммой длительности переднего фронта импульса  $\tau$  и длительностью последующего переходного процесса  $T_{\text{пн}}$  с затуханием до  $0,1U_m$ . Для определения соответствующей длительности переходного процесса  $T_{\text{пн}}$  решается неравенство:

$$U_m e^{-\alpha t} \cos(\omega t) < 0,1U_m.$$

Неравенство решается комбинированным способом, – сначала решается уравнение:

$$U_m e^{-\alpha t} = 0,1U_m,$$

решение которого  $t$  становится правой границей интервала поиска. Левая граница определяется в виде целой части частного соответствующего  $t$  фазового угла и  $\pi$ . На полученном интервале решение первого неравенства осуществляется методом бисекции [115]. Таким образом, мы получаем точку, соответствующую заданному уровню точности, после которой все значения сигнала являются меньше  $0,1U_m$ .

### 2.2.5. Определение порога обнаружения

Для определения порога обнаружения наложения импульсов частичных разрядов решаются следующие задачи:

1. Оценка ошибки аппроксимации  $E_a(t_\gamma)$  (определение плотности распределения вероятности  $w(E_a(t_\gamma))$  для заданного сечения  $t_\gamma \in G$ ).
2. Определение оптимального значения порога обнаружения  $\Pi_1$ .

**Задача 1.** Естественно, что построенная нами модель импульса имеет расхождение с действительной формой сигнала, вследствие чего в рассматриваемых при проверке статистических гипотез сечениях  $t_\gamma \in G$  возникнет ошибка аппроксимации  $E_a(t_\gamma)$ . Величина  $E_a(t_\gamma)$  имеет случайный характер и описывается следующим уравнением [114]:

$$E_a(t_\gamma) = u_0(t_\gamma - \Delta_t) - u(t_\gamma) = U_{m0} e^{-\alpha(t_\gamma - \Delta_t)} \cos(\omega(t_\gamma - \Delta_t)) - U_m e^{-\alpha t_\gamma} \cos(\omega t_\gamma), \quad (17)$$

где  $u_0(t_\gamma - \Delta_t)$  – истинное значение колебательной составляющей импульса частичного разряда в сечении  $t_\gamma$ ,  $u(t_\gamma)$  – модельное значение импульса частичного разряда в сечении  $t_\gamma$ ,  $\Delta_t$  – ошибка начального момента переходного процесса. Так как коэффициент затухания  $\alpha$  и частота  $\omega$  определяются посредством проведения специальных измерений в измерительной схеме с достаточно высокой точностью, то в (17) учитываются только две ошибки – при определении значения амплитуды импульса и начального момента переходного процесса.

Истинное значение сигнала в (17) неизвестно, но может быть построена его статистическая модель. Тогда амплитуда сигнала  $U_{m0}$  определяется по формуле:

$$U_{m0} = U_m - \xi(t_1) - \sum_{j=1}^m E_{aj}(t_1), \quad (18)$$

где  $U_m$  – модельная амплитуда импульса частичного разряда,  $\xi(t_1)$  – шумовой процесс в сечении  $t_1$ ,  $E_{aj}(t_1)$  – ошибка аппроксимации  $j$ -ого предшествующего импульса в сечении  $t_1$  ( $t_1$  –  $t$ -координата первой точки экстремума).

Для определения ошибки  $\Delta_t$  используется механизм, задействованный при нахождении  $t_x$ , так как величины  $t_s$  и  $t_x$  связаны выражением (16), то и ошибки их определения равны. При расчёте  $t_x$  использовалась линейная аппроксимация сигнала в квазилинейной области  $W$ . Соответствующая аппроксимирующая функция  $Y(t)$  представима в виде:

$$Y(t) = at + b = (a_0t + b_0) + (a't + b'), \quad (19)$$

где  $a_0, b_0$  – коэффициенты квазилинейного участка сигнала  $u_0(t)$  в области  $W$ ;  $a', b'$  – коэффициенты дополняющей линейной функции.

Значения регистрируемого сигнала  $u(t)$  в области  $W$  представимы в виде суммы  $u_0(t)$ , шумового случайного процесса  $\xi(t)$  и совокупности ошибок аппроксимации  $\sum E_{aj}(t)$  предшествующих импульсов:

$$u(t) = a_0t + b_0 + \xi(t) + \sum_{i=1}^m E_{aj}(t), \quad t \in W. \quad (20)$$

Подставляя (19) и (20) в формулу квадрата ошибки получаем:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (u(t_i) - Y(t_i))^2 &= \sum_{i=1}^n \left( a_0t_i + b_0 + \xi(t_i) + \sum_{j=1}^m E_{aj}(t_i) - a_0t_i - b_0 - a't_i - b' \right)^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \left( \xi(t_i) + \sum_{j=1}^m E_{aj}(t_i) - a't_i - b' \right)^2. \end{aligned}$$

Из полученного выражения следует вывод, что ошибка аппроксимации формируется только за счёт шумовой составляющей и ошибок аппроксимации предшествующих импульсов.

Моделирование шумовой составляющей осуществляется методом скользящего суммирования, в соответствии с которым реализация шумового процесса  $\xi(t)$  равна [116]:

$$\xi_i = \sum_{k=1}^n c_k x_{i-k}, \quad n = 2p + 1,$$

где  $c_k$  – весовые коэффициенты разложения функции спектральной плотности мощности  $S(\omega)$  шума,  $p$  – параметр суммы,  $x_{i-k}$  – реализация белого гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2 = 1$ . Коэффициенты

$c_k$  в соответствии с описанием метода находятся по формуле:

$$c_k = \frac{1}{\omega_c} \int_0^{\omega_c} \left( \frac{\omega_c}{\pi} S(\omega) \right)^{1/2} \cdot \cos \frac{(k-p-1)\pi\omega}{\omega_c} d\omega, \quad \omega_c = \frac{\pi}{\Delta t},$$

где  $S(\omega)$  – спектральная плотность мощности шумового процесса,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – граничные угловые частоты полосы пропускания. С учётом того, что на отрезке  $[\omega_1, \omega_2]$  спектральная плотность  $S(\omega) = N_0/2$ , а в остальной области интегрирования  $S(\omega) = 0$ , имеем следующее выражение для  $c_k$ :

$$c_k = \frac{1}{\omega_c} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left( \frac{\omega_c}{2\pi} N_0 \right)^{1/2} \cdot \cos \frac{(k-p-1)\pi\omega}{\omega_c} d\omega.$$

Решая интеграл, окончательно получаем:

$$c_k = \frac{\sqrt{\omega_c N_0}}{\sqrt{2\pi^3} (k-p-1)} \left( \sin \left( \frac{(k-p-1)\pi\omega_2}{\omega_c} \right) - \sin \left( \frac{(k-p-1)\pi\omega_1}{\omega_c} \right) \right).$$

Для вычисления  $c_k$  при  $k = p + 1$  сделаем замену  $\eta = k - p - 1$  и запишем предельное выражение:

$$c_{p+1} = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left[ \sqrt{\frac{\omega_c N_0}{2\pi}} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left( \sin \left( \frac{\eta\pi\omega_2}{\omega_c} \right) - \sin \left( \frac{\eta\pi\omega_1}{\omega_c} \right) \right) \right] = \sqrt{\frac{\omega_c N_0}{2\pi}} \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_c}.$$

Параметр суммы  $p$  определяется исходя из условия:

$$\left| 1 - \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^n c_k \right| < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – погрешность дисперсии, (примем  $\varepsilon = 0,01$ ).

Из (19) следует, что  $a_0 = a - a'$  и  $b_0 = b - b'$ . Тогда  $\Delta_t$  равна [114]:

$$\begin{cases} 0 = a_0 \cdot t_{x0} + b_0; \\ 0 = a \cdot t_x + b. \end{cases} \Rightarrow \Delta_t = t_x - t_{x0} = -\frac{b}{a} + \frac{b_0}{a_0} = -\frac{b}{a} + \frac{b-b'}{a-a'}. \quad (21)$$

С помощью выражений для (18) и (21) производится статистическое моделирование плотности распределения вероятности  $w(E_a(t_\gamma))$ . Качественный вид  $w(E_a(t_\gamma))$  для сечения  $t_\gamma$  некоторого импульса частичного разряда представлен на рисунке 2.10.

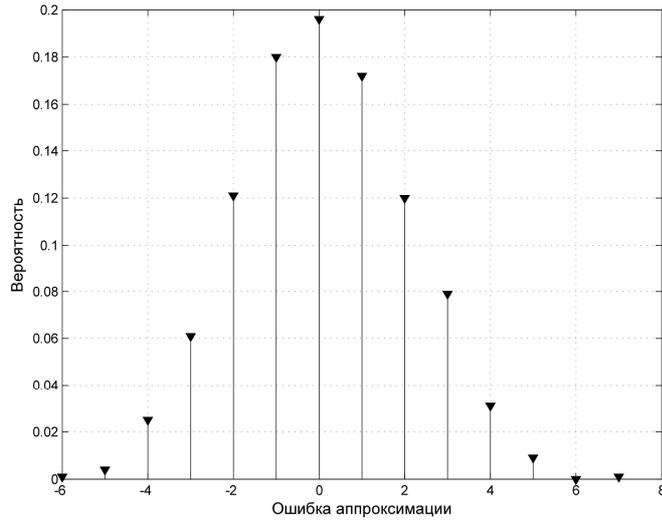


Рисунок 2.10. Плотность распределения вероятности  $w(E_a(t_\gamma))$ .

В результате решения данной задачи получаем дискретную плотность распределения вероятности ошибки аппроксимации  $w(E_a(t_\gamma))$  для заданного сечения  $t_\gamma$ .

**Задача 2.** Величина порога  $\Pi_1$  также определяется согласно Байесовскому критерию оптимального обнаружения, уравнение для его определения при этом имеет вид:

$$p_m w(u | H_1) = q_m w(u | H_0), \quad (22)$$

где  $p_m$  – вероятность  $m$ -ого наложения импульсов;  $q_m$  – вероятность  $m$ -ого неналожения импульсов;  $w(u | H_0)$  – плотность распределения вероятности суммы шумовой составляющей  $\zeta$  и ошибки аппроксимации  $E_a$ , соответствующая гипотезе  $H_0$  (отсутствия наложения);  $w(u | H_1)$  – плотность распределения вероятности сигнала амплитудой  $U_{\min}$  в сумме с шумовой составляющей  $\zeta$  и ошибкой аппроксимации  $E_a$ , соответствующая гипотезе  $H_1$  (наличия наложения).

Плотность  $w(u | H_0)$  равна композиции законов распределения  $w(E_a(t_\gamma))$  и  $w(\zeta)$ . Так как функция  $w(E_a(t_\gamma))$  имеет дискретное выражение, то для выполнения данной операции используется дискретная функция  $w(\zeta)$ , построенная нами на этапе подготовки входных данных.

В соответствии с [117] композиция плотностей  $w(\zeta)$  и  $w(E_a(t_\gamma))$  равна:

$$w(u_i | H_0) = \sum_{j=1}^n w(\xi_j) w(u_i - e_{aj}),$$

причём, если  $u_i - e_{aj} \notin [\xi_{\min}, \xi_{\max}]$ , то  $w(u_i - e_{aj}) = 0$ .

Плотность вероятности  $w(u | H_1)$  равна  $w(u | H_0)$  со сдвигом на постоянную величину  $U_{\min}$ .

Вероятности  $p_m$  и  $q_m$  рассчитываются по следующим формулам:

$$p_m = p^m, \quad q_m = 1 - p_m, \quad (23)$$

где  $p$  – вероятность наложения импульсов,  $m$  – номер искомого наложения в импульсном пакете.

Порог  $\Pi_1$  равен решению уравнения (22). На рисунке 2.11 представлена графическая интерпретация решения данного уравнения, согласно которой  $\Pi_1$  является абсциссой точки пересечения функций  $p_m w(u | H_1)$  и  $q_m w(u | H_0)$ .

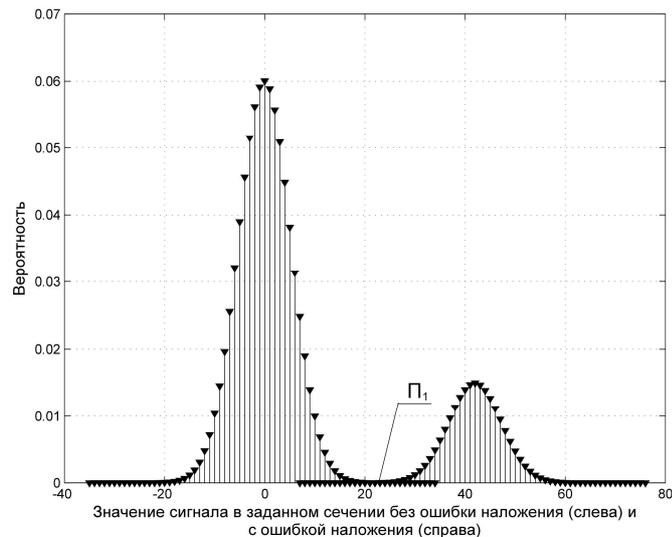


Рисунок 2.11. Графическое представление порога обнаружения  $\Pi_1$ .

Здесь следует отметить, что ошибки первого и второго рода обнаружителя слишком малы в сравнении с ошибками, вызванными наложением сигналов в области от начала импульса до завершения первого полупериода переходного процесса, и при оценке вероятности ошибки селекции не учитываются.

### 2.2.6. Оценка вероятности ошибки селекции импульсов

Вероятность ошибки селекции импульсов представляет собой вероятность присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений и рассчитывается отдельно для каждого импульса. Оценка вероятности ошибки селекции  $P_{ei}$   $i$ -ого зарегистрированного импульса определяется как сумма вероятности наложения импульса в области  $\tau'$  (от начала импульса до завершения первого полупериода переходного процесса) с вероятностями аналогичных ошибок предшествующих импульсов:

$$P_{ei} = P_{i\tau} + \sum_{j=1}^m P_{ij\tau}, \quad (24)$$

где  $P_{ei}$  – вероятность ошибки селекции  $i$ -ого зарегистрированного импульса,  $P_{i\tau}$  – вероятность наложения импульса в области  $\tau'$ ,  $P_{ij\tau}$  – вероятность наложения  $j$ -ого предшествующего импульса в области  $\tau'$ ,  $m$  – число предшествующих импульсов в импульсном пакете.

Временной отрезок от начала импульса до завершения первого полупериода переходного процесса  $\tau'$  определяется как сумма длительности переднего фронта импульса  $\tau$  и половины периода переходного процесса.

Величина  $P_{ij\tau}$  (а аналогично и  $P_{i\tau}$ ) представляет собой условную вероятность наложения  $j$ -ого импульса в области  $\tau'$  при реализации события наложения  $j$ -ого импульса как такового (при реализации вероятности  $p_j$ ). Определение вероятности  $p_j$  первого и последующих импульсов производится исходя из следующей логики: на этапе «Подготовка исходных данных» нами было определено, что вероятность наложения импульсов  $p$  (или  $p_1$  при  $j = 1$ ) рассчитывается как отношение длительности «полезного» сигнала  $T_+$  к длительности всего зарегистрированного сигнала  $T_S$ , тогда при наложении второго импульса ( $j = 2$ ) роль «полезного» сигнала будет играть отрезок времени длительностью  $pT_+$  (то есть доля импульсов «полезного» сигнала с однократным наложением импульсов), а роль всего сигнала – отрезок  $T_+$ . Продолжая рассуждения аналогичным образом, приходим к

следующей последовательности формул:

$$p_1(\text{или } p) = \frac{T_+}{T_S} \text{ при } j = 1,$$

$$p_2 | p = p \frac{pT_+}{T_+} = p^2 \text{ при } j = 2,$$

$$p_3 | p_2 = p_2 \frac{ppT_+}{pT_+} = p^3 \text{ при } j = 3 \text{ и т.д.}$$

Обобщая полученную последовательность формул для вероятности наложения  $m$  импульсов, получаем  $p_m = p^m$ .

Тогда вероятность  $P_{ij\tau}$  равна:

$$P_{ij\tau} = p^j \frac{\tau_j}{T_j},$$

где  $\tau_j$  – временная область от начала  $j$ -ого импульса до завершения первого полупериода переходного процесса;  $T_j$  – длительность  $j$ -ого импульса;  $j$  – номер импульса в последовательности наложений из  $m$  импульсов, предшествующих  $i$ -ому импульсу. Вероятность  $P_{i\tau}$  определяется аналогичным образом.

Отметим, что формула (24) справедлива лишь в определённых границах значений вероятности  $p$ , за пределами которых начинают дополнительно сказываться эффекты накопления ошибок аппроксимаций импульсов и одновременного наложения более двух импульсов. Границы применения формулы (24) могут быть определены экспериментально на основе разницы в значениях частичных разрядах, измеренных с применением разработанного нами алгоритма и без него.

Формула (24) также не учитывает вероятности ошибки первого и второго рода при обнаружении наложений импульсов, так как их величина оказывается слишком незначительной в сравнении с вероятностями  $P_{ij\tau}$ , и ею можно пренебречь.

### 2.3. Выводы по второй главе

Во второй главе были частично решены первая и вторая из поставленных задач исследования. Нами были разработаны механизмы и алгоритмы СППР, позволяющие:

- 1) произвести формализацию оценок правдоподобия возможных причин микродефектов по имеющемуся набору признаков,
- 2) улучшать качество функционирования системы диагностики по мере накопления диагностической информации,
- 3) оптимизировать состояния (режимы функционирования) ТП наложения электрической изоляции на основе значений ожидаемой полезности.

Была также разработана архитектура СППР, состоящая из двух модулей, – диагностики и оптимизации. Модуль диагностики является интеллектуальным компонентом системы и включает базу знаний, машину нечёткого логического вывода, компонент обучения и базу данных. Модуль оптимизации, в свою очередь, состоит из компонентов анализа альтернатив, оценки полезности и оценки вероятностей.

Для повышения эффективности управления ТП наложения электрической изоляции по контуру II был разработан математический аппарат алгоритма селекции сигналов частичных разрядов, позволяющий за счёт обнаружения их взаимных наложений существенно снижать вероятность присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений, что приводит к сокращению числа ошибочных операций в управлении ТП через контур II и повышению эффективности всей системы.

## Глава 3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения

### 3.1. Алгоритм регулирования параметров технологического процесса и аппаратно-программная платформа разработанных информационно-аналитических решений

С учётом разработанных в главе 2 механизмов и алгоритмов поддержки принятия решений алгоритм  $\Lambda$  регулирования параметров технологического процесса примет вид, представленный на рисунке 3.1 (алгоритм  $\Lambda^*$ ).

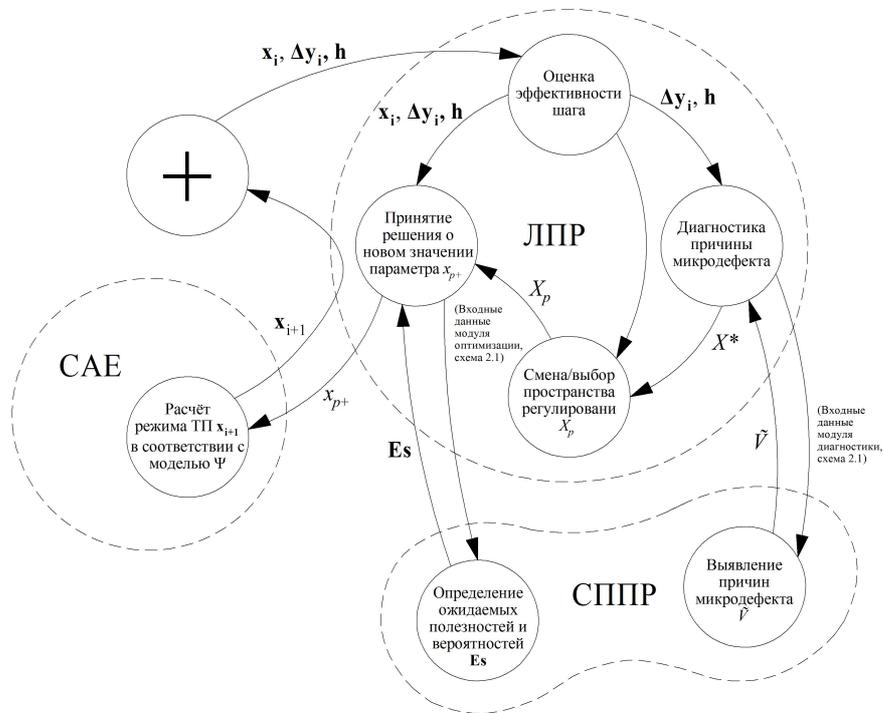


Рисунок 3.1. Граф алгоритма  $\Lambda^*$  регулирования параметров ТП через контур П.

Буквенные обозначения на графе алгоритма  $\Lambda^*$  те же, что и на графе алгоритма  $\Lambda$  (рисунок 1.7) с включением дополнительных данных:

$E_s$  – массив ожидаемых полезностей и вероятностей всех альтернативных решений в порядке убывания их ожидаемой полезности,

$\tilde{V}$  – нечёткое множество классов причин образования опасных микродефектов  $v_i$  со степенью принадлежности  $\mu(v_i)$  вида  $\{v_i, \mu(v_i) \mid v_i \in \tilde{V}\}$ .

Как видно из приведённой схемы к оригинальному алгоритму добавилась

СППР, оказывающая ЛПР информационно-аналитическую поддержку в диагностике причин образования опасных микродефектов кабельной изоляции (для наиболее распространённых кабелей – напряжением от 6 до 35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена) и в оптимизации параметров регулирования ТП наложения электрической изоляции.

От модуля диагностики СППР ЛПР получает информацию о выраженности возможных причин образования опасных микродефектов (нечёткое множество  $\tilde{Y}$ ), причина с максимальной степенью принадлежности является рекомендуемым решением СППР, однако ЛПР имеет возможность выбрать и другой вариант, анализируя степени принадлежности остальных причин и руководствуясь собственными соображениями. Модуль оптимизации, в свою очередь, предоставляет ЛПР информацию об ожидаемых полезностях и значениях вероятности невыполнения условия (3), соответствующих альтернативным значениям параметра регулирования  $x_p$ ; вариант с наибольшим значением ожидаемой полезности является решением системой задачи (2), однако, как и в случае с модулем диагностики, ЛПР может выбрать и другое решение, руководствуясь собственным опытом и интуицией.

Аппаратно-программной платформой разработанной СППР являются современные персональные компьютеры, поддерживающие функционирование интерпретатора программного кода СППР, написанного на языке Python 3.5, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020615483 [118]. Внешний вид интерфейса пользователя программы состоит из двух вкладок и представлен на рисунках 3.2 и 3.3. В каждой вкладке размещён один из модулей СППР, рассмотрим их более подробно.

Использование модуля диагностики начинается с ввода исходных данных о значениях технических характеристик изоляции (в числовом виде) и характеристики внешнего вида наиболее развитого поверхностного микродефекта (в виде парных отношений, выраженных лингвистическими переменными). Ввод исключений и дополнительной информации производится с использованием объектов Radiobutton и Checkbox, размещённых в левом нижнем углу. После

нажатия кнопки «Диагностика» выполняется определение образа микродефекта. Все сообщения программы, результаты диагностики и рекомендации по устранению причины микродефекта отображаются в «Окне вывода сообщений программы».

Рисунок 3.2. Интерфейс пользователя модуля диагностики.

Обратная связь с системой по результатам функционирования модуля диагностики осуществляется через операции меню ввода истинной причины микродефекта, – «Показать записи» и «Ввод причины». Нажатие на кнопку «Показать записи» выводит данные о результатах диагностики, для которых истинные причины ещё не были определены. На основе полученной от программы информации пользователь выбирает номер интересующей его записи и вводит его в соответствующее поле, далее в Combobox-меню выбирается причина образования опасного микродефекта и вводится нажатием кнопки «Ввод причины».

При накоплении в базе данных достаточного объёма информации активируется кнопка «Обучение», нажатие которой с вводом необходимого числа итераций обучающего алгоритма запускает процесс обучения, в результате

которого могут быть переопределены веса продукционных правил и увеличится качество классификации.

Теперь рассмотрим функционирование модуля оптимизации, использование которого начинается с создания или загрузки сохранённой сессии. Механизм сессий предназначен для сохранения во времени исходных и полученных промежуточных данных в случае, если процесс адаптации системы растянется на длительное время. На рисунке 3.3 в разделе «Ввод данных новой сессии» представлены необходимые исходные данные для инициализации новой сессии. Ниже находится раздел, позволяющий сохранять текущую сессию или загружать ранее сохранённую.

Рисунок 3.3. Интерфейс пользователя модуля оптимизации.

После запуска сессии активируется раздел «Ввод экспериментальных данных», в котором вводятся новые экспериментальные данные о состоянии системы. Также активируется кнопка «Анализ», запускающая внутренние механизмы системы, анализирующие имеющуюся информацию и определяющие оптимальное значение параметра регулирования для следующего шага процесса адаптации, описываемого алгоритмом  $\Lambda^*$ . Дополнительно пользователю

предоставляется информация об ожидаемой полезности и вероятности риска невыполнения условия (3) всех альтернативных решений в порядке убывания их ожидаемой полезности.

Программное обеспечение по обработке измерительной информации сигналов частичных разрядов разработано на языке Matlab, интерфейс пользователя – командная строка, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2018614637 [119]. Программа может быть запущена на любом современном персональном компьютере с предустановленным интерпретатором языка Matlab. Исходные данные вводятся в диалоговом режиме, после ввода всех данных автоматически запускается расчёт, в результате которого информация о максимальном значении обнаруженного частичного разряда сохраняется в файле-отчёте. Дополнительно в программе реализована возможность построения формы сигналов частичных разрядов с сохранением их в отдельном файле формата .mat.

## 3.2. Алгоритмы системы поддержки принятия решений

### 3.2.1. Алгоритм модуля диагностики

Схема алгоритма модуля диагностики разработана и представлена на рисунке 3.4.

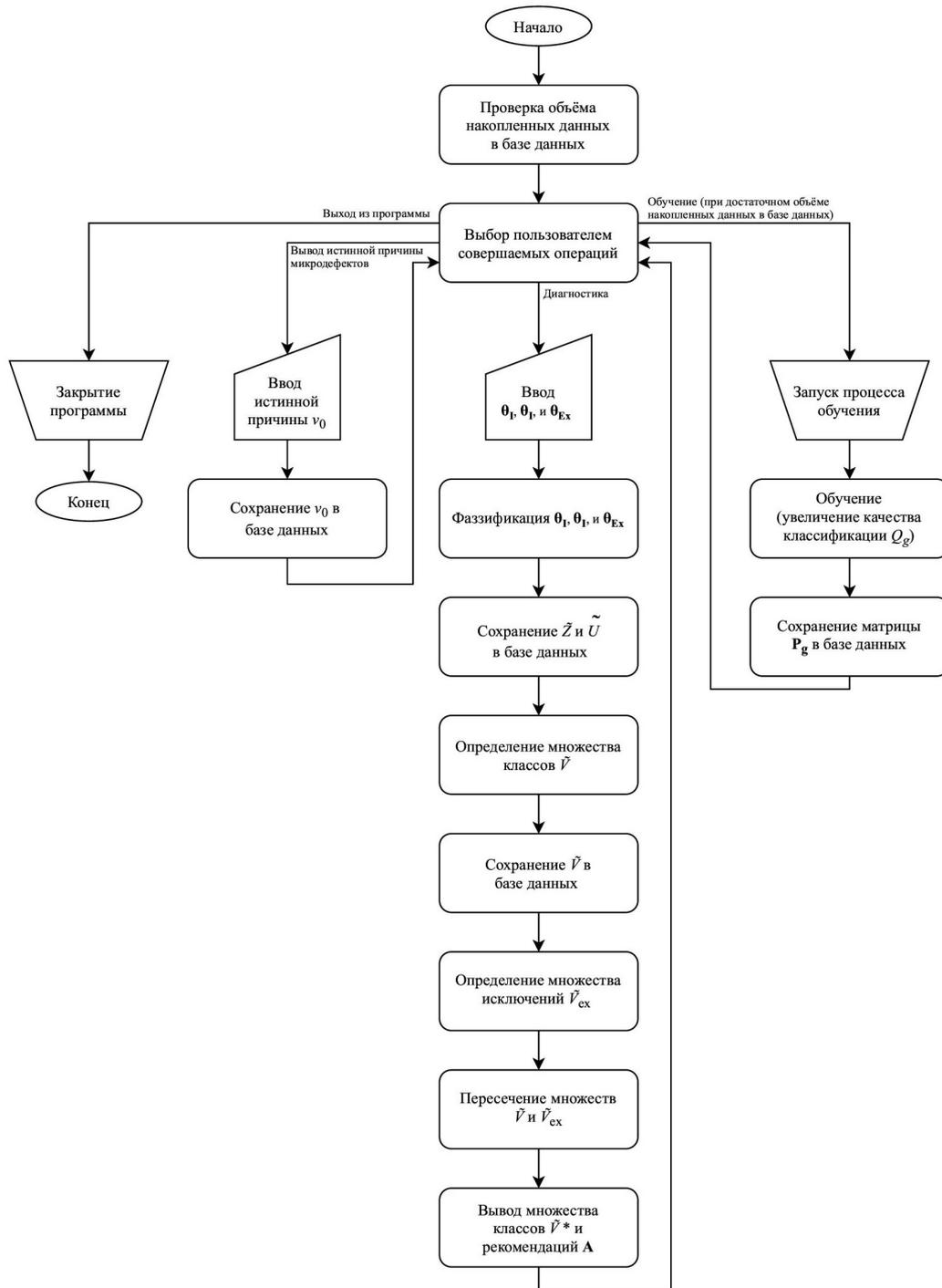


Рисунок 3.4. Алгоритм модуля диагностики.

В начале работы алгоритма модуля диагностики выполняется проверка объёма собранных данных в базе данных. Если собранный объём данных достаточный, то пользователь может запустить процесс обучения, в результате которого производится корректировка весов логических выражений продукционных правил базы знаний, направленная на увеличение качества классификации  $Q_g$ .

Если собранный объём данных недостаточен или пользователь не считает нужным запускать процесс обучения в данный момент, производится ввод исходных данных для диагностики причины образования опасных микродефектов. После ввода исходных данных осуществляется процесс диагностики, состоящий из нескольких последовательных этапов. На первом этапе производится фазификация исходных данных с сохранением полученных результатов в базе данных. На втором и третьем этапах определяются множества  $\tilde{V}$  и  $\tilde{V}_{ex}$ , пересечение которых на заключительном этапе даёт нам множество  $\tilde{V}^*$ . Класс причины микродефектов множества  $\tilde{V}^*$  с наибольшей степенью принадлежности является ответом системы относительно класса в наибольшей степени соответствующего входному вектору признаков. Для устранения причины образования опасных микродефектов пользователю также выводится перечень рекомендаций **A**.

По завершении процесса диагностики причины образования опасных микродефектов методом последовательных проверок (то есть получив экспериментальное подтверждение причины образования опасных микродефектов) пользователь должен сообщить системе истинную причину  $v_0$ , которая заносится в запись в базе данных соответствующего сеанса диагностики. Накопленная таким образом информация используется в последующем для обучения системы (повышения качества классификации).

### 3.2.2. Алгоритм модуля оптимизации

Схема алгоритма модуля оптимизации разработана и представлена на рисунке 3.5.

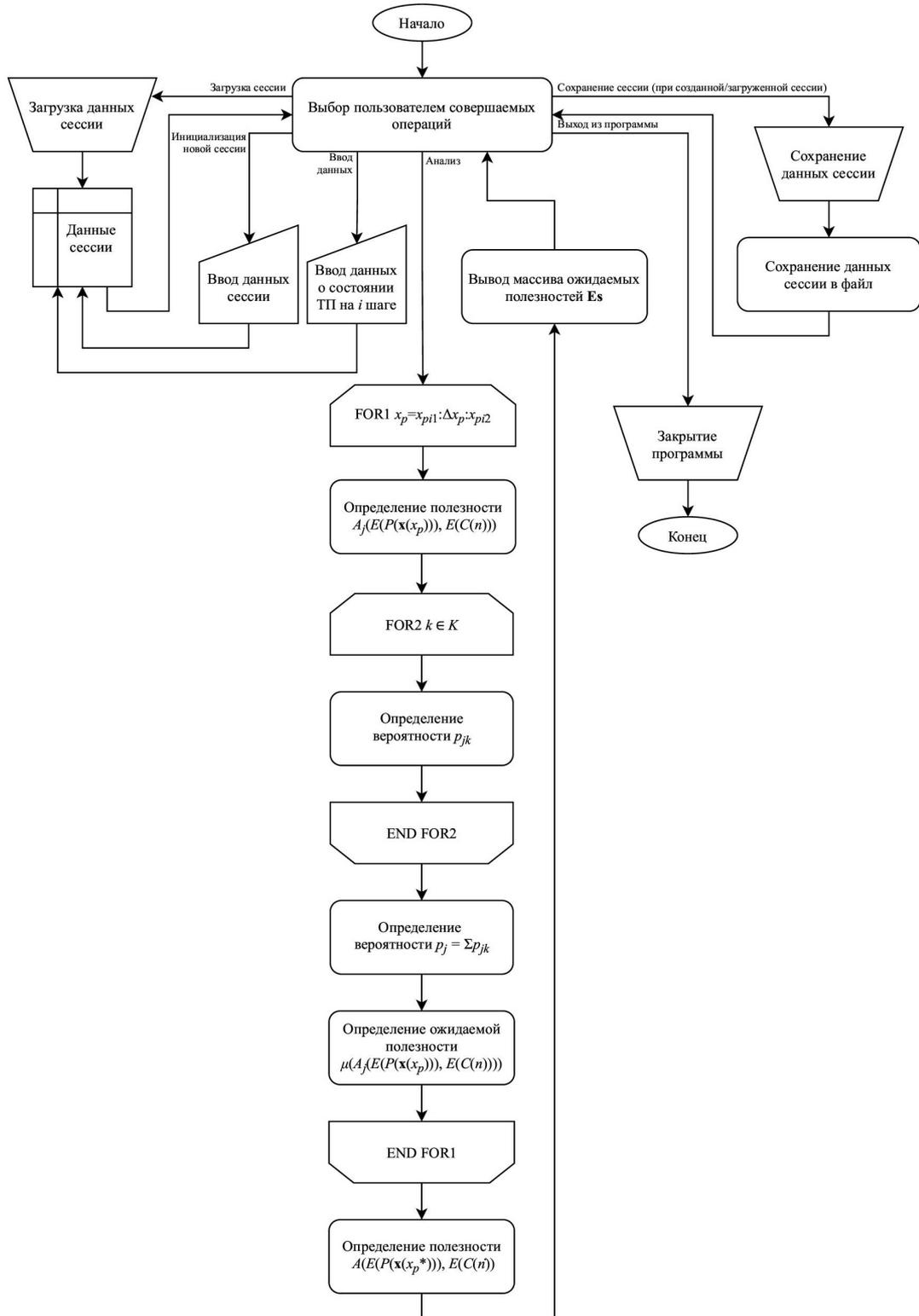


Рисунок 3.5. Алгоритм модуля оптимизации.

Работа алгоритма модуля оптимизации начинается с ввода или загрузки данных сессии, часть из которых представляет готовую специализированную экономическую модель полезности  $M_E$  или субъективные оценки полезности  $E_P$  и  $E_C$  в узловых точках, а другая часть – численные значения параметров поиска.

Далее пользователь может запустить анализ и расчёт оптимального значения параметра регулирования введённые данные обрабатываются с помощью двух вложенных циклов FOR1 и FOR2. В цикле FOR1 рассчитываются значения ожидаемой полезности на множестве альтернативных решений (состояний или режимов функционирования ТП), определяемых на отрезке  $[x_{pi1}, x_{pi2}]$  с шагом  $\Delta x_p$ . Расчёт ожидаемых полезностей логически разделяется на три этапа:

1. Расчёт полезностей альтернативных решений  $A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n)))$ .
2. Расчёт через цикл FOR2 вероятностей  $p_j$  невыполнения условия (3).
3. Расчёт ожидаемых полезностей  $\mu(A_j(E(P(\mathbf{x}(x_p))), E(C(n))))$ .

В цикле FOR2 производится вычисление вероятностей  $p_{jk}$  по каждой технической характеристике  $y_k$ , которые затем при суммировании образуют вероятность  $p_j$  невыполнения условия (3) хотя бы для одной из характеристик  $y_k$ .

Для оценки целесообразности дальнейшего экспериментирования в анализ включен расчёт полезности  $A(E(P(\mathbf{x}(x_p^*))), E(C(\dot{n})))$ , являющейся наибольшей полезностью некоторого ранее определённого состояния (режима функционирования) ТП  $\mathbf{x}(x_p^*)$ , удовлетворяющего условию (3). В завершение работы алгоритма все альтернативные решения (состояния или режимы функционирования ТП) сортируются в порядке убывания их ожидаемой полезности и сохраняются в массиве  $\mathbf{E}_s$  вместе с данными о значениях ожидаемой полезности и вероятности невыполнения условия (3), и передаются пользователю.

Если пользователь получил новые данные о состоянии ТП в процессе его адаптации на  $i$  шаге алгоритма  $\Lambda$ , то для расчёта нового оптимального значения параметра регулирования  $x_{p+}$  необходимо произвести их ввод в систему, которые затем автоматически добавляются к данным сессии.

В завершение работы алгоритма все альтернативные решения (состояния

или режимы функционирования ТП) сортируются в порядке убывания их ожидаемой полезности и сохраняются в массиве  $E_s$  вместе с данными о значениях ожидаемой полезности и вероятности невыполнения условия (3), и передаются пользователю.

В случае необходимости прервать процесс адаптации пользователь может сохранить текущую сессию в файл, чтобы затем возобновить процесс адаптации с учётом полученных ранее результатов.

Отметим, что описанный алгоритм работает только в рамках конечной модели полезности. При выходе значений переменных за границы модели расчёты не производятся.

### 3.3. Алгоритм селекции сигналов частичных разрядов

Алгоритм селекции сигналов частичных разрядов соответствует последовательности действий, описанной в [120], включающей следующие основные этапы:

1. Удаление участков осциллограммы, где частичные разряды отсутствуют.
2. Подготовка входных данных.
3. Обнаружение наложений и выделение импульсов частичных разрядов (селекция).
4. Определение наибольшего импульса частичных разрядов.
5. Оценка вероятности ошибки селекции.

В соответствии с приведённой последовательностью действий на первом этапе осуществляется удаление участков осциллограммы, где частичные разряды отсутствуют. Данные участки в соответствии с материалами параграфа 1.4 соответствуют спаду синусоиды испытательного напряжения.

На следующем этапе в соответствии с параграфом 2.2.3 производится подготовка входных данных. Далее в каждом импульсном пакете производится селекция (обнаружение и выделение) импульсов частичных разрядов, соответствующий алгоритм представлен на рисунке 3.6. После обнаружения и выделения всех импульсов выбирается импульс с наибольшей амплитудой, для которого затем рассчитывается вероятность ошибки селекции.

Прототипом разработанного нами алгоритма селекции импульсов частичных разрядов является ERA-алгоритм, принцип работы которого был описан в параграфе 1.6. В [121] нами был разработан алгоритм, позволяющий обнаруживать в одном импульсном пакете не более двух импульсов, в результате дальнейшего усовершенствования появилась возможность обнаружения в одном импульсном пакете более двух импульсов. Окончательная версия алгоритма представлена на рисунке 3.6, однако отметим, что с ростом числа импульсов в соответствии с (24) вероятность ошибки селекции также будет увеличиваться.

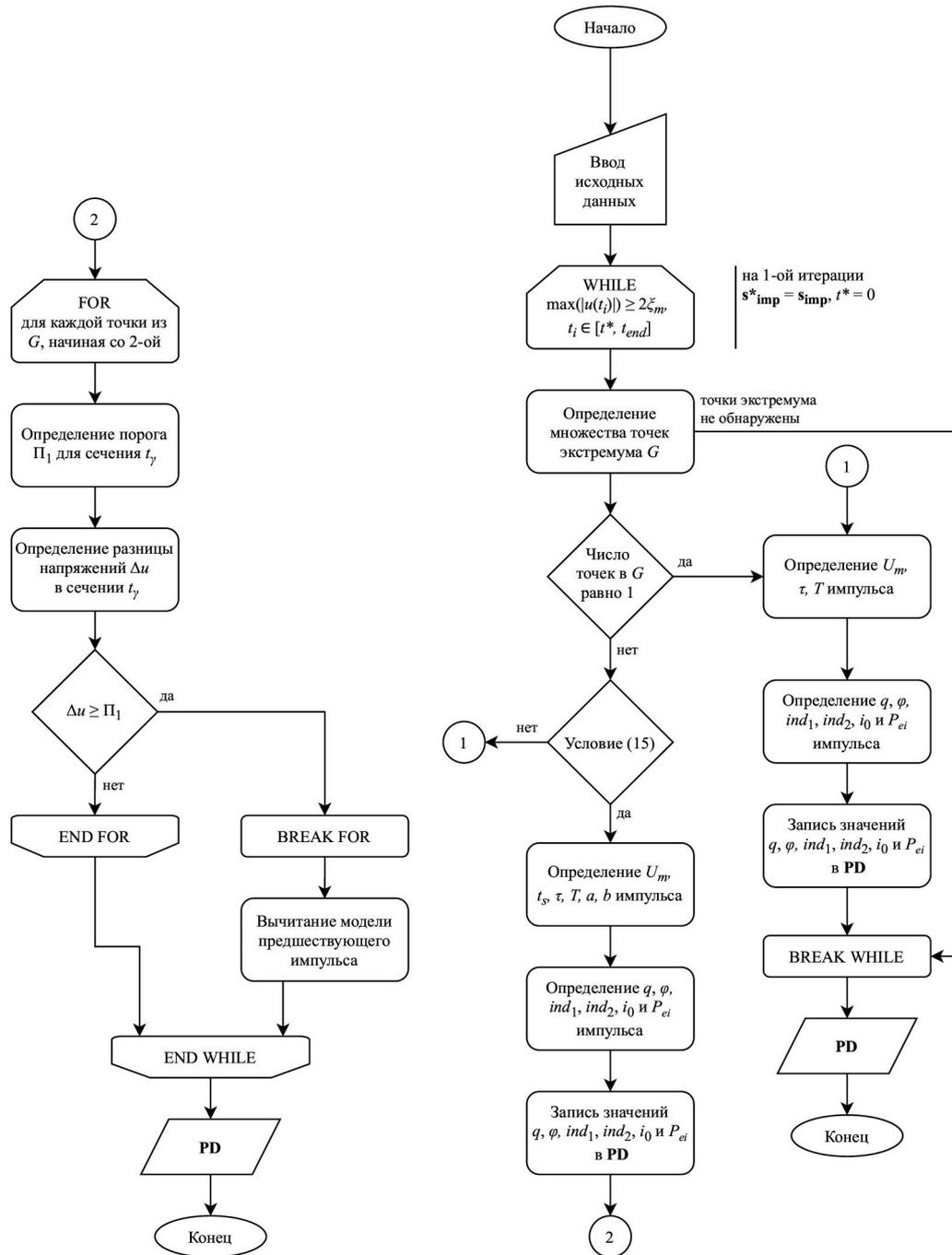


Рисунок 3.6. Алгоритм селекции импульсов частичных разрядов.

Образующей конструкцией разработанного нами алгоритма является цикл WHILE, выполняемый до тех пор, пока сигнал, содержащийся в импульсном пакете, является значимым, что формально выражается в превышении абсолютного максимального значения сигнала над двукратным уровнем помех  $2\xi_m$ . Выходные данные алгоритма собираются в массив **PD**, структура которого представлена таблицей 10.

Таблица 10 – Структура массива **PD**

№	$q$	$\varphi$	$ind_1$	$ind_2$	$i_0$	$P_{ei}$
1	$q_1$	$\varphi_1$	$ind_{11}$	$ind_{21}$	$i_{01}$	$P_{e1}$
2	$q_2$	$\varphi_2$	$ind_{12}$	$ind_{22}$	$i_{02}$	$P_{e2}$
...	...	...	...	...	...	...

Условные обозначения:

$q$  – величина частичного разряда в пикокулонах,

$\varphi$  – значение фазового угла испытательного напряжения,

$ind_1$  – индекс момента возникновения импульса в масштабе сигнала **S**,

$ind_2$  – индекс момента завершения импульса в масштабе сигнала **S**,

$i_0$  – индекс момента возникновения импульса в масштабе импульсного пакета **S<sub>imp</sub>**,

$P_{ei}$  – вероятность ошибки селекции  $i$ -ого импульса.

Первым действием после открытий цикла WHILE является определение множества точек экстремума  $G$ . Если  $G$  содержит только одну точку экстремума, то дальнейший анализ невозможен, такая ситуация характерна для случаев наложения в противофазу или для слабых сигналов при воздействии помех, в этом случае согласно схеме алгоритма определяются соответствующие величины, сохраняемые затем в массив **PD**. Далее проверяется условие (15), в случае невыполнения которого производятся аналогичные действия. В противном случае запускается процесс моделирования импульса частичного разряда, данные по которому сохраняются в массив **PD**. На следующем этапе открывается цикл FOR, выполняемый для каждой последующей точки экстремума, начиная со второй, в котором производится определение порогов обнаружения  $\Pi_1$  и проверка статистических гипотез о наложении импульсов в исследуемых точках экстремума, расположенных в сечениях  $t_\gamma$ . В случае превышения разности ожидаемых и реальных значений сигнала  $\Delta u$  над пороговым значением  $\Pi_1$  цикл FOR прерывается, а модель предшествующего импульса вычитается из импульсного пакета. Далее управление передаётся в цикл WHILE и описанные

операции повторяются.

Приведённый алгоритм не подвержен заикливанию, что объясняется ограниченностью длины импульсного пакета. Обозначим через  $\Omega$  область поиска импульсов в импульсном пакете, тогда при каждом новом обнаружении импульса размер области  $\Omega$  сокращается до  $t_{end} - t^*$ , где  $t_{end}$  – момент времени окончания импульсного пакета,  $t^*$  – момент времени экстремума, предшествующего точке обнаруженного наложения импульсов. Соответственно по мере обнаружения новых импульсов область поиска будет сжиматься, достигая в пределе размера, при котором будет определена одна или ни одной точки экстремума:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} f(\Omega(m)) = 0 \text{ или } 1,$$

где  $m$  – число обнаруженных импульсов,  $f(\Omega(m))$  – функция определения числа точек экстремума в области  $\Omega$ . В этом случае, согласно схеме алгоритма, цикл WHILE останавливается.

### 3.4. Выводы по третьей главе

В третьей главе были окончательно решены первая и вторая из поставленных задач, – написаны и разработаны алгоритмы функционирования модулей диагностики и оптимизации СППР, получившей конкретное воплощение в виде специализированного ПО для ЭВМ, которое может быть установлено и использовано на предприятиях отрасли.

Для решения задачи селекции сигналов частичных разрядов также были разработаны соответствующий алгоритм и ПО, практическая значимость которых заключается в снижении влияния грубых погрешностей (ошибок наложения импульсов) на результаты измерений.

Таким образом в третьей главе были созданы и доведены до программной реализации информационно-аналитические инструменты, использование которых позволяет увеличить производительность ТП и сократить затраты времени и ресурсов.

## Глава 4. Экспериментальное исследование разработанных информационно-аналитических решений

### 4.1. Выбор критериев однородности выборок

Для задачи оценки статистической значимости полученных результатов экспериментальных исследований эффективности разработанных нами информационно-аналитических решений требуется выбрать соответствующие критерии абсолютной однородности, подходящие к условиям нашей задачи.

Формальная постановка задачи оценки статистической значимости сводится к проверке статистических гипотез. Пусть даны две независимые выборки  $X_n = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$  и  $Y_m = \{y_1, y_2 \dots y_m\}$ . Нулевая гипотеза  $H_0$  заключается в принадлежности обеих исследуемых выборок общей генеральной совокупности:

$$H_0 : F(x) = G(y),$$

где  $F(x)$  и  $G(y)$  – законы распределения вероятности случайных величин  $x$  и  $y$ .

Противоположная её гипотеза  $H_1$  заключается в принадлежности выборок разным генеральным совокупностям:

$$H_1 : F(x) \neq G(y).$$

Дальнейший выбор критериев однородности производится на основе типов случайных величин и исследований применимости критериев.

Рассмотрим типы анализируемых данных в контексте соответствующих решаемых в работе задач.

**I. Задача диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции.** В процессе экспериментального исследования функционирования СППР при решении данной задачи данные представляют собой число экспериментов, потребовавшихся для диагностики причины образования опасных микродефектов методом последовательных проверок и носят дискретный характер. Для анализа данных данного типа на практике используются два критерия, – Колмогорова-Смирнова и  $\chi^2$  [122]. Оба критерия

основаны на сравнении частот в выборках и отличаются лишь способом сравнения, в результате чего статистика первого критерия сходится к распределению Колмогорова, а второго – к  $\chi^2$ .

В соответствии с [122] тест на однородность по критерию Колмогорова-Смирнова производится по следующему алгоритму:

1. Расчёт выборочного значения критерия  $D_{n,m}$ :

$$D_{n,m} = \sup |F^{(n)}(x) - G^m(y)|,$$

где  $F^{(n)}(x)$  и  $G^{(m)}(y)$  – эмпирические законы распределения вероятности случайных величин  $x$  и  $y$ .

2. Расчёт модификации  $D^*_{n,m}$ :

$$D^*_{m,n} = \sqrt{\frac{mn}{m+n}} D_{n,m}.$$

3. Определение  $D_{кр}$  для заданного уровня значимости  $\alpha$  на основе распределения статистики Колмогорова.

4. При  $D^*_{n,m} > D_{кр}$  нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается.

Теперь рассмотрим последовательность действий проверки однородности выборок по критерию  $\chi^2$  [122]:

1. Расчёт выборочного значения критерия  $\chi^2_{n,m}$ :

$$\chi^2_{n,m} = nm \sum_{i=1}^r \frac{\left(\frac{u_i}{n} - \frac{v_i}{m}\right)^2}{u_i + v_i},$$

где  $r$  – число групп или дискретных значений случайной величины,  $u_i$  и  $v_i$  – количество элементов первой и второй выборок, попавших в  $i$ -ую группу.

2. Расчёт числа степеней свободы  $\gamma = r - 1$ .

3. Определение  $\chi^2_{кр}$  для заданного уровня значимости  $\alpha$  и числа степеней свободы на основе распределения статистики  $\chi^2$ .

4. При  $\chi^2_{n,m} > \chi^2_{кр}$  нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается.

**II. Задача оптимизации параметров ТП.** В процессе экспериментального исследования функционирования СППР при решении данной задачи данные

представляют собой значения непрерывной случайной величины, характеризующей полезность параметров ТП. Проверка гипотез  $H_0$  и  $H_1$  в данном случае может осуществляться на основе ранговых критериев, среди которых по результатам исследования Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко и И.В. Веретельникова [123] наибольшей мощностью при заданном уровне значимости  $\alpha$  обладает критерий Андерсона-Дарлинга, основанный на сравнении частот в одной из выборок и в объединённой выборке. В пределе статистика критерия Андерсона-Дарлинга сходится к распределению  $a_2(t)$ .

В соответствии с [123] последовательность действий по проверке однородности двух выборок в соответствии с критерием Андерсона-Дарлинга имеет вид:

1. Объединение выборок  $X_n$  и  $Y_n$  с упорядочиванием элементов объединённой выборки в порядке возрастания.

2. Расчёт выборочного значения критерия  $A^2_{m,n}$ :

$$A^2_{m,n} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{m+n-1} \frac{(M_i(m+n) - mi)^2}{i(m+n-i)},$$

где  $M_i$  – количество элементов первой выборки, меньших или равных  $i$ -му элементу упорядоченной объединённой выборки.

3. Определение  $A_{кр}$  для заданного уровня значимости  $\alpha$  на основе распределения статистики  $a_2(t)$ .

4. При  $A^2_{n,m} > A_{кр}$  нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается.

**III. Задача снижение влияния ошибок наложения импульсов на результаты измерений сигналов частичных разрядов.** В процессе экспериментального исследования функционирования алгоритма селекции сигналов частичных разрядов данные представляют собой  $n$  пар исследуемых характеристик  $(x_i, y_i)$ , полученные в результате обработки измерительной информации традиционным способом и с применением разработанного нами алгоритма. То есть мы имеем дело с непрерывными связанными данными. В этом случае для проверки их однородности переходят к проверке симметрии распределения величины  $Z = X - Y$  относительно нуля. Решение данной задачи

осуществляется на основе критерия типа  $\omega^2$ , предложенного Орловым А.И. в [124] и рассчитываемым по следующему сценарию:

1. Формирование выборки  $Z_n = \{x_1 - y_1, x_2 - y_2 \dots x_n - y_n\}$ .
2. Формирование выборки  $-Z_n$ .
3. Построение эмпирического закона распределения  $H_n(z) = P(Z_n \leq z_i)$ .
4. Построение эмпирического закона распределения  $H_n(-z) = P(Z_n \leq -z_i)$ .
5. Расчёт выборочного значения критерия  $\omega_n^2$ :

$$\omega_n^2 = \sum_{i=1}^n (H_n(z_i) + H_n(-z_i) - 1)^2.$$

6. Определение  $\omega_{кр}^2$  для заданного уровня значимости  $\alpha$  на основе распределения статистики  $a_1(t)$ .

7. При  $\omega_n^2 > \omega_{кр}^2$  нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается.

Таким образом, нами были определены критерии проверки однородности выборок экспериментальных данных. В случае непринятия нулевой гипотезы, считаем, что собранные данные принадлежат к разным генеральным совокупностям, а имеющиеся между ними различия являются значимыми.

## 4.2. Исследование функционирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений

### 4.2.1. Исследование функционирования модуля диагностики

Для исследования работы модуля диагностики исследовались данные о результатах диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции, полученные как с использованием модуля диагностики СППР, так и без него. Всего было рассмотрено 88 случаев, поделённых на две равные группы из  $n$  наблюдений. В группе №1 (выборка  $X_n$ ), состоящей из 44-ёх случаев, выбранных случайным образом из архивных данных, диагностика производилась на основе опыта и квалификации ЛПР; в группе №2 (выборка  $Y_n$ ), состоящей также из 44-ёх случаев – при интеллектуальной поддержке разработанной нами системы. Полученные результаты представлены в Приложении Б (таблица Б.1) и в виде гистограмм на рисунке 4.1.

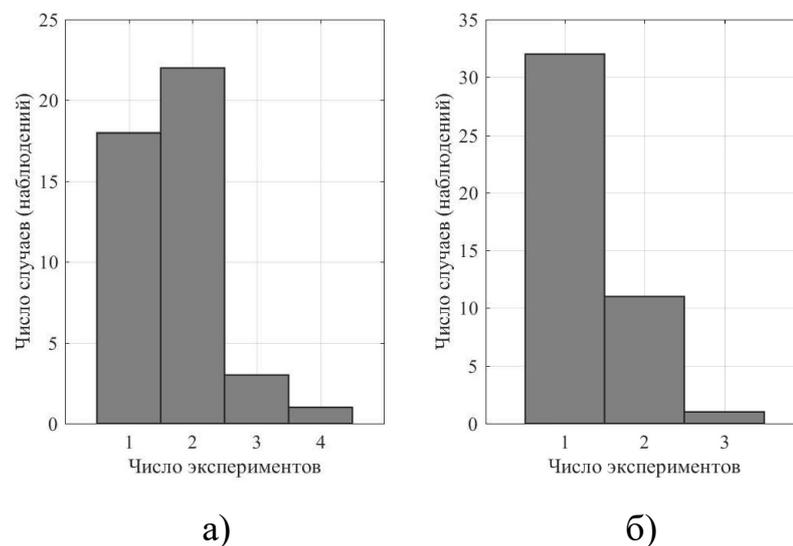


Рисунок 4.1. Гистограммы распределения числа экспериментов, требующихся для диагностики: а – группа №1, б – группа №2.

Приведём краткие результаты проведённого исследования:

1. Общее число экспериментов, потребовавшихся для диагностики случаев

из группы №1, – 75 экспериментов.

2. Общее число экспериментов, потребовавшихся для диагностики случаев из группы №2, – 57 экспериментов.

В итоге имеем, что для диагностики причины образования опасных микродефектов в изоляции кабелей при использовании разработанного нами модуля диагностики СППР потребовалось провести на 18 экспериментов меньше, чем в случаях, когда решения принимались лишь на основе опыта и квалификации ЛПР.

Для оценки значимости полученных результатов рассчитаем значения критериев Колмогорова-Смирнова и  $\chi^2$  и сравним их с соответствующими критическими значениями при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Согласно алгоритмам параграфа 4.1 были получены следующие результаты:

1. Значение критерия Колмогорова-Смирнова  $D_{n,m}^* = 1,4924$ .
2. Критическое значение критерия Колмогорова-Смирнова  $D_{кр} = 1,36$ .
3. Значение критерия  $\chi^2_{n,m} = 9,5867$ .
4. Критическое значение критерия Колмогорова-Смирнова  $\chi^2_{кр} = 7,8147$ .

Превышение эмпирических значений обоих критериев над критическими явно указывает на то, что данные из групп наблюдений №1 и №2 принадлежат к разным генеральным совокупностям, что в свою очередь свидетельствует о значимости различий между потребовавшимся числом для диагностики экспериментов в исследуемых группах.

#### **4.2.2. Исследование функционирования модуля оптимизации**

Для исследования работы модуля оптимизации исследовались данные той же серии экспериментов, что и для модуля диагностики, но собранные уже после адаптации состояния ТП к возмущающим факторам условий производства. Полученные результаты (Приложение Б, таблица Б.1) представляют собой нормированные значения полезностей состояний (режимов функционирования)

ТП в группах №1 и №2.

Приведём краткие результаты проведённого исследования:

1. Нормированное усреднённое значение полезности состояний (режимов функционирования) ТП из группы №1 составило 0,5585 о.е.

2. Нормированное усреднённое значение полезности состояний (режимов функционирования) ТП из группы №2 составило 0,6458 о.е.

В итоге имеем, что при использовании разработанного нами модуля оптимизации СППР нормированное усреднённое значение полезности состояний (режимов функционирования) ТП оказалось на 0.0873 о.е. выше, чем в случаях, когда ЛПР принимал решения, руководствуясь собственным видением вероятности альтернативных исходов без использования модуля оптимизации.

Для оценки значимости полученных результатов рассчитаем значения критерия Андерсона-Дарлинга и сравним его с соответствующим критическим значением при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Согласно алгоритму расчёта критерия из параграфа 4.1 были получены следующие результаты:

1. Значение критерия Андерсона-Дарлинга  $A^2_{m,n} = 3,2291$ ,

2. Критическое значение критерия Андерсона-Дарлинга  $A_{кр} = 2,4924$ .

Превышение эмпирического значения критерия над его критическим указывает на то, что данные из групп наблюдений №1 и №2 принадлежат к разным генеральным совокупностям, что в свою очередь свидетельствует о значимости различий нормированных усреднённых значений полезности состояний (режимов функционирования) ТП в исследуемых группах.

### 4.3. Исследование функционирования алгоритма селекции сигналов частичных разрядов

При исследовании функционирования разработанного нами алгоритма селекции сигналов частичных разрядов был собран большой объём данных, представленный в Приложении Б таблице Б.2. Измерения проводились на штатной испытательной установке, после чего обрабатывались сначала с использованием встроенных алгоритмов (группа №1 –  $Q_1$ ), а затем – с помощью разработанного нами программного обеспечения, позволяющего производить селекцию сигналов частичных разрядов, устойчивую к ошибкам наложения импульсов (группа №2 –  $Q_2$ ). Значения частичных разрядов  $Q_1$  и  $Q_2$  с вероятностями наложения импульсов  $p$  и ошибки селекции  $P_e$  являются средними значениями по сериям из 30 измерений в каждом опыте и представляют собой связанные данные. Для измерений группы №1 вероятность присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений равна вероятности наложения импульсов  $p$ , группы №2 –  $P_e$  (так как именно в случае реализации одного из событий, характеризуемых вероятностью  $P_e$ , ошибки наложения окажут влияние на результаты измерений).

Перед проведением анализа полученных результатов определяются границы применения формулы (24), используемой для оценки вероятности ошибки селекции разработанного нами алгоритма. Для решения данной задачи проанализируем диаграмму рассеяния разницы  $\Delta Q$  в значениях частичных разрядов в группах  $Q_1$  и  $Q_2$  в зависимости от вероятности наложения импульсов  $p$ , представленную на рисунке 4.2.

На основе визуально наблюдаемой неоднородности рассеяния величины  $\Delta Q$ , полученные результаты разбиваются на шесть групп: I –  $p \in (0,3, 0,4]$ , II –  $p \in (0,4, 0,5]$ , III –  $p \in (0,5, 0,6]$ , IV –  $p \in (0,6, 0,7]$ , V –  $p \in (0,7, 0,8]$  и VI –  $p \in (0,8, 0,9]$ . В таблице 11 представлены расчёты усреднённых значений разницы  $\Delta \bar{Q}$  со значениями критерия однородности  $\omega^2$  по выделенным группам

наблюдений.

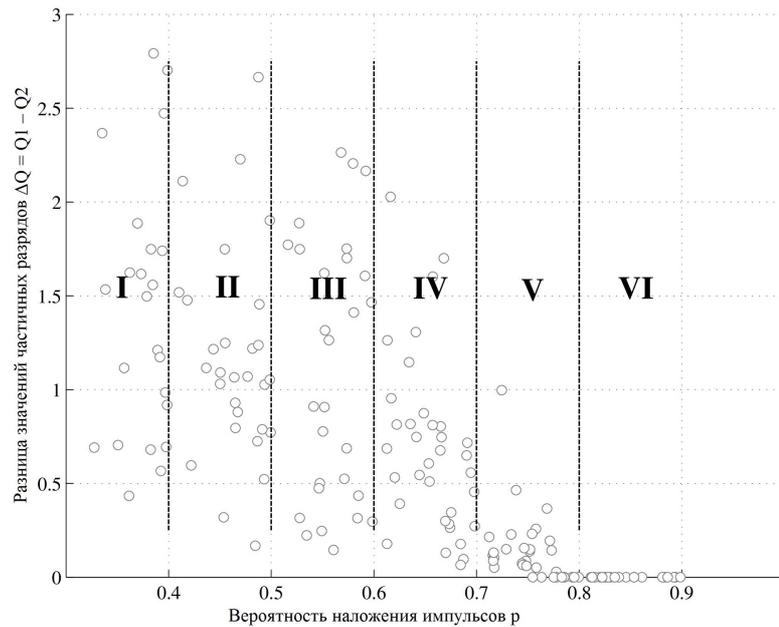


Рисунок 4.2. Диаграмма рассеяния разностей  $\Delta Q$  в зависимости от  $p$ .

Таблица 11 – Результаты расчётов значений разницы  $\Delta \bar{Q}$

№	$p$	$\Delta \bar{Q}$	$\omega_n^2$	$\omega_{кр}^2$	$H_0/H_1$
I	(0,3, 0,4]	1,4218	7,1739	1,66	$H_1$
II	(0,4, 0,5]	1,1709	9,1724	1,66	$H_1$
III	(0,5, 0,6]	1,1044	8,8393	1,66	$H_1$
IV	(0,6, 0,7]	0,6867	11,1714	1,66	$H_1$
V	(0,7, 0,8]	0,1333	6,7725	1,66	$H_1$
VI	(0,8, 0,9]	0,0000	-	-	-

Здесь следует отметить, что столь большая разница в эмпирических и критических значениях критерия  $\omega^2$  обусловлена уменьшением значений частичных разрядов  $Q$  в каждой паре  $(Q_1, Q_2)$ , что практически со 100% вероятностью гарантирует в выборках наличие сдвига, а, следовательно, и принадлежность выборок к разным генеральным совокупностям.

На рисунке 4.3 представлено графическое отображение полученных результатов.

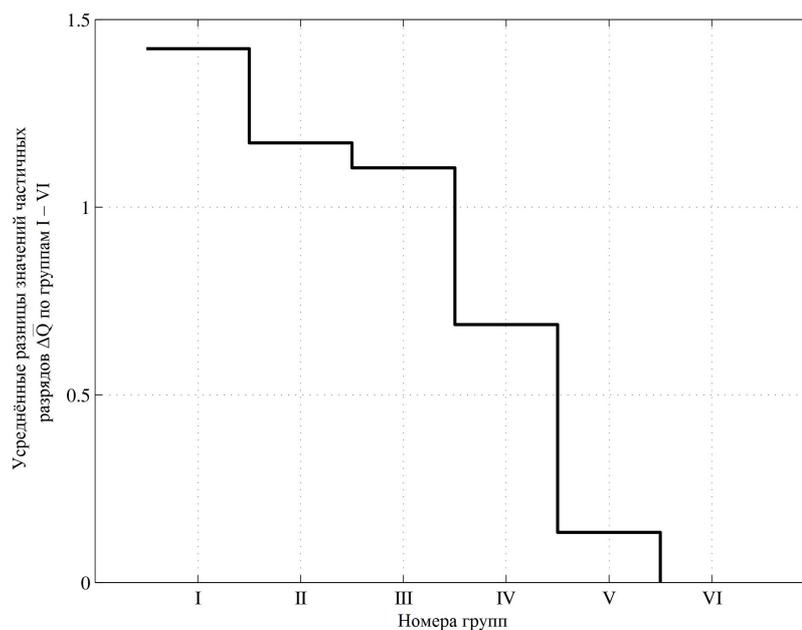


Рисунок 4.3. График изменения значений  $\Delta\bar{Q}$  по исследуемым группам.

Как видно из графика (рисунок 4.3) в IV и V группах наблюдается резкое уменьшение величины  $\Delta\bar{Q}$ , которая в VI группе падает до нуля. Данное явление связано с высокой частотой следования частичных разрядов в указанных группах, при которой разработанный нами алгоритм уже не может адекватно обрабатывать поступающую информацию. В IV – VI группах начинают оказывать влияние эффекты накопления ошибок аппроксимаций импульсов с одновременным наложением более двух импульсов, в результате чего величина  $\Delta\bar{Q}$  резко уменьшаются, а результаты измерений приближаются к результатам, полученным без использования разработанного нами алгоритма.

Таким образом, для оценки вероятности присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений в группах №1 и №2 следует использовать результаты измерений с вероятностями наложения импульсов в пределах от 0,3 до 0,6. Здесь следует отметить, что, несмотря на то, что наблюдения со значениями вероятности  $p$  менее 0,3 в выборке отсутствовали, в данном интервале также можно ожидать снижение результативности функционирования алгоритма в силу естественного снижения ошибок наложения в регистрируемом сигнале, хотя такие условия можно считать исключительными.

Рассчитаем усреднённые значения вероятностей  $\bar{p}$  и  $\bar{P}_e$  по всем наблюдениям с вероятностью  $p \leq 0,6$ , и получим следующие значения:  $\bar{p} = 0,4733$ ,  $\bar{P}_e = 0,1221$ . В результате получаем, что вероятность присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений при использовании разработанного нами алгоритма сократилась в среднем в 3,8763 раза. Для оценки значимости полученных результатов производится расчёт значения критерия  $\omega^2$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , значение критерия составило  $\omega_n^2 = 22,9961$  против  $\omega_{кр}^2 = 1,66$ .

В связи с установленными границами эффективности (в смысле результативности) применения разработанного нами алгоритма актуальным также является вопрос: «Какая доля от общего числа измерений частичных разрядов может быть обработана с использованием разработанного нами алгоритма?»

Доля наблюдений по выборке с вероятностью  $p \leq 0,6$  составила 0,4678. Ошибка доли рассчитывается по формуле [96]:

$$\Delta = z_\alpha s_p = z_\alpha \sqrt{\frac{P_n(1-P_n)}{n}},$$

где  $z_\alpha$  – z-оценка разброса доли наблюдений,  $s_p$  – стандартная ошибка средней,  $P_n$  – выборочная доля наблюдений с исследуемым признаком,  $n$  – число наблюдений в выборке.

В результате расчётов получаем следующую интервальную оценку доли измерений величины частичных разрядов, в которой вероятность присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений при использовании разработанного нами алгоритма сокращается в среднем в 3,8763 раза с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ :

$$0,3930 < P_n < 0,5426.$$

Таким образом, в ходе экспериментального исследования было установлено, что разработанный нами алгоритм селекции сигналов частичных разрядов позволяет существенно снизить влияние грубых погрешностей на результаты измерений, – в среднем в 3,8763 раза при вероятности наложения импульсов  $p \leq 0,6$ . В интервале  $0,6 < p \leq 0,8$  эффективность функционирования

алгоритма резко сокращается и при  $p > 0,8$  результаты его применения сравниваются с результатами, полученными при стандартной статистической обработке измерений. Несмотря на выявленные ограничения примерно в половине случаев использование разработанного нами алгоритма позволяет получать более качественную измерительную информацию (содержащую меньше грубых погрешностей) и уменьшить число ошибочных управляющих воздействий через контур II (рисунок 1.6).

#### 4.4. Оценка повышения эффективности производства кабельной продукции

Как нами было оговорено в начале работы (см. Введение) эффективность производства кабельной продукции в рамках настоящего исследования оценивается по производительности ТП, производственным затратам с учётом соответствия продукции, предъявляемым к ней техническим требованиям. Для оценки данных показателей рассмотрим влияние разработанных нами информационно-аналитических решений на производственный процесс. Отметим, что в силу сложности, недостаточности информации и стохастического характера влияния некоторых видов издержек на общую структуру затрат, результаты приведённого анализа можно интерпретировать только как нижнюю границу увеличения эффективности производства кабельной продукции.

Как показали результаты экспериментального исследования, применение разработанных нами информационно-аналитических решений позволяет:

1) сократить число экспериментов (времени и ресурсов), необходимых для диагностики причин образования опасных микродефектов методом последовательных проверок;

2) увеличить производительность ТП в процессе адаптации его состояния (режима функционирования) к условиям производства;

3) сократить число ошибочных управляющих воздействий, что выражается в уменьшении числа экспериментов (времени и ресурсов) в процессе диагностики и адаптации ТП, а также в увеличении производительности.

Проведение каждого эксперимента включает затраты на сырьё и общие производственные затраты на производство одного образца кабеля. В рамках рассматриваемой задачи считаем, что затратами на сырьё можно пренебречь в виду их незначительности в сравнении с производственными затратами, основной составляющей которых являются потери времени, вызванные приостановкой производственного процесса для нужд его адаптации под конкретную номенклатуру кабельных изделий. В среднем длительность таких задержек  $\tau$  на

производство одного опытного образца кабеля составляет от 2 до 3 часов (принимается для расчётов значение 2,5 часа) и содержит широкий спектр технологических операций по перенастройке оборудования, замене рабочих частей, загрузке сырья и пр.

Данные по диагностике и оптимизации параметров ТП с применением разработанной нами СППР относятся к одному периоду наблюдений длительностью 14 месяцев, что составляет  $T_0 = 6272$  рабочих часов при функционировании производства в две смены.

Затраты времени  $Td_1$  на диагностику без использования модуля диагностики СППР составляют:

$$Td_1 = 75 \cdot 2,5 = 187,5 \text{ ч.}$$

Затраты времени  $Td_2$  на диагностику с использованием модуля диагностики СППР составляют:

$$Td_2 = 57 \cdot \tau = 142,5 \text{ ч.}$$

Затраты времени  $Ta_1$  на адаптацию состояния (режима функционирования) ТП к условиям производства без использования модуля оптимизации СППР составляют:

$$Ta_1 = 99 \cdot 2,5 = 247,5 \text{ ч.}$$

Затраты времени  $Ta_2$  на адаптацию состояния (режима функционирования) ТП к условиям производства без использования модуля оптимизации СППР составляют:

$$Ta_2 = 114 \cdot 2,5 = 285 \text{ ч.}$$

Усреднённый уровень производительности операции наложения электрической изоляции  $P_1$  без использования модуля оптимизации СППР (согласно данным таблицы Б.1) составляет:

$$P_1 = 10,2825 \text{ м/мин.}$$

Усреднённый уровень производительности операции наложения электрической изоляции  $P_2$  при использовании модуля оптимизации СППР составляет:

$$P_2 = 11,1879 \text{ м/мин.}$$

Учитывая, что процесс наложения электрической изоляции занимает в среднем 30% всего времени производственного процесса, рассчитаем коэффициент увеличения общей производительности  $k_p$ :

$$k_p = 0,7 + 0,3 \frac{P_2}{P_1} = 1,026.$$

При использовании алгоритма селекции сигналов частичных разрядов положительный эффект выражается в сокращении ошибочных управляющих воздействий, которые заключаются с одной стороны в проведении излишних экспериментов, а с другой – в возможном снижении производительности вследствие регулирования параметров ТП в результате проведения данных экспериментов. Изменения производительности при этом не столь существенны и данный эффект можно не учитывать.

Тогда число экспериментов  $N_1$  с измерением уровня частичных разрядов без использования разработанного нами алгоритма селекции сигналов частичных разрядов в соответствии с общим числом экспериментов по таблице Б.2 составляет:

$$N_1 = 171.$$

Число экспериментов  $N_2$  с использованием разработанного нами алгоритма составляют общее число экспериментов за вычетом излишних экспериментов (когда при использовании штатных систем обработки измерительной информации уровень частичных разрядов диагностируется выше предельного уровня, а при использовании разработанного нами алгоритма – ниже):

$$N_2 = 171 - 17 = 154.$$

Так как при совместном использовании алгоритм селекции сигналов частичных разрядов будет в одинаковой степени оказывать влияние и на процессы диагностики и на процессы оптимизации, то его вклад может быть учтён в виде коэффициента  $k_s$ , равного отношению  $N_2$  к  $N_1$ :

$$k_s = \frac{N_2}{N_1} = \frac{154}{171} = 0,9.$$

С учётом коэффициента  $k_s$  разница по времени  $\Delta T$  при использовании модулей СППР составит:

$$\Delta T = Td_1 + Ta_1 - k_s(Td_2 + Ta_2) = 50,25 \text{ ч.}$$

Сокращение издержек по времени выражается через увеличение производительности ТП, соответственно повышение эффективности в нашем случае представимо через увеличение производительности с учётом рассчитанных нами коэффициентов  $k_P$  и  $k_s$ . Соответствие продукции предъявляемым к ней техническим требованиям при этом выносится за скобки, так как разработанные нами информационно-аналитические решения полностью обеспечивают их выполнение. Тогда повышение эффективности производства кабельной продукции  $\Delta \mathcal{E}_\%$  в процентах равно:

$$\Delta \mathcal{E}_\% = \left( \frac{P_{\text{ТП2}}}{P_{\text{ТП1}}} - 1 \right) \cdot 100\% = \left( \frac{k_P S_0}{(T_0 - \Delta T) S_0} \cdot \frac{T_0}{S_0} - 1 \right) \cdot 100\% = 3,4\%,$$

где  $P_{\text{ТП2}}$  – производительность ТП с использованием разработанных нами информационно-аналитических решений;  $P_{\text{ТП1}}$  – производительность ТП без использования разработанных нами информационно-аналитических решений;  $S_0$  – некоторый объём продукции, производимый за период  $T_0$ ;  $k_P$  – коэффициент, учитывающий повышение производительности ТП наложения электрической изоляции;  $k_s$  – коэффициент, учитывающий использование алгоритма селекции сигналов частичных разрядов при выполнении измерений.

Таким образом, нижняя граница  $\Delta \mathcal{E}_\%$  повышения эффективности производства кабельной продукции составила 3,4%, что применительно ко всему производственному процессу является весьма значимым результатом.

#### 4.5. Выводы по четвёртой главе

В четвёртой главе было проведено экспериментальное исследование разработанных нами алгоритмов и систем. Подведём краткие итоги:

1. В результате исследования работы модуля диагностики число экспериментов, необходимое для диагностики причин образования опасных микродефектов методом последовательных проверок, сократилось на 24%.

2. В результате исследования работы модуля оптимизации полезность режимов функционирования возросла на 16%.

3. В результате исследования алгоритма селекции сигналов частичных разрядов было зафиксировано снижение вероятности присутствия грубых погрешностей среди результатов измерений в среднем в 3,8763 при вероятности наложения импульсов  $p \leq 0,6$ .

4. С увеличением вероятности наложения импульсов  $p$  эффективность (в смысле результативности) резко снижается, а при  $p > 0,8$  падает до нуля.

5. Повышение эффективности производства кабельной продукции составило 3,4%.

6. Полученные в ходе экспериментального исследования результаты являются статистически значимыми.

Таким образом, нами было получено экспериментальное подтверждение применимости и эффективности разработанных нами информационно-аналитических решений.

## Заключение

Ниже приведены основные результаты научной работы:

1. Проведено исследование технологии производства кабельной продукции и системы управления ТП, в результате которого обнаружены определённые проблемы, связанные с управлением ТП, снижающие эффективность производства кабельной продукции, в частности – диагностика причин образования опасных микродефектов, определение оптимальных значений параметров ТП и определение уровня частичных разрядов в изоляции кабелей.

2. Рассмотрены существующие методы и подходы в решении обозначенных проблем, выявлены имеющиеся недостатки и ограничения, определены направления и сформулированы задачи по их развитию и совершенствованию.

3. Разработаны алгоритмы, логико-математический аппарат и ПО интеллектуальной СППР, оказывающей ЛПР информационно-аналитическую поддержку в решении задач диагностики и оптимизации параметров ТП.

4. Разработаны алгоритмы, математический аппарат и ПО, позволяющие производить устойчивую к ошибкам наложения селекцию сигналов частичных разрядов.

5. Произведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов и систем, подтверждающие снижение числа экспериментов в процессе диагностики причин образования опасных микродефектов и увеличение полезности параметров ТП при использовании разработанной нами СППР, и уменьшение влияния на результаты измерений ошибок наложения импульсов при использовании разработанного нами алгоритма селекции сигналов частичных разрядов.

6. Применение разработанных в результате диссертационной работы технологий способствует повышению эффективности производства кабельной продукции, по меньшей мере, на 3,4%.

## Список литературы

1. Пармухина Е.Л. Обзор рынка кабельно-проводниковой продукции // Электротехнический рынок. 2013. №1. С. 36-37.
2. Макаров Г.А. Весь мир так делает. И мы должны [Электронный ресурс] // Эксперт Северо-Запад. 2008. №27. URL: [https://expert.ru/northwest/2008/27/kabelnaya\\_promyshlennost/](https://expert.ru/northwest/2008/27/kabelnaya_promyshlennost/) (дата обращения 18.03.2020).
3. Писанный А.В. Рынок кабеля в России и странах СНГ // Кабели и провода. 2011. №3. С. 3-7.
4. Штеле Е.А., Вечерковская О.Б. К вопросу о понятии «эффективность» // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. №5. С. 935-947.
5. ГОСТ Р 56404-2015 БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО Требования к системам менеджмента. – Москва: Стандартинформ, 2015. 20 с.
6. Ephrem Gidey, Birhanu Beshah, Daniel Kitaw Review on the evolving relationship between quality and productivity // International Journal for Quality Research. 2014. Vol. 8, №2, pp. 47-60.
7. Белоруссов Н.И. и др. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева; Под ред. Н.И. Белоруссова. – 5 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 536 с.; ил.
8. Александрова Т.В., Бикинеева Ю.Л., Громаков Е.И., Павлов В.М., Малышенко А.М. Интегрированная система автоматизации кабельного производства // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 5. С. 69-74.
9. Ларичев О.И., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 208 с. – ISBN 5-02-015203-X
10. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / Под ред. И.Б. Пешкова: Учебн. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2011. – 368 с.,

ил.

11. Листратенков А.И. Теоретические основы конструирования силовых кабелей и проводов. – М.: Полиграф сервис, 2006. – 286 с.

12. Sushil Kumar Ganguli, Vivek Kohli Power Cable Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2016. – 427 pp.

13. Бортников В.Г. Теоретические основы и технология переработки пластических масс: Учебник. – 3-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 480 с. + Доп. Материалы [Электронный ресурс; Режим доступа <http://znanium.com>]. – (Высшее образование). – [www.dx.doi.org/10.12737/7356](http://www.dx.doi.org/10.12737/7356).

14. Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И. Ротационные приборы. Измерение вязкости и физико-механических характеристик материалов. – М.: изд.-во «Машиностроение», 1967. – 272 с.

15. Кербер М.Л. Технология переработки полимеров. Физические и химические процессы: учеб. пособие для вузов / под ред. М.Л. Кербера. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 316 с. – (Серия: Университеты России).

16. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., Наука, 1968. 400 с.

17. Ostroverkhov M., Silvestrov A., Kryvoboka G. Identification of the parameters of the cable production process // Technology audit and production reserves. 2017. Vol. 5. No. 1(37). pp. 29-34.

18. Казаков А.В. Управление процессом формования многослойной полимерной изоляции при производстве кабелей среднего напряжения: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2011. 95 с.: ил.

19. Терлыч А.Е. Модели и алгоритмы управления процессом экструзии полимеров при производстве кабелей: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2013. 149 с.: ил.

20. Зиннатулин Р.Р. Управление процессом охлаждения экструдированной полимерной изоляции при производстве электрических кабелей: дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2009. 107 с.: ил.

21. ГОСТ Р 55025-2012 Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. – Москва: Стандартинформ, 2014. 31 с.
22. ГОСТ Р МЭК 60840-2011 Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 30 кВ ( $U_m = 36$  кВ) до 150 кВ ( $U_m = 170$  кВ). – Москва: Стандартинформ, 2012. 41 с.
23. ГОСТ Р МЭК 62067-2011 Кабели силовые с экструдированной изоляцией и арматура к ним на номинальное напряжение свыше 150 кВ ( $U_m = 170$  кВ) до 500 кВ ( $U_m = 550$  кВ). – Москва: Стандартинформ, 2012. 31 с.
24. Расстригин Л.А. Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981 г. – 375 с.
25. Образцов Ю.В., Фрик А.А., Сливов А.А. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // Кабели и провода. 2005. №1. С. 9–13.
26. Леонов А.П., Редько В.В. Выявление дефектов кабелей и проводов при испытаниях по категории ЭИ-2 // Кабели и провода. 2015. №1. С. 15–20.
27. Баринов В.М., Пронин А.В., Соловьев Н.Н. Входной контроль качества кабельной продукции // Кабели и провода. 2016. №6. С. 16–18.
28. Lakhdar Bessissa, Larbi Boukezzi, Mahi Djillaly Influence of fuzzy parameters on the modeling quality of XLPE insulation properties under thermal aging // Fuzzy Information and Engineering. 2016. Vol. 8, Issue 1, pp. 101–112.
29. N.S. Starikova, V.V. Redko The analysis of factors affecting the quality of cable insulation control carried out with the complex method // WSEAS Transactions on Systems and Control. 2016. Vol. 11, pp. 39–44.
30. Домнич В.С., Иващенко В.А. Построение базы знаний для поиска причин аварийных ситуаций при формировании листового стекла // Управление большими системами. 2011. Выпуск 33. С. 218-232.
31. Козлова Т.Д., Игнатьев А.А. Экспертная система поддержки принятий решений для определения причин отказов автоматизированных станочных модулей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.

Технические науки. 2013. №1 (25). С. 19-25.

32. ГОСТ Р 55191-2012 Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. – Москва: Стандартинформ, 2014. 43 с.

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

34. D.A. Nattrass Partial discharge. XVII. The early history of partial discharge research // IEEE Electrical Insulation Magazine. 1993. Vol. 9. No. 4. pp. 27-31.

35. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. – Екатеринбург: ОАО «ИПП «Уральский рабочий», 2011. 367 с.

36. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с., ил.

37. R.J. Van Brunt Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1994. Vol. 1. No. 5. pp. 761-784.

38. L. Niemeyer The physics of partial discharges / L. Niemeyer // 1993 International Conference on Partial Discharge: international conference proceedings. – Canterbury: IET, 1993. pp. 1-4.

39. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учебн. руководство: Для вузов – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Наука Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992 – 536 с.

40. Новикова С.Ю. Физика диэлектриков [Электронный ресурс]. М., 2007. 81 с. URL: <https://docplayer.ru/26135534-Elektronnoe-izdanie-fizika-dielektrikov.html> (дата обращения: 22.08.2019).

41. Коробейников С.М., Вечёркин М.В. Физика возникновения, характеристики и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электротехнические системы и комплексы. 2010. №1. С. 204-212.

42. Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
43. Фомина И.А. Исследование воздействия коммутационных перенапряжений на измерительные трансформаторы тока сверхвысокого напряжения и результаты химического анализа трансформаторного масла / Фомина И.А. // Сборник научных трудов НГТУ. 2010. №4. С. 155-160.
44. G.C. Stone Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2005. Vol. 12. No. 5. pp. 891-904.
45. E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, High Voltage Engineering Fundamentals 2-nd edition, – Oxford: Newnes, 2000. – 534 p.
46. E. Harking, F.H. Kreuger, P.H.F. Morshuis Partial discharges in 3-core belted power cables // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1989. Vol. 24. No. 4. pp. 591-598.
47. A. Zargari, T.R. Blackburn Acoustic detection of partial discharges using non-intrusive optical fiber sensors [current transformers] / A. Zargari, T.R. Blackburn // ICSD'98. IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No.98CH36132): international conference proceedings. – Vasteras: IEEE, 1998. pp. 573-576.
48. Titan Y., Lewin P.L., Davies A.E. and Richardson Z. Acoustic emission detection of partial discharges in polymeric insulation / Titan Y., Lewin P.L., Davies A.E., Richardson Z. // 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering: international conference proceedings. – London: IET, 1999. Vol. 1. pp. 82-85.
49. L. Jin, Z. Tian, J. Ai, Y. Zhang, K. Gao Condition evaluation of the contaminated insulators by visible light images assisted with infrared information // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. Vol. 67. No. 6. pp. 1349-1358.
50. P. Gurumurthy Reddy, Prasanta Kundu Detection and analysis of partial

discharge using ultra high frequency sensor / P. Gurumurthy Reddy, Prasanta Kundu // 2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD): international conference proceedings. – Kottayam: IEEE, 2014. pp. 1-6.

51. C. Boya, M.V. Rojas-Moreno, M. Ruiz-Llata, G. Robles Location of partial discharges sources by means of blind source separation of UHF signals // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. No. 4. pp. 2302-2310.

52. ГОСТ Р 55191-2012 Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. – Москва: Стандартинформ, 2014. 43 с.

53. ГОСТ 20074-83 Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. 24 с.

54. Моногаров О.И. Выбор датчика частичных разрядов для диагностики кабельной изоляции / О.И. Моногаров // Наука и современность – 2016: сборник материалов XLVI Международной НПК. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2016. С. 86-90.

55. ГОСТ 28114-89 КАБЕЛИ Метод измерения частичных разрядов. – Москва: Стандартинформ, 2007. 12 с.

56. Федосов Е.М. Частичные разряды в элементах электротехнических комплексов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2009. 136 с.: ил.

57. E. Gulski Digital analysis of partial discharges // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2. No. 5. pp. 822-837.

58. A. Krivda Automated recognition of partial discharges // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2. No. 5. pp. 796-821.

59. F.H. Kreuger, E. Gulski, A. Krivda Classification of partial discharges // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1993. Vol. 28. No. 6. pp. 917-931.

60. B.T. Phung, Z. Liu, T.R. Blackburn, R.E. James Wavelet transform analysis of partial discharge signals / B.T. Phung, Z. Liu, T.R. Blackburn, R.E. James // Australian Universities Power Engineering Conference and Electric Energy Conference:

international conference proceedings. – Darwin: The Northern Territory University, 1999. pp. 275-280.

61. X. Ma, C. Zhou, I.J. Kemp Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. Vol. 9. No. 3. pp. 446-457.

62. Моногаров О.И. Исследование вейвлет-спектра частичных разрядов для их эффективного обнаружения в помехонасыщенном сигнале / О.И. Моногаров // Череповецкие научные чтения – 2012: Материалы Всероссийской НПК: В 3 ч. Ч. 3: Естественные, экономические, технические науки и математика. – Череповец: ЧГУ, 2012. С. 203-206.

63. S. Boonpoke, B. Marungsri Pattern recognition of partial discharge by using simplified fuzzy ARTMAP // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2010. Vol. 4. No. 5. pp. 789-796.

64. H. Nafisi, M. Davary, M. Abedi, G.B. Gharehpetian Using fuzzy ARTmap neural network for determination of partial discharge location in power transformers / H. Nafisi, M. Davary, M. Abedi, G.B. Gharehpetian // IEEE Bucharest PowerTech: international conference proceedings. – Bucharest: IEEE, 2009. pp. 1-4.

65. B. Marungsri, S. Boonpoke Applications of simplified fuzzy ARTMAP to partial discharge classification and pattern recognition // WSEAS Transactions on Systems. 2011. Vol. 10. Issue 3. pp. 69-80.

66. Wen-Yeau Chang Application of self organizing map approach for partial discharge pattern recognition of insulators / Wen-Yeau Chang // IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials: international conference proceedings. – Harbin: IEEE, 2009. pp. 449-452.

67. A. Krivda, E. Gulski, L. Satish, W.S. Zaengl The use of fractal features for recognition of 3-D discharge patterns // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2. No. 5. pp. 889-892.

68. O.N. Agamolov The technique of clustering analysis of partial discharge / O.N. Agamolov // IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition: international conference proceedings. – Seattle: IEEE, 2009. pp. 1-9.

69. Xiaosheng Peng, Chengke Zhou, Donald M. Hepburn, Martin D. Judd, W.H. Siew Application of K-Means Method to Pattern Recognition in On-line Cable Partial Discharge Monitoring // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20. Issue 3. pp. 754-761.

70. Жигалов И.Е., Моногаров О.И. Сравнительный анализ методов селекции сигналов ЧР / И.Е. Жигалов, О.И. Моногаров // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции / МНИЦ ПГАУ. – Пенза: РИО ПГАУ, 2019. С. 52-58.

71. S. Senthil Kumar, M.N. Narayanachar, R.S. Nema Enhancing partial discharge measurement with extended resolution analyzer / Senthil Kumar, M.N. Narayanachar, R.S. Nema // Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering: international conference proceedings. – London: IET, 1999. pp. 200-203.

72. S. Senthil Kumar, M.N. Narayanachar, R.S. Nema Partial Discharge Measurement with the Extended Resolution Analyzer / Senthil Kumar, M.N. Narayanachar, R.S. Nema // 12th International Symposium on High-Voltage Engineering: international conference proceedings. – Bangalore, Indian Institute of Science, Dep. High Voltage Engineering, 2001, pp. 1051–1054.

73. Robi Polikar Введение в вейвлет-преобразование / пер. с англ. В.Г. Грибунина [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: АВТЭКС. 59 с. URL: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf> (дата обращения 22.08.2019).

74. Способ диагностики высоковольтного оборудования: пат. 2434236 Рос. Федерация. МПК G01R 31/12 / В.А. Шахнин, О.И. Моногаров; № 2010131471/28; заявл. 27.07.2010; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32. 7 с.

75. Брук В.М., Николаев В.И. Методы принятия решений в сложных системах: учеб. пособие. – Ленинград: Издание Северо-Западного заочного политехнического института, 1977. – 72 с.

76. Катасёв А.С. Модели и методы формирования нечётких правил в интеллектуальных системах диагностики состояния сложных объектов: дис. ...

док. техн. наук. Казань, 2014. 257 с.: ил.

77. Глова В.И., Аникин И.В., Шагиахметов В.Р. Методы многокритериального принятия решений в условиях неопределенности в задачах нефтедобычи. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2004. – 31 с.

78. Глова В.И., Аникин И.В., Шагиахметов В.Р. Система нечеткого моделирования для решения задач повышения нефтедобычи // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2001. № 3. С. 59-61.

79. Рязанцев В.И., Морозов А.В. Методика проведения согласования экспертных оценок полученных путем индивидуального анкетирования методом анализа иерархий [Электронный ресурс] // Инженерный вестник. 2014. №12. URL: <http://engsi.ru/doc/742182.html> (дата обращения 25.10.2019)

80. Елтаренко Е.А., Крупнова Е.К. Обработка экспертных оценок. Учебное пособие. М.: Изд. МИФИ, 1982, 96 с.

81. Кузьменко Т.В. Экспертный опрос как основа принятия управленческих решений // Социологический альманах. 2017. Выпуск №8. С. 434–443.

82. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с., ил. – (Матем. статистика для экономистов).

83. Менеджмент: учебник / под ред. проф. В.И. Королева. – М.: Экономистъ, 2006. – 432 с. – (Homo faber)

84. Бухарин С.Н., Дивуева Н.А. Проблема оценки компетентности и психологических свойств эксперта // Инноватика и экспертиза. 2013. Выпуск 1 (10). С. 108–115.

85. Коробов В.Б. Организация проведения экспертных опросов при разработке классификационных моделей // Социологические исследования. 2003. №11. С. 102–108.

86. Литвак Б.Г. Экспертные оценки и принятие решений. – М.: Патент, 1996. – 271 с.

87. Жигалов И.Е., Моногаров О.И. Экспертная система диагностики причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. том 20. №1. С. 51–59.
88. Назад в неопределенность: будущее кабельного рынка [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ruscable.ru/article/back\\_to\\_uncertainty/](https://www.ruscable.ru/article/back_to_uncertainty/) (дата обращения 22.02.2021).
89. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 704 с.
90. Yun Peng, James A. Reggia Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving. – New York: Springer-Verlag, 1990. – 285 pp.
91. Y. Miyata, T. Furuhashi, Y. Uchikawa A Study on Fuzzy Abductive Inference / Y. Miyata, T. Furuhashi, Y. Uchikawa // IEEE International Conference on Fuzzy Systems: international conference proceedings, Vol. 1. – Yokohama, IEEE, 1995, pp. 337–342.
92. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Фёдоров И.П. Принятие решений на основе нечётких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
93. Пегат А. Нечёткое моделирование и управление [Электронный ресурс] / А. Пегат; пер. с англ. – 3-е изд. (эл.). – Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 801 с.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – (Адаптивные и интеллектуальные системы). – Систем. требования: Adobe Reader XI; экран 10".
94. Кудрявцев К.Я. Методы оптимизации: учеб. пособие для вузов / К.Я. Кудрявцев, А.М. Прудников. – 2-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 141 с. – (Серия: Университеты России)
95. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / пер. с англ. И.М. Быховской, Б.Т. Вавилова, – М.: Издательство «МИР», 1975. – 536 с.
96. Шварц Г. Выборочный метод: руководство по применению статистических методов оценивания / пер. с нем. Я.Ш. Паппэ, – М.: «Статистика», 1978. – 213 с.

97. Котельников Е.В. Методология интеллектуального анализа мнений при обработке текстовой информации на основе правдоподобного вывода: дис. ... док. техн. наук. Нижний Новгород, 2019. 365 с.: ил.

98. Жигалов И.Е., Моногаров О.И. Алгоритм поддержки принятия решений в управлении качеством изготовления кабельной изоляции // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2019. том 19. №3. С. 94–103.

99. Моногаров О.И. Разработка математической модели оценки экономических показателей в управлении качеством изготовления кабельной изоляции // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии [Электронный ресурс]: сборник материалов IX Всероссийской конференции с международным участием; Оренбург. гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург, 2019. С. 260-263.

100. Constantin Brătianu, Simona Vasilache Evaluating linear-nonlinear thinking style for knowledge management education // Management & Marketing. 2009. Vol. 4. No. 3. pp. 3-18.

101. James S. Hernandez, Prathibha Varkey Vertical versus lateral thinking // Physician executive. 2008. Vol. 34. No. 3. pp. 26-28.

102. Charles M. Vance, Kevin S. Groves, Yongsun Paik and Herb Kindler Understanding and measuring linear-nonlinear thinking style for enhanced management education and professional practice // Academy of Management Learning and Education. 2018. Vol. 6. No. 2. pp. 167-185.

103. Королёв В.Ю., Соколов И.А. Скошенные распределения Стьюдента, дисперсионные гамма-распределения и их обобщения как асимптотические аппроксимации // Информатика и её применения. 2012. Т. 6. Вып. 1. С. 3–11.

104. Бондарчук С.С., Бондарчук И.С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel: учеб. пособие. – Томск: Издательство Томского государственного педагогического университета, 2018. – 433 с.

105. Моногаров О.И. Разработка интеллектуального метода селекции сигналов частичных разрядов на основе анализа последовательности экстремумов

// Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 3. С. 112-115.

106. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004, 320 с., ил.

107. Максимов М.В., Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х. и др. Защита от радиопомех. Под ред. Максимова М.В. М., «Сов. радио», 1976, 496 с.

108. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – 7-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.: ил.

109. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов: Учебник для вузов / Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. - М.: Связь, 1980. – 288 с., ил.

110. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с., ил.

111. Борисов В.И. и др. Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.: ил.

112. Моногаров О.И. Обнаружитель импульсных пакетов для обработки данных измерений сигналов частичных разрядов / О.И. Моногаров // European Scientific Conference: сборник статей XII Международной научно-практической конференции в 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. С. 123-125.

113. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 552 с.

114. Моногаров О.И. Определение порогового значения при различении наложений импульсов частичных разрядов методом последовательного анализа экстремумов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. №12. С. 24-29.

115. Вержбицкий В.М. Основы численных методов: Учебник для вузов / В.М. Вержбицкий. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2009. – 840 с.: ил.

116. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике.

Изд-во «Советское радио», 1971, 328 стр.

117. Ковалёв Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика для экономистов: учебник и практикум для прикладного бакалавриата / Е.А. Ковалёв, Г.А. Медведев; под общ. ред. Г.А. Медведева. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 284 с. – Серия: Бакалавр. Прикладной курс.

118. Моногаров О.И. Свидетельство № 2020615483 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа поддержки принятия решений «SDS for Quality Control System».

119. Моногаров О.И. Свидетельство № 2018614637 о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для селекции сигналов частичных разрядов «PDSelector».

120. Моногаров О.И. Архитектура математического аппарата селекции сигналов частичных разрядов // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 12. С. 3-6.

121. Моногаров О.И. Алгоритм идентификации наложений импульсов напряжения частичных разрядов / О.И. Моногаров // Научное обеспечение технического и технологического прогресса: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Магнитогорск, 08 ноября 2018 г.). – Стерлитамак: АМИ, 2018. С. 47-51.

122. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

123. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В. О применении критериев проверки однородности законов распределения // Вестн. Том. гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. №41. С. 24-31.

124. Орлов А.И. О проверке однородности связанных выборок // Научный журнал КубГАУ. 2016. №123. С. 708-726.

## Приложение А. Результаты обработки экспертной информации

Таблица А.1 – постоянные коэффициенты, используемые в расчёте коэффициентов компетентности

№ эксперта	$k_{\text{стаж}}$	$k_{\text{долж}}$	$k_{\text{др}}$	$k_{\text{стаж}} \cdot k_{\text{долж}} \cdot k_{\text{др}}$
1	1,75	2	1,21	4,24
2	1,5	1,75	1,21	3,18
3	2	2	2	8,00
4	2	1,75	2	7,00
5	1,75	2	2	7,00
6	1,5	1,5	1,21	2,72
7	1,75	2	1,22	4,27
8	1,75	2	1,22	4,27
9	1,5	1,5	1,22	2,75
10	2	2	1,13	4,52
11	1,5	1,5	1,13	2,54
12	1,75	1,5	1,13	2,97

Таблица А.2 – коэффициенты компетентности экспертов

№	Эксперты											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18.1.9	8,09	6,07	15,27	13,36	7,00	5,20	8,15	8,15	5,24	8,63	4,85	5,66
18.1.10	8,09	3,18	15,27	13,36	13,36	5,20	8,15	8,15	5,24	8,63	4,85	5,66
18.2.9	8,09	6,07	15,28	13,37	13,37	2,73	8,16	8,16	5,25	8,63	4,85	5,66
18.3.5	7,62	5,72	14,40	12,60	12,60	2,72	7,69	7,69	4,949	4,529	4,58	5,34
18.3.6	7,62	3,18	14,40	12,60	12,60	4,90	7,69	7,69	4,94	4,52	4,58	5,34
18.3.10	8,14	6,11	8,00	13,46	8,08	5,24	8,21	4,93	5,28	8,69	4,89	5,70
18.4.13	7,06	5,29	8,00	11,67	11,67	4,54	4,27	7,12	4,58	7,53	2,54	4,94
18.5.1	7,62	3,18	14,40	12,60	12,60	4,90	4,27	7,69	4,94	8,14	4,58	5,34
18.5.11	8,09	3,18	15,27	13,36	13,36	5,20	8,15	8,15	5,24	8,63	4,85	5,66
18.6.1	8,47	6,35	16,00	14,00	14,00	5,45	8,54	8,54	5,49	9,04	5,09	5,93
18.6.12	8,09	6,06	15,27	13,36	7,00	5,20	8,15	8,15	5,24	8,63	4,85	5,66
18.7.2	8,47	6,35	16,00	14,00	14,00	5,45	8,54	8,54	5,49	9,04	5,09	5,93

## Продолжение таблицы А.2

№	Эксперты											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18.7.3	8,47	6,35	16,00	14,00	14,00	5,45	8,54	8,54	5,49	9,04	5,09	5,93
18.7.4	8,14	3,67	15,38	7,00	13,46	3,14	8,21	8,21	3,17	8,69	4,89	2,97
18.7.6	8,14	6,11	8,00	13,46	13,46	5,24	4,93	8,21	5,28	5,22	4,89	5,70
18.7.12	8,47	6,35	16,00	14,00	14,00	5,45	8,54	4,27	5,49	9,04	5,09	2,97
18.8.7	8,09	6,06	15,27	13,36	7,00	5,20	8,15	8,15	5,24	8,63	4,85	5,66
18.8.8	7,06	5,29	13,33	7,00	11,67	4,54	4,27	7,12	4,58	4,52	4,24	4,94
9.1	7,31	6,12	13,37	10,07	13,74	4,21	5,52	7,76	2,90	8,88	2,54	5,61
10.1	6,93	5,49	15,27	12,73	12,09	4,70	7,38	6,21	4,74	8,63	3,70	2,97
9.2	4,43	5,10	15,07	9,28	12,86	4,24	6,85	4,27	5,17	8,51	4,67	2,97
10.2	7,12	4,10	15,02	10,76	13,15	4,58	6,56	5,31	4,35	5,84	3,16	2,97
9.3	7,91	5,93	12,27	13,53	14,00	4,36	7,69	6,26	2,75	6,63	3,39	4,75
10.3	8,33	3,18	11,61	10,16	10,16	3,07	8,13	8,13	5,22	8,31	3,69	5,26
9.4	8,05	4,76	9,60	12,60	7,00	5,17	5,55	8,11	4,67	8,59	4,07	5,64
10.4	5,70	6,24	14,07	7,00	9,90	3,29	8,10	8,39	4,64	7,64	5,00	4,40
9.5	5,45	3,18	14,86	9,00	9,00	5,06	4,27	4,27	5,10	5,81	2,54	3,81
10.5	5,45	4,99	14,86	11,00	13,00	2,72	5,49	7,93	5,10	7,10	4,72	5,51
9.6	8,19	4,87	11,20	9,80	9,80	5,26	7,69	8,26	3,84	6,93	2,54	3,76
10.6	6,04	6,30	12,98	12,74	8,38	2,72	5,95	6,93	5,45	8,97	3,63	4,81
9.7	7,87	5,90	14,86	7,00	7,00	5,06	6,71	4,27	5,10	7,10	4,72	4,66
10.7	6,05	6,13	15,43	13,00	13,50	4,67	4,27	7,32	5,10	5,81	4,90	5,09
9.8	7,36	5,18	8,00	12,16	12,16	4,44	6,97	7,42	3,03	7,37	4,42	5,15
10.8	4,24	5,99	14,44	13,67	7,56	4,22	8,34	5,24	4,92	7,74	4,56	5,32
9.9	7,22	5,04	9,88	13,59	11,94	5,28	8,29	4,77	5,01	7,18	3,44	2,97
10.9	5,73	5,04	12,71	12,35	13,59	4,32	6,78	4,27	4,20	6,91	4,04	5,23
9.10	6,08	5,39	8,00	10,65	12,48	4,62	5,38	7,61	4,18	5,31	4,31	3,48

Расшифровка обозначений номеров:

18.X1.X2

18 – вопросы анкеты с 1-ого по 8-ой

X1 – номер производственного правила

X2 – номер технической характеристики из Z

9.X1, 10.X1

9, 10 – 9-ый или 10-ый вопрос анкеты

X1 – номер технической характеристики из  $Z$ Таблица А.3 – средневзвешенные значения параметров функций принадлежности элементов множества  $Z$ 

№	$a$	$b$	$x_1$	$x_2$
1	1111,1111	-2,2222	0,0020	0,0029
2	-0,0580	3,2260	55,6243	38,3815
3	0,02898	-3,7306	128,7355	163,2434
4	0,2056	-1,7919	8,7165	13,5808
5	1,0254	-2,8127	2,7429	3,7181
6	4,4150	-2,7656	0,6264	0,8529
7	0,0646	-1,3520	20,9259	36,4034
8	15,6006	-3,9329	0,2521	0,3162
9	0,0142	-0,6365	44,9801	115,6508
10	0,0267	-0,4866	18,2537	55,7649
11	0,0235	-0,5882	25,0589	67,6597
12	0,0166	-0,2834	17,0851	77,3787
13	0,0082	-0,2633	32,1261	154,1215

Таблица А.4 – продукционные правила

№	Продукционное правило
1	ЕСЛИ $(U(1) \text{ И } Z(9))/w_{11}$ И $(U(2) \text{ И } Z(10))/w_{12}$ , ТО $V(1)$
2	ЕСЛИ $(U(1) \text{ И } Z(9))/w_{21}$ , ТО $V(2)$
3	ЕСЛИ $Z(5)/w_{31}$ И $Z(6)/w_{32}$ И $(U(2) \text{ И } Z(10))/w_{33}$ , ТО $V(3)$
4	ЕСЛИ $(U(5) \text{ И } Z(13))/w_{41}$ , ТО $V(4)$
5	ЕСЛИ $Z(1)/w_{51}$ И $(U(3) \text{ И } Z(11))/w_{52}$ , ТО $V(5)$
6	ЕСЛИ $Z(1)/w_{61}$ И $(U(4) \text{ И } Z(12))/w_{62}$ , ТО $V(6)$
7	ЕСЛИ $Z(2)/w_{71}$ И $Z(3)/w_{72}$ И $Z(4)/w_{73}$ И $Z(6)/w_{74}$ И $(U(4) \text{ И } Z(12))/w_{75}$ , ТО $V(7)$
8	ЕСЛИ $Z(7)/w_{81}$ И $Z(8)/w_{82}$ , ТО $V(8)$

Множества  $U$ ,  $Z$  и  $V$  см. таблицу 5.

Таблица А.5 – параметрическая матрица  $P_g$ 

$i \backslash j$	1	2	3	4	5
1	4,9268	3,0321	-	-	-
2	4,9726	-	-	-	-
3	3,9198	3,9145	3,9422	-	-
4	4,8130	-	-	-	-
5	2,9175	4,9679	-	-	-
6	5,0000	2,0732	-	-	-
7	5,0000	4,0000	3,9999	2,9757	2,9870
8	4,9268	3,1827	-	-	-

Таблица А.6 – рекомендации по устранению причин образования опасных микродефектов

Причина микродефектов	Рекомендации
эластическая турбулентность	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. уменьшить скорость движения заготовки в экструдере;</li> <li>2. применять матрицы с малым углом входа;</li> <li>3. увеличить температуру расплава.</li> </ol>
эластическое восстановление	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. уменьшить скорость движения заготовки в экструдере;</li> <li>2. уменьшить температуру расплава;</li> <li>3. увеличить температуру расплава, сделав при этом процесс охлаждения более плавным, чтобы внутренние напряжения не реализовались впоследствии при нагревании изоляции;</li> <li>4. увеличение длины формирующей части.</li> </ol>
усадка	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. уменьшить температуру расплава;</li> <li>2. сделать более плавным процесс охлаждения;</li> <li>3. уменьшить натяжение заготовки.</li> </ol>
трение в матрице	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. уменьшить скорость движения заготовки в экструдере;</li> <li>2. уменьшить температуру расплава;</li> <li>3. применять матрицы с малым углом входа.</li> </ol>
высокое содержание примесей в сырье	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. проверить герметичность упаковки и условия хранения;</li> <li>2. исключить попадание пыли и примесей при загрузке сырья в экструдер;</li> <li>3. удаление заводской упаковки производить перед непосредственной подачей сырья в экструдер;</li> <li>4. исключить образование в головке экструдера зон, где перерабатываемый материал может застаиваться, перегреваться и разлагаться;</li> <li>5. удалить возможные загрязнения с поверхности заготовки;</li> <li>6. сменить производителя сырья.</li> </ol>
высокое содержание влаги в сырье	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. увеличить время сушки сырья перед использованием;</li> <li>2. выдерживать сырьё при температуре производственного помещения не менее 12 часов для предотвращения конденсации влаги.</li> </ol>
продукты химических реакций	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. увеличить или уменьшить время процесса сшивки;</li> <li>2. проверить соблюдение технологических режимов процесса сшивки;</li> <li>3. исключить образование в головке экструдера зон, где перерабатываемый материал может застаиваться, перегреваться и разлагаться;</li> <li>4. сменить производителя сырья.</li> </ol>
поверхностные дефекты экрана	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. уменьшить скорость движения заготовки в экструдере при наложении экрана;</li> <li>2. применять матрицы с малым углом входа;</li> <li>3. увеличить температуру экструдата экрана.</li> </ol>

## Приложение Б. Результаты экспериментальных исследований

Таблица Б.1 – данные диагностики и полезности режимов функционирования технологического процесса

№	СППР	$N_d$ (эксп.)	$N$ (эксп.)	$P$ (м/мин)	$A$ , о.е.
1	нет	2	1	10,5377	0,7338
2	нет	2	1	11,8339	0,5221
3	нет	1	2	7,7412	0,6566
4	нет	1	3	10,8622	0,4311
5	нет	1	2	10,3188	0,5977
6	нет	2	2	8,6923	0,6882
7	нет	1	3	9,5664	0,4454
8	нет	1	2	10,3426	0,6003
9	нет	1	2	13,5784	0,7551
10	нет	2	3	12,7694	0,2235
11	нет	2	2	8,6501	0,4880
12	нет	2	4	13,0349	0,3311
13	нет	1	3	10,7254	0,4809
14	нет	2	2	9,9369	0,6122
15	нет	2	3	10,7147	0,6711
16	нет	2	3	9,7950	0,5407
17	нет	2	4	9,8759	0,2880
18	нет	3	1	11,4897	0,7020
19	нет	2	4	11,4090	0,2310
20	нет	2	1	11,4172	0,4790
21	нет	3	2	10,6715	0,5112
22	нет	1	2	8,7925	0,6105
23	нет	1	1	10,7172	0,8903
24	нет	4	2	11,6302	0,7500
25	нет	2	3	10,4889	0,3802
26	нет	1	2	11,0347	0,5229
27	нет	1	3	10,7269	0,3891
28	нет	1	2	9,6966	0,5088
29	нет	2	2	10,2939	0,6572
30	нет	2	1	9,2127	0,8044
31	нет	1	2	10,8884	0,3711
32	нет	1	3	8,8529	0,3258
33	нет	1	2	8,9311	0,4890
34	нет	2	2	9,1905	0,6911
35	нет	2	3	7,0557	0,6671
36	нет	1	3	11,4384	0,2170
37	нет	1	1	10,3252	0,6900
38	нет	1	2	9,2451	0,6882
39	нет	2	2	11,3703	0,7455
40	нет	2	1	8,2885	0,7902

## Продолжение таблицы Б.1

№	СППР	<i>N</i> <sub>d</sub> (эксп.)	<i>N</i> (эксп.)	<i>P</i> (м/мин)	<i>A</i> , о.е.
41	нет	2	3	9,8978	0,4651
42	нет	2	2	9,7586	0,6410
43	нет	3	3	10,3192	0,4815
44	нет	2	2	10,3129	0,8105
45	да	1	2	9,449826	0,6889
46	да	2	3	12,16037	0,7800
47	да	1	2	11,86658	0,6395
48	да	1	2	11,54352	0,7120
49	да	2	2	9,766219	0,6822
50	да	1	2	12,96574	0,6809
51	да	1	3	11,95523	0,8552
52	да	1	2	11,11121	0,7600
53	да	1	2	11,52976	0,9200
54	да	1	2	11,15941	0,6355
55	да	1	2	9,224724	0,6281
56	да	1	3	11,12865	0,5280
57	да	1	2	10,41922	0,6500
58	да	1	3	10,22703	0,5490
59	да	1	3	9,996678	0,7731
60	да	1	3	10,80638	0,8851
61	да	2	2	8,896574	0,9547
62	да	2	3	12,7535	0,3622
63	да	1	3	12,17608	0,6210
64	да	1	4	11,47396	0,2488
65	да	1	3	11,4548	0,5229
66	да	1	2	10,46239	0,5775
67	да	1	3	12,82429	0,8050
68	да	3	3	11,32682	0,6287
69	да	1	2	10,57111	0,7431
70	да	1	3	13,2568	0,8224
71	да	1	2	11,2078	0,6367
72	да	1	3	10,73426	0,3839
73	да	1	3	11,11812	0,5491
74	да	2	3	10,3977	0,8915
75	да	2	2	10,04383	0,7733
76	да	1	3	14,7838	0,6280
77	да	1	3	13,65215	0,9145
78	да	1	3	11,8998	0,5387
79	да	1	3	9,865746	0,6943
80	да	2	3	10,37489	0,3487
81	да	2	2	11,27051	0,6877
82	да	1	3	12,52884	0,6581
83	да	1	3	9,768394	0,7122
84	да	1	2	8,471173	0,6943
85	да	2	2	9,616174	0,3570

## Продолжение таблицы Б.1

№	СППР	$Nd$ (эксп.)	$N$ (эксп.)	$P$ (м/мин)	$A$ , о.е.
86	да	2	3	11,93356	0,2501
87	да	2	3	12,00876	0,3309
88	да	1	2	12,08718	0,7121

Расшифровка обозначений столбцов:

$Nd$  – число экспериментов, потребовавшихся для диагностики причин образования опасных микродефектов,

$N$  – число экспериментов, потребовавшихся для адаптации ТП,

$P$  – производительность ТП в результате адаптации,

$A$  – полезность состояния (режима функционирования) ТП.

Таблица Б.2 – данные измерения частичных разрядов

№	Величина частичных разрядов $Q_1$ , пикокулоны	Величина частичных разрядов $Q_2$ , пикокулоны	Вероятность наложения импульсов $p$	Вероятность ошибки обнаружения $P_e$
1	6,8432	6,6212	0,5346	0,0836
2	6,4330	6,2880	0,5608	0,1082
3	7,5200	7,5200	0,8986	0,3854
4	7,8814	7,3365	0,6445	0,1715
5	14,3650	12,2542	0,4138	0,0945
6	10,6561	8,4508	0,5797	0,0922
7	9,8874	8,2670	0,5516	0,1361
8	9,2540	9,1943	0,7487	0,2251
9	6,5581	6,3642	0,7715	0,2933
10	6,8020	6,8020	0,8224	0,2865
11	10,4322	8,6808	0,5735	0,1117
12	10,2520	8,3652	0,5272	0,0834
13	7,5640	4,8990	0,4875	0,0891
14	7,8820	5,6543	0,4698	0,0892
15	8,6534	6,7522	0,4987	0,0925
16	5,4370	5,2821	0,7465	0,2637
17	4,2270	4,0125	0,7124	0,2891
18	4,6578	4,6578	0,8346	0,3177
19	5,2479	4,9488	0,6697	0,2472
20	6,8660	6,5211	0,6754	0,2598
21	8,1472	5,3548	0,3854	0,0641
22	9,0579	7,8422	0,4436	0,0935
23	6,2698	5,5540	0,6912	0,2892
24	9,1337	8,9856	0,7521	0,2743
25	6,3235	6,2581	0,6846	0,2869

## Продолжение таблицы Б.2

№	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_1$ , пикокулоны	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_2$ , пикокулоны	Вероятность наложения импульсов $\bar{p}$	Вероятность ошибки обнаружения $\bar{P}_e$
26	3,9754	3,5425	0,3615	0,0425
27	8,7849	7,8782	0,5518	0,1043
28	7,4688	7,2233	0,5492	0,0986
29	9,5750	7,5482	0,6163	0,1461
30	12,6488	11,6528	0,7247	0,3017
31	10,5761	10,1120	0,7385	0,2913
32	9,7059	9,7059	0,8862	0,3522
33	9,5716	8,8250	0,6414	0,2241
34	5,8537	4,1540	0,6681	0,2833
35	8,0028	6,5487	0,4885	0,0844
36	6,4188	6,2411	0,6129	0,1849
37	4,2176	3,8990	0,4536	0,0916
38	9,1573	6,7905	0,3352	0,0418
39	7,9220	6,7765	0,6342	0,2047
40	9,5949	7,9893	0,5913	0,2058
41	6,5574	5,6780	0,4673	0,0813
42	5,3571	4,2423	0,3568	0,0573
43	8,4912	8,1258	0,7687	0,2923
44	9,3399	9,3399	0,7951	0,3763
45	6,7873	5,2541	0,3384	0,0473
46	7,5774	6,7900	0,4913	0,0828
47	7,4313	7,2552	0,6845	0,2792
48	7,9222	7,6385	0,6732	0,2765
49	6,5547	5,3825	0,3916	0,0828
50	5,7118	4,6588	0,4987	0,0914
51	7,0604	5,2889	0,5163	0,1049
52	5,3183	4,8638	0,6977	0,2983
53	6,7692	6,5421	0,7338	0,3044
54	5,4617	4,2248	0,4875	0,0812
55	5,9713	5,9713	0,7831	0,3014
56	8,2345	8,2345	0,7547	0,3198
57	6,9482	6,2242	0,4865	0,0934
58	3,1709	2,2528	0,3985	0,0766
59	9,5022	7,7541	0,5277	0,0992
60	5,3444	5,3444	0,8283	0,3296
61	4,3874	4,1567	0,7541	0,2764
62	4,8155	4,8155	0,7753	0,2793
63	7,6551	7,6551	0,8126	0,2966
64	7,9519	7,3456	0,6535	0,1811
65	5,8687	4,5621	0,6408	0,1935
66	5,8976	4,0112	0,3697	0,0429
67	4,4558	4,4558	0,8536	0,3615
68	6,4631	6,3325	0,7168	0,2614
69	7,0936	7,0936	0,7780	0,3071

## Продолжение таблицы Б.2

№	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_1$ , пикокулоны	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_2$ , пикокулоны	Вероятность наложения импульсов $\bar{p}$	Вероятность ошибки обнаружения $\bar{P}_e$
70	7,5468	6,4822	0,4639	0,0917
71	5,7602	4,1442	0,3732	0,0722
72	6,7970	5,8872	0,5414	0,1159
73	6,5509	6,4548	0,6873	0,2845
74	5,6261	5,6261	0,8923	0,3654
75	5,1899	5,1248	0,7451	0,2973
76	5,9836	4,2354	0,4547	0,0918
77	9,5974	7,4326	0,5921	0,1869
78	5,4038	4,6581	0,6659	0,2439
79	5,8526	4,2512	0,6575	0,2591
80	5,2381	5,1650	0,7444	0,2631
81	7,5126	6,4825	0,4503	0,0877
82	5,5509	4,5671	0,3968	0,0768
83	5,0595	4,7632	0,5985	0,2111
84	6,9907	6,6758	0,5841	0,2155
85	8,9090	8,2235	0,6126	0,2348
86	9,5929	8,7792	0,6223	0,2397
87	5,4721	4,2242	0,4552	0,0722
88	5,3862	4,682	0,3508	0,0493
89	5,4929	5,2358	0,7579	0,3150
90	5,5750	5,5750	0,7854	0,3165
91	8,4071	6,6587	0,3828	0,0527
92	5,5428	4,7715	0,4993	0,0714
93	8,1428	7,1166	0,4935	0,0834
94	5,4352	4,3658	0,4769	0,0738
95	9,2926	7,8822	0,5805	0,1492
96	5,4998	4,1845	0,5524	0,1219
97	5,9659	5,2721	0,3976	0,0774
98	5,5108	5,5108	0,7995	0,3271
99	6,1604	6,1325	0,7776	0,2715
100	4,7328	4,1377	0,4220	0,0896
101	4,2199	3,9565	0,6741	0,2436
102	9,9699	9,9699	0,8535	0,3532
103	7,0231	5,2832	0,3938	0,0645
104	6,5966	5,1211	0,4182	0,0794
105	11,0063	10,8767	0,6701	0,2436
106	3,4300	3,4300	0,8116	0,3465
107	9,0864	9,0864	0,8154	0,3592
108	9,0447	9,0447	0,8387	0,3228
109	4,5653	3,8782	0,5735	0,1217
110	6,8138	5,2561	0,3846	0,0655
111	5,9102	4,2871	0,3622	0,0411
112	5,6474	4,1511	0,3788	0,0422
113	6,3695	5,2788	0,4504	0,0838

## Продолжение таблицы Б.2

№	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_1$ , пикокулоны	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_2$ , пикокулоны	Вероятность наложения импульсов $\bar{p}$	Вероятность ошибки обнаружения $\bar{P}_e$
114	9,3500	7,8851	0,5976	0,1917
115	11,2081	10,9364	0,6982	0,2765
116	5,5588	5,4718	0,7163	0,2834
117	6,82588	6,7228	0,7171	0,2577
118	5,6326	5,1224	0,6542	0,2161
119	5,1428	4,9936	0,7289	0,2596
120	4,0454	4,0454	0,8613	0,3371
121	5,9461	5,7785	0,4845	0,1012
122	9,5314	8,2681	0,5562	1,1179
123	4,7345	4,2123	0,4931	0,0933
124	6,3423	5,6512	0,3276	0,0417
125	5,9877	5,3125	0,6648	0,2273
126	7,2237	6,6925	0,6203	0,2254
127	5,1556	4,6817	0,5465	0,1168
128	7,8489	7,8489	0,7931	0,2936
129	8,2705	8,1328	0,7519	0,2844
130	8,9778	7,4598	0,4101	0,0692
131	5,4064	5,4064	0,8937	0,3675
132	5,0058	5,0058	0,8246	0,3412
133	5,7477	5,0685	0,3825	0,0578
134	10,9600	10,9600	0,7634	0,2644
135	5,8285	4,7135	0,4367	0,0721
136	9,9098	9,9098	0,8812	0,3429
137	6,4601	6,4601	0,8458	0,3318
138	11,9536	9,2514	0,3989	0,0725
139	5,9381	5,4375	0,5474	0,0956
140	5,3121	4,9211	0,6252	0,1937
141	5,2798	4,3267	0,6169	0,1855
142	11,5427	11,4921	0,7173	0,2642
143	5,0556	4,6217	0,5849	0,1137
144	9,2989	9,1817	0,7160	0,2688
145	9,8076	9,8076	0,7858	0,2854
146	10,4243	9,1622	0,6133	0,1711
147	5,0132	4,4567	0,6945	0,2519
148	4,7973	4,4822	0,5278	0,0956
149	5,1184	4,3421	0,5504	0,0943
150	9,6008	7,1285	0,3955	0,0576
151	5,1769	5,0347	0,7732	0,2841
152	10,9277	10,8416	0,7481	0,2736
153	5,1821	4,2536	0,4649	0,7411
154	5,1656	4,3711	0,4652	0,8291
155	5,7464	4,5286	0,4816	0,0695
156	5,6328	5,5824	0,7583	0,2958
157	10,4315	10,4315	0,8929	0,3745

## Продолжение таблицы Б.2

№	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_1$ , пикокулоны	Величина частичных разрядов $\bar{Q}_2$ , пикокулоны	Вероятность наложения импульсов $\bar{p}$	Вероятность ошибки обнаружения $\bar{P}_e$
158	6,9564	6,9564	0,8304	0,3467
159	6,5983	6,5983	0,8263	0,3389
160	5,7394	5,1739	0,3925	0,0665
161	10,2363	9,3621	0,6486	0,2124
162	7,4646	6,2544	0,3892	0,0644
163	4,2114	3,6875	0,5713	0,1254
164	6,1589	5,3428	0,6356	0,2056
165	4,8216	4,1725	0,6904	0,2733
166	5,4387	4,6282	0,6572	0,2641
167	7,6560	7,6560	0,8837	0,3698
168	9,4367	7,7355	0,5737	0,1371
169	8,0921	7,2887	0,6652	0,2418
170	8,6577	8,6577	0,8206	0,3192
171	12,6560	10,3924	0,5681	0,1066

## Приложение В. Акты внедрения результатов диссертационного исследования

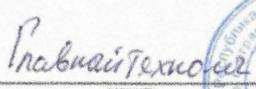


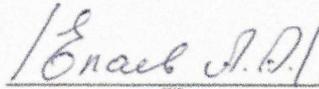
*\*Зб\* 10 2020 № 1747-е*

### АКТ

**внедрения результатов кандидатской диссертационной работы  
Моногарова Олега Игоревича  
«Повышение эффективности производства кабельной продукции  
на основе управления с использованием экспертных подходов»**

Результаты диссертационного исследования Моногарова О.И. на тему «Повышение эффективности производства кабельной продукции на основе управления с использованием экспертных подходов» были внедрены и использованы на предприятии ООО «Сарансккабель» в технологическом процессе производства кабельной продукции. При этом была успешно использована разработанная Моногаровым О.И. система поддержки принятия решений, оказывающая помощь в диагностике причин образования опасных микродефектов в кабельной изоляции и определении оптимальных значений параметров регулирования технологического процесса, а также алгоритм селекции сигналов частичных разрядов, позволяющий повысить точность измерения импульсов частичных разрядов в кабельной изоляции.

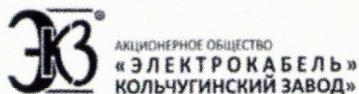




Должность
Подпись
ФИО



НА ПРЕДПРИЯТИИ ФУНКЦИОНИРУЕТ ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ ТРЕБОВАНИЯМ  
ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (ISO 9001:2015), ГОСТ Р ИСО 14001-2016 (ISO 14001:2015), ГОСТ Р 54934-2012/OHSAS18001:2007



Акционерное общество  
«Электрокабель» Кольчугинский завод»  
601785, Россия, Владимирская область,  
г. Кольчугино, ул. К. Маркса, д. 3  
тел.: (49245) 95333, факс: (49245) 95353  
E-mail: ekz@elcable.ru  
http://www.elcable.ru  
ОКПО 21059747, ОГРН 1023300711774  
ИНН/КПП 3306007697/330250001

26.05.16 № 18-6-119

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

#### о внедрении результатов диссертационного исследования Моногарова Олега Игоревича

Результаты диссертационного исследования Моногарова О.И. на тему "Повышение эффективности производства кабельной продукции на основе управления с использованием экспертных подходов" были внедрены и использованы на предприятии АО "Электрокабель "Кольчугинский завод" в технологическом процессе производства кабельной продукции. При этом было успешно использовано разработанное Моногаровым О.И. программное обеспечение, новизна которого заключается в применении оригинального математического метода селекции сигналов частичных разрядов. Подтверждаю эффективность и применимость данной системы.

Заместитель директора по  
качеству АО «ЭКЗ»

должность



подпись

Катков Игорь Вадимович

ФИО



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Владимирский государственный университет имени Александра  
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по образовательной  
деятельности



И.М.А. Панфилов

«19» марта 2021 г.

**Акт внедрения  
в учебный процесс результатов диссертационной работы  
Моногарова Олега Игоревича на тему:  
«Повышение эффективности производства кабельной  
продукции на основе управления с использованием  
экспертных подходов»**

Научные результаты, полученные в диссертации Моногарова О.И., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)», в частности: модель машины нечёткого логического вывода, алгоритм оценки вероятностей альтернативных исходов в управлении режимами функционирования технологического процесса и алгоритм селекции импульсов частичных разрядов, используются на кафедре «Информационных систем и программной инженерии» при проведении занятий по дисциплинам «Моделирование систем», «Методы анализа данных» и «Интеллектуальные системы и технологии», а также в дипломном проектировании.

Зав. кафедрой ИСПИ ВлГУ  
д.т.н., профессор

И.Е. Жигалов

# Приложение Г. Свидетельства о государственной регистрации программ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020615483

Программа поддержки принятия решений «SDS for Quality Control System»

Правообладатель: *Моногаров Олег Игоревич (RU)*

Автор: *Моногаров Олег Игоревич (RU)*



Заявка № 2020614549

Дата поступления 28 апреля 2020 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 25 мая 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018614637

Программа для селекции сигналов частичных разрядов  
«PDSector»Правообладатель: *Моногаров Олег Игоревич (RU)*Автор: *Моногаров Олег Игоревич (RU)*

Заявка № 2018611522

Дата поступления 16 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 апреля 2018 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности Г.П. Ивлиев