

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Уфимский государственный нефтяной технический университет»

*На правах рукописи*



**НОВИКОВА ФРЕЙРЕ ШАВИЕР ЖЕССИАНЕ ДА КОНСЕЙСАУ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Специальность 2.10.1. – «Пожарная безопасность» (технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Хафизов Фаниль Шамильевич

Уфа – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ВОПРОС ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ ПРИ НЕИСПРАВНОСТЯХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ.....	11
1.1 Анализ аварийных ситуаций на предприятиях нефтегазовой отрасли из-за выхода из строя кабельных линий 6-35 кВ.....	11
1.2 Особенности условий эксплуатации и ремонта кабельных линий 6-35 кВ нефтегазовых производств.....	15
1.3 Повреждения кабельных линий 6-35 кВ, причины их возникновения и развития на предприятиях нефтегазовой отрасли.....	19
1.4 Нормативно-техническая документация, регламентирующая безопасную эксплуатацию и способы оценки состояния кабельных линий 6-35 кВ.....	24
1.5 Обзор современных методов обеспечения пожарной безопасности посредством оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ.....	27
Выводы по главе.....	32
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ.....	33
2.1 Основные требования к диагностике, необходимые для обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	33
2.2 Принципы формирования информативных параметров диагностирования, влияющих на безопасную эксплуатацию кабелей.....	35
2.3 Методы оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ с целью их дальнейшей безопасной эксплуатации.....	37
2.3.1 Метрические методы оценки технического состояния и безопасности кабельных линий напряжением 6-35 кВ.....	38
2.3.2 Статистические методы оценки технического состояния и безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	39
2.3.3 Методы динамической оценки технического состояния и безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	40
2.3.4 Методы нейронных сетей в задачах оценки технического состояния и безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	43
2.4 Разработка ключевых этапов исследований кабельных линий 6-35 кВ.....	46

Выводы по главе.....	48
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ.....	49
3.1 Разработка методики экспериментальных исследований.....	49
3.2 Разработка экспериментальной установки.....	52
3.3 Метрологическое обеспечение измерений.....	55
3.4 Исследование с помощью разработанного метода комбинированной диагностики для обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	63
3.5 Обработка и анализ полученных экспериментальных данных.....	74
3.6 Исследование кабельных линий 6-35 кВ с целью проверки их соответствия требованиям пожарной безопасности.....	83
Выводы по главе.....	85
ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ.....	87
4.1 Формирование интегрального критерия безопасности на основе применения комбинированной диагностики.....	87
4.2 Программно-аппаратного комплекса для реализации разработанного метода оценки технического состояния и обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	92
4.3 Рекомендации по применению разработанного метода обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ.....	100
4.4 Обеспечение требований безопасности и иных технических мероприятий во время применения разработанного метода комбинированной диагностики.....	102
4.5 Эффективность от внедрения комбинированной диагностики КЛ 6-35 кВ и её роль в повышении безопасности на предприятиях нефтегазовой отрасли.....	103
Выводы по главе.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	136

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы**

Кабельные линии 6-35 кВ являются важным звеном как в передаче, так и в распределении электроэнергии на предприятиях нефтегазовой отрасли. Их техническое состояние во многом определяет непрерывность, надежность и безопасность электроснабжения объектов технологических процессов. Отказы кабельных линий 6-35 кВ на нефтегазовых объектах опасны тем, что зачастую приводят к взрывам и пожарам, которые в свою очередь влекут нарушение технологического процесса и даже к его остановке, а это как следствие приводит к экономическому и экологическому ущербу.

Известно, что на промышленных предприятиях большая часть всех аварий приходится на кабельные линии, что значительно выше, нежели у других объектов. Данный факт свидетельствует о малой эффективности используемых методов оценки состояния данных объектов, которые регламентированы нормативными документами.

Особое внимание уделяется высоковольтным линиям. На сегодняшний день методы оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ либо основаны на опознавании параметров ранее развившихся повреждений, либо являются методами косвенно разрушающие изоляцию. Например, из-за угрозы пробоя изоляции испытание повышенным выпрямленным напряжением, применяемое сегодня, приводит к уменьшению времени работы кабельных линий. Поэтому определение технического состояния с исключением пробоев и прожигания изоляций кабелей, а также с наибольшей точностью и минимальными затратами времени считается приоритетной и экономически обоснованной задачей.

В последнее время существенный интерес уделяется исследованию и применению на практике неразрушающих методов, которые основаны на технической диагностике параметров объекта. Но при этом учитываются только некоторые электрические параметры кабельных линий, например, напряжение,

сопротивление изоляции. Информативная возможность диагностики в данном случае реализуется не в полной мере.

В связи с изложенным выше, является перспективной разработка метода оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ, основанного на комбинированной диагностики. Данный метод характеризуется совокупностью параметров, что позволяет дать интегральную оценку фактического технического состояния исследуемого объекта, которая бы значительно повысила безопасность кабельных линий на объектах нефтегазовой отрасли за счет наиболее достоверной и точной информации.

### **Степень разработанности выбранной темы**

В отечественных также зарубежных периодических изданиях, монографиях и публикациях затрагиваются вопросы исследования и выявления параметров, влияющих на техническое состояние электрооборудования и соответственно влияющих на их безопасную эксплуатацию. Этой проблеме посвящены работы таких ученых и исследователей, как: R. Bayir, Р. Н. Бахтизин, Г. И. Смелков, М. К. Каменский, М. Г. Баширов, И. А. Биргер, S. Altug, Д. А. Заварихин, И. Р. Кузеев, В. В. Болотин, И. В. Прахов, И. В. Давиденко, А. В. Самородов, И. С. Миронова, Р. Р. Тляшева и ряда других авторов.

Невзирая на достижения и большой вклад в науку перечисленных выше ученых ими не была рассмотрена возможность комплексной оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ с применением комбинированной диагностики, основанной на интегральном критерии, учитывающий электрические параметры объекта, срок и условия его эксплуатации, а также показатель безопасности. В этой связи обеспечение безопасности кабельных линий 6-35 кВ на объектах нефтегазовой отрасли с использованием комбинированной диагностики, является актуальной задачей, решение которой позволит предотвратить и избежать аварийные ситуации на предприятиях.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы полностью отвечает **пункту 12** условиям паспорта специальности 2.10.1. – «Пожарная безопасность (технические

науки)»: «Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов».

**Целью работы** является разработка комбинированного метода диагностики, основанного на многопараметровой динамической оценке технического состояния, представленной в виде интегрального критерия, для обеспечения безопасности эксплуатации кабельных линий 6-35 кВ.

С целью осуществления заданной цели диссертационной работы поставлены и решены соответствующие **основные задачи**:

1 Анализ состояния проблемы на предприятиях нефтегазовой отрасли в обеспечении кабельных линий 6-35 кВ безопасной эксплуатации.

2 Предложение и научное обоснование применимости комбинированной диагностики для достоверной оценки фактического технического состояния кабельных линий 6-35 кВ.

3 Экспериментальные исследования с целью нахождения взаимосвязанных диагностических параметров для оценки технического состояния и обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ, изучение закономерностей взаимосвязи этих диагностических параметров с определенными повреждениями и дефектами.

4 Формирование интегрального критерия, который позволит осуществлять достоверную количественную оценку фактического технического состояния кабельных линий 6-35 кВ.

5 Разработка программно-аппаратного комплекса для применения метода комбинированной диагностики на основе искусственных нейронных сетей, которая формирует интегральный критерий безопасности.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются кабельные линии напряжением 6-35 кВ на предприятиях нефтегазовой отрасли.

Предметом исследования – фактическое техническое состояние кабельных линий, влияющее на пожарную безопасность объектов нефтегазовой отрасли.

### **Научная новизна**

1 Впервые разработана математическая модель формирования интегрального критерия безопасности для кабельных линий напряжением 6-35 кВ с помощью

применения искусственной нейронной сети, учитывающей полученные значения диагностических параметров. Выведен интегральный критерий безопасности, значения которого поделены на четыре группы. Каждая группа имеет свой числовой промежуток и соответствует состоянию данного объекта: «отличное», «хорошее», «удовлетворительное», «очень плохое».

2 Предложен, научно обоснован метод комбинированной диагностики с целью обеспечения пожарной безопасности кабельных линий 6-35 кВ, основанный на многопараметровой динамической оценке их технического состояния в процессе эксплуатации. И предложен программно-аппаратный комплекс для реализации данного метода.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость диссертации состоит в исследовании и выявлении информативных параметров диагностирования, которые отражают изменения технического состояния кабельных линий 6-35 кВ в процессе их эксплуатации; разработке и научном обосновании нового способа обеспечения безопасности объекта на основе комбинированной диагностики; создании программы, которая использована при разработке интегрального критерия безопасности.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1 Разработан способ оценки технического состояния кабельной линии (патент РФ на изобретение № 2729173).

2 Основные полученные результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Уфе при проведении лабораторных занятий для студентов, обучающихся по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» с целью формирования базы знаний по обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях (Справка № 90-19/25 от 13.03.2023 г.).

3 Разработанный комбинированный метод диагностики технического состояния кабельных линий напряжением 6-35 кВ с целью обеспечения их безопасной эксплуатации принят к рассмотрению для внедрения на предприятии АО «Салаватнефтемаш» (Справка от 09.02.2023 г.), также в ООО «Акрил Салават»

для практического применения математической модели формирования критерия безопасности на основе данного метода (Справка от 10.02.2023 г.).

### **Методология и методы исследования**

Методология заключалась в анализе и обработке статистических данных по аварийным ситуациям на предприятиях нефтегазовой отрасли; изучении причин повреждений кабельных линий 6-35 кВ; выявлении теоретических положений и эмпирических закономерностей по диагностическим параметрам для оценки технического состояния исследуемого объекта.

Поставленные задачи в диссертационной работе решались аналитически и экспериментально с применением методов системного анализа и синтеза, теории вероятности. Проведение экспериментальных исследований основывались на методе неразрушающего контроля, где использовались образцы кабелей, на которых проводились измерения параметров и характеристик, затем применялся метод статистической обработки полученных данных, позволивший выявить математические зависимости.

Использование лепестковой диаграммы позволило визуализировать взаимосвязь технического состояния кабельных линий 6-35 кВ со значениями диагностических параметров. Благодаря современным компьютерным программам и разработанным алгоритмам, на основе нейронной сети, во время проведения исследования объекта был выведен интегральный критерий безопасности.

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

1 Разработанный метод комбинированной диагностики для обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ, основанный на оценке их фактического технического состояния.

2 Результаты экспериментально полученных и выявленных информативных диагностических параметров и их закономерности изменений в зависимости от характерных повреждений исследуемого объекта.

3 Научное обоснование применимости рекомендованного интегрального критерия безопасности, учитывающего значения всех важных характеристик и

диагностических параметров, также срок эксплуатации, в формате оценки степени безопасности кабельных линий 6-35 кВ.

4 Алгоритм обработки данных для идентификации дефектов, созданного на базе количественной оценки уровня поврежденности кабельных линий 6-35 кВ по значению интегрального критерия безопасности, и принцип работы программно-аппаратного комплекса для реализации предложенного метода, основанного на данном алгоритме.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Полученные результаты и итоги диссертационной работы и их достоверность обосновывается использованием только апробированных методов и методик для реализации экспериментальных исследований. Все проводимые эксперименты были обеспечены измерительным оборудованием, которое в обязательном порядке прошло поверку. Полученные данные были обработаны на технике ЭВМ с учетом теории ошибок и обработки результатов эксперимента, затем прошли сравнение с уже имеющимися результатами исследований ученых в научной литературе и нормативно-технической документацией, и только потом были выявлены и описаны математические закономерности и зависимости.

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.); Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технология. Производство – 2015» (г. Салават, 2015 г.); Международной научной конференции в Молодежной секции РНК СИГРЭ (г. Казань, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Федоровские чтения – 2015» (г. Москва, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» (г. Тамбов, 2016 г.); Международном интеллектуальном конкурсе студентов и аспирантов «Discovery Science: University – 2016» (г. Москва, 2016 г.); Всероссийском конкурсе студенческих идей «Шаг в будущее – 2017» (г. Салават, 2017 г.); Международной научно-технической конференции «Наука. Технология. Производство – 2017» (г. Салават, 2017 г.); II Международной научно-

практической конференции «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли» (г. Уфа, 2019 г.).

### **Публикации**

По тематике диссертационной работы опубликовано 19 научных трудов, в том числе 4 в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ по специальности, 1 статья – в базе данных научного цитирования Scopus. Получен 1 патент на способ.

Также была получена положительная рецензия на статью в журнале, рекомендованном ВАК РФ, от Управления государственного энергетического надзора (Ростехнадзора) (Письмо от 27.02.2020 исх. № БТП-12-20).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и заключения, списка использованной литературы из 157 наименований; изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 17 таблиц, 3 приложения.

Работа осуществлена при содействии и поддержке внутривузовского гранта для аспирантов, обучающихся по приоритетным направлениям подготовки ФГБОУ ВО УГНТУ согласно протокола № 1 от 28.02.2018 г. и приказа от 05.03.2018 г. № 232-1.

# ГЛАВА 1. ВОПРОС ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ ПРИ НЕИСПРАВНОСТЯХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ

## 1.1 Анализ аварийных ситуаций на предприятиях нефтегазовой отрасли из-за выхода из строя кабельных линий 6-35 кВ

Обеспечение надежной работы элементов систем электроснабжения является приоритетной задачей на предприятиях нефтегазовой отрасли, оно во многом определяет безопасность технологических процессов. Вещества и элементы, участвующие в данных технологических процессах, имеют высокую пожаро- и взрывоопасность, а серьезные повреждения элементов систем электроснабжения может привести к возникновению аварийных ситуаций, которые в последствие приводят к материальным убыткам и наносит вред экологии, а иногда даже приводит к летальным исходам [1–3].

На Рисунке 1.1 представлены главные угрозы, влекущие за собой опасные ситуации на нефтегазовых предприятиях, где пожары составляют 59 % от общего числа.

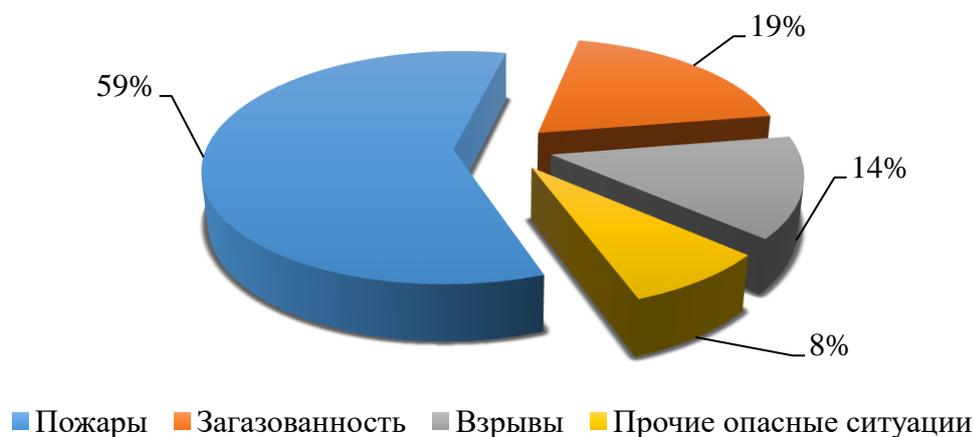


Рисунок 1.1 – Основные опасные ситуации на нефтегазовых предприятиях

Стоит учесть, что вышеперечисленные угрозы возникают в первую очередь из-за изношенности элементов систем электроснабжения, а также пренебрежения техникой безопасности [4]. В России и не только число аварий на нефтегазовых предприятиях очень высок и это неудивительно, так как основные элементы в электроэнергетике исчерпали свой ресурс.

Данные о пожарах с 2008 года ВНИИПО МЧС РФ (Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны) показывают то, что более пожароопасными считается кабельная продукция. В Таблице 1.1 представлены статистические сведения по пожарам, образовавшиеся от кабельных изделий. Расчет идет от общего количества всех электрооборудований.

Таблица 1.1 – Статистические данные по пожарам, которые возникли от кабельных изделий

Кабельная продукция			
Пожары, %	Прямой ущерб, %	Травмы, %	Погибло, %
67	54	44,5	30

Только лишь из-за кабельных линий 6-35 кВ часто происходят простои и аварийные отказы на промышленных предприятиях, это связано с их моральным и физическим износом. В соответствии со сведениями ПАО «ФСК ЕЭС» Россети (Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы по России) кабельные линии 6-35 кВ почти на 60 – 70 % морально и физически исчерпали себя по сравнению с другим электрооборудованием [5].

На Рисунке 1.2 показаны данные по аварийности электрооборудования за период времени с 2008 по 2019 гг. Кабельные линии 6-35 кВ имеют первое место по повреждениям и отказам – это примерно 63 % от общего числа аварийности электрооборудования. Затем 25 % занимают повреждения электродвигателей разных типов и классов напряжения. 8 % трансформаторов имеют неисправности, а остальные 4 % занимают другие разновидности неисправностей и поломок, которые никак не связаны с вышеперечисленными [5; 6].

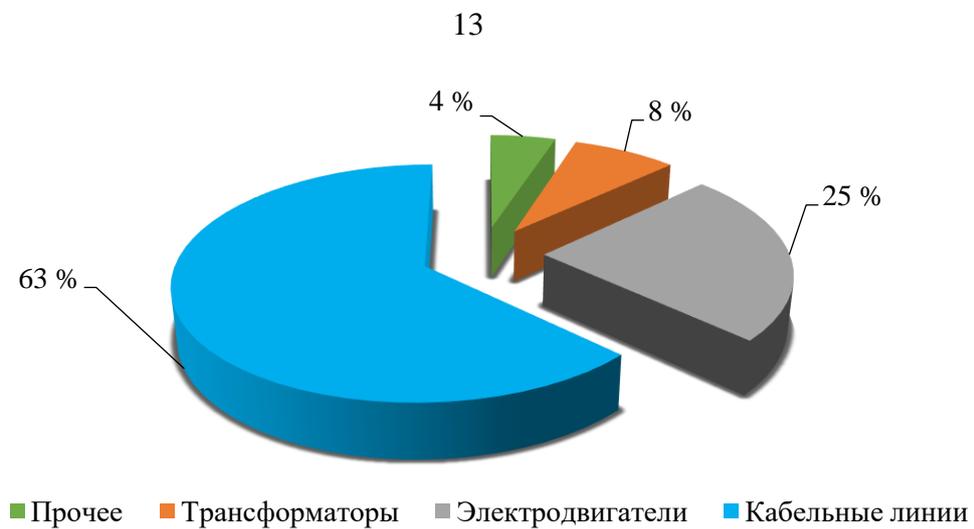


Рисунок 1.2 – Аварийность электрооборудования за период с 2008 по 2019 гг.

Проанализировав данные службы эксплуатации силовых кабельных линий ООО «Газпром нефтехим Салават» можно сделать вывод, что кабели подвержены различным пробоям. В 44 % пробой кабельных линий 6-35 кВ случается во время их эксплуатации под нагрузкой, в 36 % случаев – при испытании повышенным напряжением, а остальные 20 % приходятся на повреждения, связанные со вскрытием грунта, так, например, на ООО «Газпром нефтехим Салават» 17 % этих кабельных линий проложено в земле. Данные по пробоям кабельных линий (КЛ) напряжением 6-35 кВ [5] представлены на Рисунке 1.3 в виде диаграммы.

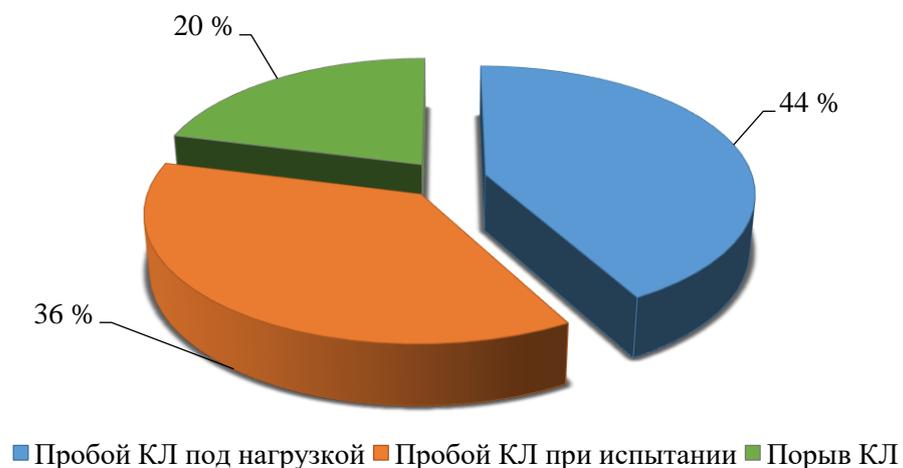


Рисунок 1.3 – Статистические данные пробоев кабельных линий 6-35 кВ

Практика показывает, что с 2013 года (Таблица 1.2) прослеживается интенсивный рост числа пробоев кабельных линий напряжением 6-35 кВ при испытаниях повышенным напряжением, которое проводится на предприятиях нефтегазовой отрасли, и даже после положительно пройденных испытаний кабели выходят из строя в ближайшее время [7].

Таблица 1.2 – Краткая статистика пробоев кабельных линий 6-35 кВ

Адрес кабельной линии	Дата	Тип пробоя	Тип кабеля
ТП МДОК - ВЛ 6кВ	23.03.2013	под нагрузкой	ААШв
РТП 56 - ТП АБК тр.1	24.03.2013	под нагрузкой	ААШв
КП 13 - КТП об. 778	01.04.2013	при испытании	АСБг
КП 14 - ТП 2Н	02.04.2013	под нагрузкой	ААШв
КП 13 - КТП Аллагуват	02.04.2013	при испытании	АСБг
РТП 85 - РТП 6	08.06.2013	под нагрузкой	ААШв
РТП 102 - СТЭЦ 80А	21.06.2013	под нагрузкой	АСБг
РТП 69 - НСТЭЦ 52Б	23.07.2013	при испытании	АСБг
РТП 22 - НСТЭЦ 18Б	13.08.2013	под нагрузкой	ААШв
КП 13 - НСТЭЦ 11А	13.08.2013	под нагрузкой	ААШв
РТП 41 - ГПП 5	11.09.2013	при испытании	ААШв
РТП 41 - ГПП 5	13.09.2013	при испытании	АСБг
КТП ГНС - ТП 32Б	24.09.2013	под нагрузкой	АСБг
ГПП 2 - ТП 67	17.10.2013	при испытании	АСБг
РТП 9 - АДЗ	18.04.2014	при испытании	КГЭ-ХЛ
РТП-1 яч.5 - КП-11 яч.12А	04.04.2014	при испытании	ААШв
РУ п/с Спутник яч.4 - КТП-ОС	24.06.2014	под нагрузкой	ААшв
РТП-13Н яч.23-27 - НСТЭЦ ф.3Б нитка Б	10.09.2014	при испытании	АСБг
РТП-67 яч.23 - КТП-112 тр.2	19.09.2014	при испытании	ААШв
РТП-13Н яч.23-27 - НСТЭЦ ф.3Б нитка А	10.09.2014	при испытании	АСБг
РТП-13Н яч.23-27 - НСТЭЦ ф.3Б нитка Б	07.11.2014	под нагрузкой	ААШв
РТП-66 яч.12 - НСТЭЦ ф.62А	27.01.2015	под нагрузкой	АСБг

продолжение Таблицы 1.2

Адрес кабельной линии	Дата	Тип пробоя	Тип кабеля
РТП-12 яч.30 - СТЭЦ яч.77	19.05.2015	при испытании	АСБг
РТП-67 яч.26 тр-р 2 - КТП-1533	02.06.2015	при испытании	ААШв
РТП-2 яч.3 - ГПП-3 яч.19	25.09.2015	при испытании	ААШв
ТП-М. Док тр-р	08.12.2015	под нагрузкой	ААШв
КП-1Н яч.11А - РТП-8Н яч.4	26.12.2015	под нагрузкой	АСБг
РТП-24 яч.10 - ТП-94 тр-р.2	26.12.2015	порыв	АСБг
РТП-8Н яч.4 - КП-1Н яч.11А	26.12.2015	под нагрузкой	АСБг
РТП-52 яч.7-СТЭЦ ф.18А	05.04.2016	при испытании	АСБг
РТП-86 яч.9 тр.1 - КНТП-ОС-222	06.04.2016	под нагрузкой	АСБг
РТП-21/16А-НСТЭЦ ф.20А нитка В	05.08.2016	под нагрузкой	ААШв
РТП-12/3-СТЭЦ ф.32	04.10.2016	порыв	ААШв
РТП-21/16А-НСТЭЦ ф.20А нитка Б	06.10.2016	под нагрузкой	ААШв

Анализ всех вышеописанных сведений и данных об отказах, авариях и о пожарах лишний раз подтвердили о необходимости безотказной и надежной работы кабельных линий 6-35 кВ. По этой причине одним из значимых вопросов, в соответствии с установленной концепцией об обеспечении надежности в электроэнергетике, считается увеличение срока надежной эксплуатации кабельных линий. Но данное возможно достичь за счет перехода на другой вид обслуживания электрооборудования – обслуживание по фактическому техническому состоянию. В результате этого можно добиться значительных экономических эффектов, поскольку уменьшится число аварий и простоев на нефтегазовых предприятиях, а в соответствии с этим в разы уменьшатся затраты на ремонт и устранение [8].

## **1.2 Особенности условий эксплуатации и ремонта кабельных линий 6-35 кВ нефтегазовых производств**

Во всем мире нефтегазовые производства обуславливаются наличием в своих технологических процессах различных опасных веществ, которые подвержены

горению и взрывам по причине повышенного давления и температуры. Поэтому данное производство характеризуется как объектом с высоким показателем риска возникновения чрезвычайных ситуаций [9].

Стабильность производственного процесса находится в прямой зависимости от надежной работы электропитания установок, так основная доля электропитания приходится на кабельные линии 6-35 кВ, которые часто подвержены повреждениям и отказам [4]. Несмотря на то, что предприятия нефтегазовой отрасли, согласно правил ПУЭ («Правила устройства электроустановок»), относятся к особой группе I категории электроприемников, что подразумевает нарушение электроснабжения только лишь на период переключения автоматического ввода резерва (АВР) либо быстродействующего АВР (БАВР), всё равно происходят аварийные ситуации, напрямую связанные с отказами КЛ 6-35 кВ, которые в свою очередь проложены от распределительной трансформаторной подстанции до технологического насоса, двигателя или иного оборудования. Так, рассматривая схему электроснабжения предприятия, влияние переключений на РТП на технологию вполне очевидно, если исходить из того, что на переключение на резервную линию уходит до трех секунд там, где не установлены БАВР, и с учетом, что на старых установках не имеются устройства самозапуска. Поэтому за время пока сработает АВР остановится часть сырьевых насосов, а часто бывает так, что резервный насос находится в ремонте и пуск резервного не возможен. А анализируя статистику аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли было обнаружено большое количество примеров ситуаций, когда происходило отключение нефтяных насосов, где причинами являлись пробой также короткое замыкание кабелей в отсеке РТП, а как результат – нарушение технологического процесса на время перехода на другой нефтяной насос [4]. Этому подтверждение является Таблица 1.2 и статистика, приведенная выше.

Кроме того, следует принимать во внимание тот факт, что по технологии при нарушении работы определенного оборудования происходит разгрузка всего оборудования до определенных значений, а далее уже после запуска резерва восстанавливаются номинальные параметры в соответствии с инструкциями, что тоже предполагает под собой затрату времени на переключение.

Резюмируя выше представленное, хочется отметить, что питание любой категории электроприемников желательно осуществлять по нормальной схеме, а ненормальная схема электроснабжения – это аварийная ситуация, которая повлечет за собой расследования, и восстанавливать главную линии придется, а это влечет за собой экономические затраты.

Далее рассматривая как устроены на предприятиях данные кабельные линии (КЛ), то можно выделить следующие основные моменты: ответвления сети [10; 11], которая характеризуется большим числом переходов, изгибов; немалое число соединений в виде муфт (Рисунок 1.4); перепады высот, различная высота (на Рисунке 1.5 представлена реальная фотография с промышленного предприятия), такое месторасположение усложняет обслуживание объекта [10].



Рисунок 1.4 – Соединение кабельных линий муфтами

Кроме того, существенную значимость имеет и метод прокладки КЛ, к примеру, будь то в трубе либо в траншее, либо под землей, либо иной способ [10]. Однако любой метод задает различные условия охлаждения КЛ, вследствие этого, различную пропускную способность, что прямо находится в зависимости от среды прокладки. Поэтому вполне возможно высокое тепловыделение, что влечет за собой перемену рабочей температуры КЛ, а это является не всегда допустимо [12].



Рисунок 1.5 – Расположение кабелей на предприятии

На нефтегазовых предприятиях кабельные линии 6-35 кВ эксплуатируются в характерных для данного производства условиях [13], которые сильно влияют на изоляцию. Эта среда характеризуется равно как пожароопасная и взрывоопасная, имеющая большие скачки температуры, вибрирование и иные механические воздействия, но самое опасное – это химическое воздействие на изоляцию из-за обладающих веществ в технологическом процессе, которые также приводят к изменению её качества, а, следовательно, и к дефектам, влекущим за собой отказ. Именно поэтому электроизоляционный использованный материал в КЛ портится, возникают электропроводящие зоны. Чтобы всё это избежать и не позволить дальнейших плохих последствий необходимо своевременное спецобслуживание и принятие мер, но с целью устранения уже возникших проблем – ремонт [14].

Что касательно кабелеремонтных работ, то на данный момент используется следующий сервис: согласно необходимости, обычно уже после произошедшего отказа; ППР (планово-предупредительный ремонт). Первый тип работ говорит сам за себя, но неожиданные отказы и поломки могут послужить причиной серьезных и непредвиденных результатов. Второй вид – ППР учитывает кабелеремонтные

работы, которые регламентированы, они и расписаны через предварительно поставленные интервалы времени и проводятся периодические в виде испытаний. Его достоинством считается только возможность составлять план расходов на осуществление ремонтов, однако недостатков гораздо больше, так как испытания никак не предоставляют абсолютную оценку ресурса линии и кроме того никак не исключены внезапные отказы [15–17].

Для непрерывного процесса и соответственно для избежание возможности появления аварийных обстановок используется резервирование КЛ, при этом их следует хотя бы на непродолжительное время включать в работу [18]. Ведь защищенность на предприятиях в значительной степени определяется правильной деятельностью объекта.

### 1.3 Повреждения кабельных линий 6-35 кВ, причины их возникновения и развития на предприятиях нефтегазовой отрасли

Существует много причин повреждений кабельных линий 6-35 кВ, но их все без исключения можно разбить на четыре основные группы, которые представлены на Рисунке 1.6 [19].

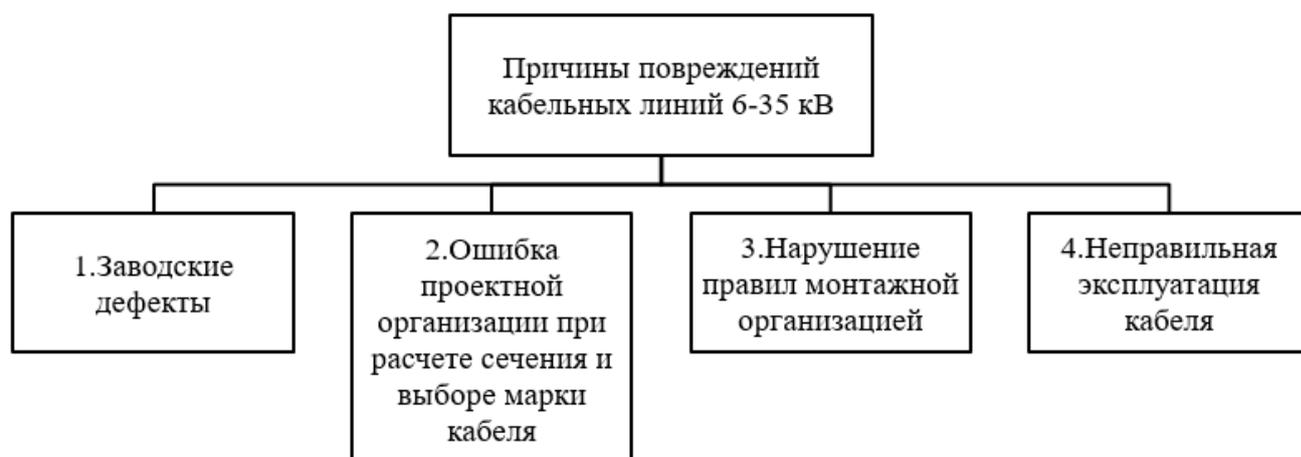


Рисунок 1.6 – Разновидности повреждений кабельных линий 6-35 кВ

Более детально рассмотрим четвертую группу, так как практика показывает то, что непосредственно наибольшее количество дефектов приходится на период эксплуатации (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Причины повреждений кабельных линий 6-35 кВ при эксплуатации

Некоторые повреждения, такие как механические, можно иногда обнаружить по внешнему виду, обычно при этом кабельные линии имеют некие изъяны на оплетке и металлической броне, чаще сделанной из стали, а в основных ситуациях портится сама изоляция. Данные повреждения имеют местный характер, что позволяет как можно быстрее устранить или отремонтировать испорченный дефектом участок и запустить его дальше в работу [19; 20].

Характер разрушения и протяженность испорченной длины кабеля часто находится в зависимости от воздействия на него вибраций или сотрясений, что приводит к межкристаллическому разрушению [21]. Оно характеризуется ростом кристаллов в материале оболочки, из которого она сделана, также утрате взаимосвязи между ними, тем самым на оболочке возникают сеточки небольших трещин. Это чревато тем, что в дальнейшем трещины возрастают и как следствие трескается слой оболочки. Этому в большей степени подвержены такие участки КЛ

на промышленных предприятиях, которые подводятся к агрегатам, имеющих высокую вибрацию [19].

Кроме того, нередким авариям подвергаются те участки КЛ, где существуют изломы, данное связано с прокладкой кабеля. На Рисунке 1.8 представлено фото пробоя силового кабеля среднего напряжения на месте его изгиба из-за которого произошло загорание в цехе предприятия [5; 8].



Рисунок 1.8 – Пробой силового кабеля среднего напряжения на месте изгиба

В наше время повышенное внимание уделяют на изоляцию КЛ, поскольку её пробой – это необратимое событие, которое приводит моментально к отказу. Таким образом отличают четыре самых важных вида нагрузки на неё, которые приводят к неисправностям:

- электрические;
- механические;

- тепловые;
- климатические (непосредственно влажность, находящаяся в окружающей среде) [22].

При этом электрические нагрузки возникают в большей части случаев, они считаются одними из трудно предсказуемыми. Кроме того, они имеют множество факторов появления, по этой причине их также классифицируют (Рисунок 1.9).

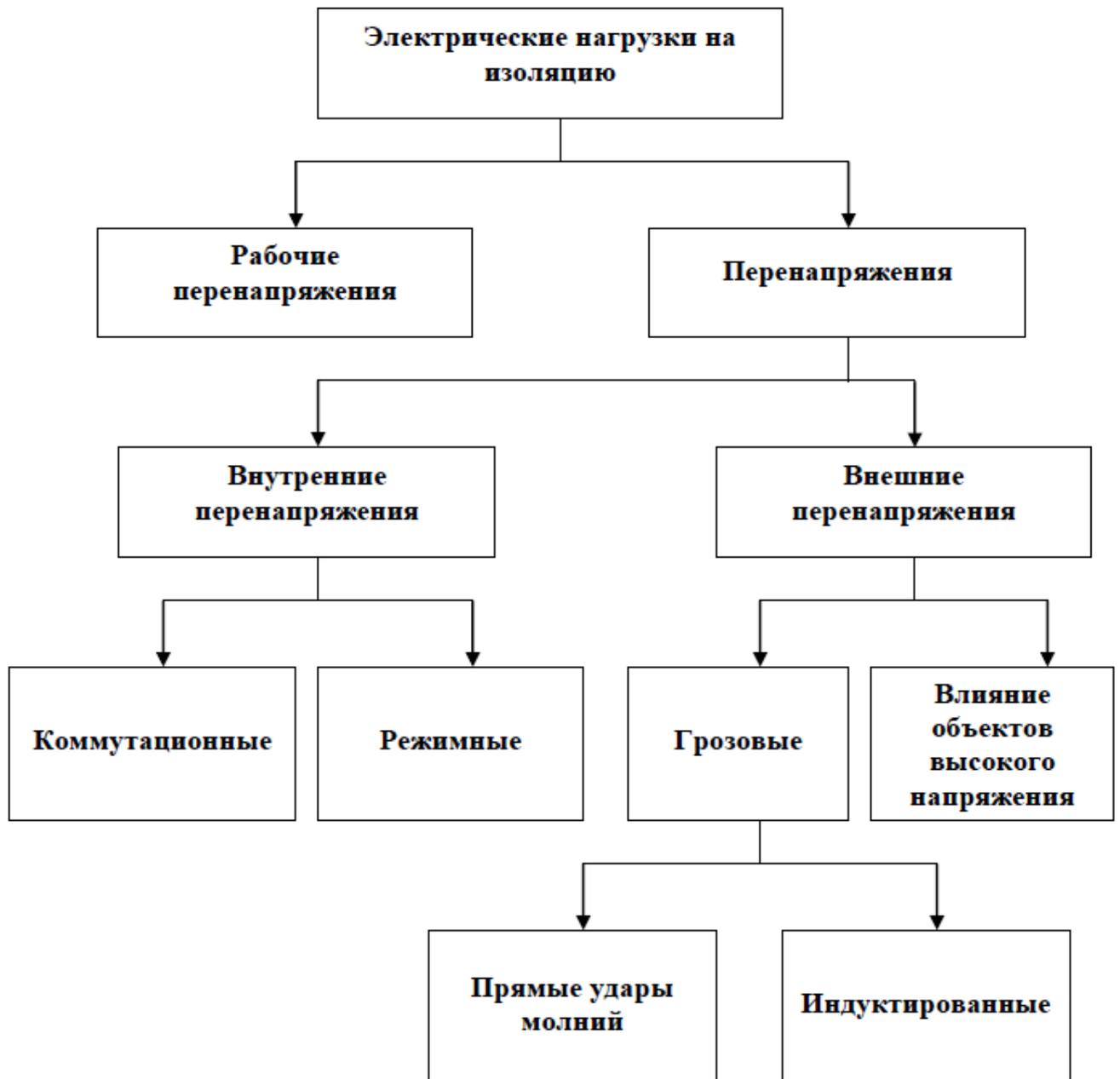


Рисунок 1.9 – Классификация электрических нагрузок

В итоге приведенные выше обстоятельства уменьшают степень надежности и прочности КЛ, способствуя формированию регрессивных процессов в изоляции.

В соответствии со статистикой нефтегазовых предприятий, ещё одним из часто встречающихся дефектов изоляции КЛ считается однофазное замыкание на землю (78 %), в особенности это касается кабелей, в которых каждая жила имеет отдельную независимую оболочку (Рисунок 1.10) [4; 6].

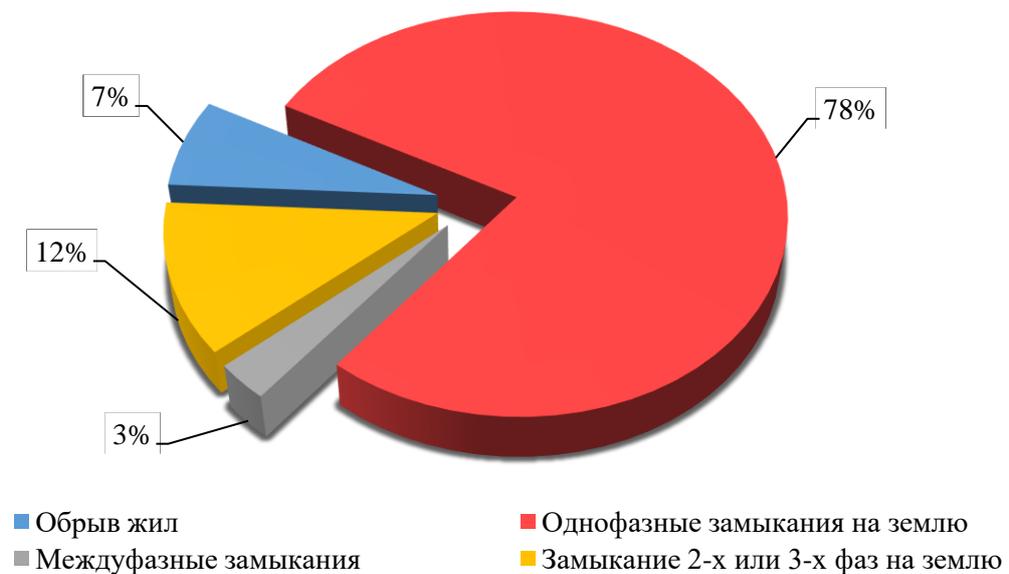


Рисунок 1.10 – Повреждения, свойственные для изоляции кабельных линий

Зачастую в период работы силовых кабелей среднего напряжения надзор за изоляцией ведут равно также, как и за кабелями напряжением до 1 кВ, однако такой бессознательный перенос способа контроля за одним объектом на другой считается ошибочным. Так как в низковольтных сетях главными причинами любой неисправности изоляции являются влага и грязь, которые, следовательно, значительно уменьшают активное сопротивление КЛ, но в сетях напряжением от 6 до 35 кВ главную роль играет электрическое старение, которое никак не установить измерением сопротивления, потому, как показывает практика, оно может и не

поменяться. По этой причине тут необходимо создание и использование иных способов диагностирования, несхожие с ранее установленными [23].

#### **1.4 Нормативно-техническая документация, регламентирующая безопасную эксплуатацию и способы оценки состояния кабельных линий 6-35 кВ**

В настоящее время есть единственный способ оценки состояния КЛ – это испытание повышенным выпрямленным напряжением, которое проводится согласно «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭЭП), а также и другим нормативным документам. Однако, как показывает практика, подобные испытания никак не обеспечивают дальнейшую безаварийную службу кабелей из-за действительно имеющейся опасности его пробоя, что естественно приводит к сокращению времени работы. Это демонстрируется на практике тем, что если при испытании не произошло пробоя, то потом во время эксплуатации он может выйти из строя. Кроме того, одним из недочетов данного способа считается тот факт, что оно никак не дает возможность получить надежные сведения о реальном состоянии объекта, а только лишь свидетельствует о том, что кабель пригоден, если выдержал испытание, а если нет – не пригоден. Подобные проверки принято рассматривать, как косвенно разрушающими. Помимо прочего эти испытания обязаны быть выполнены при первом приеме КЛ в работу, данные требования описаны в ПУЭ [24; 25].

Периодическая профилактика КЛ ведется описанным выше испытанием в соответствии с условиями, указанными в Таблице 1.3. А в Таблице 1.4 приведена информация, какие необходимо производить измерения, чтобы оценить состояние линии. Все вышеуказанные нормированные значения взяты из приложения 3 общепринятого документа ПТЭЭП [24].

После проведения работ, например, раскопок, а также после отключения КЛ подразумевается осуществление внеплановых проверок в виде испытаний, но в случае если управление, которое эксплуатирует данные КЛ, находит данное необходимым [26–29].

Таблица 1.3 – Значения номинального ( $U_{ном}$ ) и испытательного ( $U_{исп}$ ) напряжений в зависимости от вида КЛ с целью проведения испытаний [24; 25]

$U_{ном}$ , кВ	0,66	1	2	3	6	10	20	35	110	220
Кабели с бумажной пропитанной маслом изоляцией										
$U_{исп}$ , кВ	2,5	2,5	10-17	15-25	36	60	100	175	285	510
Кабели с пластмассовой изоляцией										
$U_{исп}$ , кВ	-	2,5*	-	7,5	36	60	-	-	285	-
Кабели с резиновой изоляцией**										
$U_{исп}$ , кВ				6	12	20				
Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена										
$U_{исп}$ , кВ					12	18	35	60		
*Не проводятся испытания для одножильных КЛ, состоящие из пластмассовой изоляции и проложенных на открытом воздухе, а также не имеющих броню.										
**Не выполняются, если был проведен ремонт КЛ, а будет достаточно проверки на напряжение равное 2,5 кВ (в течении 60 секунд).										

Таблица 1.4 – Допустимые значения тока утечки ( $I_y$ ) и коэффициента асимметрии ( $I_{max}/I_{min}$ ) [24; 25]

$U_{ном}$ , кВ	$U_{исп}$ , кВ	Допустимое $I_y$ , мА	Допустимое $I_{max}/I_{min}$ *
6	36	0,2	2
	45	0,3	2
10	50	0,5	3
	60	0,5	3
20	100	1,5	3
35	140	1,8	3
	150	2,0	3
	175	2,5	3
110	285	Не имеет норм	
220	510	Не имеет норм	
*Не имеют норм одножильные КЛ напряжением 6-35 кВ.			

Кроме того, в соответствии с вышерассмотренными правилами после начала проведения испытаний КЛ производится два раза измерение коэффициента, что именуется абсорбцией. Он дает косвенную оценку уровня увлажненности линии.

На предприятиях, проводящих данные испытания с измерениями, обязаны обладать стандартными утвержденными программами или методиками, в которых в обязательном порядке должны быть учтены и прописаны все условия по обеспечению безопасности [27].

Хотелось бы подчеркнуть, что проведение описанных выше мероприятий считаются как не информативными для оценки состояния КЛ так и небезопасными, по этой причине тут необходимо использование иных способов диагностики [30]. К сожалению, на данный момент отсутствуют общепринятые и утвержденные нормативно-технические документации по диагностированию [31].

Однако изучив ПТЭЭП от корки до корки, было обнаружено приложение 2. В нем предусмотрен ориентировочный порядок проведения промышленной диагностики электроустановок [24]. Следовательно, основываясь на этом могут быть сформированы отдельно для каждого вида электроустановки документы по диагностированию, например, отраслевой стандарт либо регламент, содержащий в себе последующие разделы [24]:

- задачи;
- условия проведения;
- показатели или иные данные и характеристики;
- характеристику перечня измеряемых параметров;
- описание метода или способа;
- используемые ресурсы или средства;
- алгоритм проведения;
- правила и требования;
- обработку полученных результатов;
- заключение (результат) согласно состояния предмета [24; 25].

## **1.5 Обзор современных методов обеспечения пожарной безопасности посредством оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ**

Увеличению безопасности и устойчивой работы компаний нефтегазовой сферы, посредством снижения аварийных случаев кабельных линий 6-35 кВ (КЛ), может способствовать ранее обнаружение [32], а также устранение начинающихся дефектов благодаря диагностики либо другого метода контролирования. По этой причине на данный момент с целью, чтобы проанализировать состояние КЛ разрабатываются разнообразные подходы и способы [33].

К примеру, причиной возникновения пробоя КЛ может быть снижение её изоляции, но данный процесс происходит не моментально, а медленно. По этой причине в период эксплуатации необходимо контролировать КЛ, знать в каком состоянии её изоляция для того, чтобы предупредить пробой и определить каков уровень опасности этих изменений. С этой целью понадобится периодический надзор, чтоб понять, когда ухудшится свойства изоляционного материала и вовремя осуществить мероприятия для возобновления рабочей надежности установок, которые питаются от данной КЛ. Также одним из главных критериев к контролю или способу является его экономическая оправданность [34–36].

Как уже описывалось ранее, сейчас официально применяется ППР, который имеет большое число недочетов и недоработок в своей системе, так, например, что касательно диэлектрических качеств КЛ, то для её поддержания в этой системе не учитываются настоящие условия работы [37]. Таким образом, согласно наработке, сохранение надежного состояния изоляционного кабельного материала не является реальным. Условия эксплуатации КЛ повсюду непохожи, логично предположить, что и изнашивание материала разное. В случае, если всё без исключения оценивать, то возможно продлить период службы КЛ с минимальными расходами, также без уменьшения надежности её работы. На данный момент необходимы конкретные оценки состояния, а для этого понадобится переход от системы сервиса по пробегу к другой альтернативной концепции сервиса по действительно фактическому техническому состоянию рассматриваемого объекта [38].

Имеются способы, однако только лишь один из них регламентирован [25], контролирования за изоляцией КЛ, они делятся на разрушающие или условно разрушающие (Рисунок 1.11) и неразрушающие (Рисунок 1.12) [39].



Рисунок 1.11 – Условно разрушающие способы контроля за изоляцией КЛ

Условно неразрушающие способы делят на выполняемые при напряжении:

- рабочем;
- меньше.

Во втором случае способ опирается на появление незначительных в изоляции электрических полей.

Помимо этого, способы разделяют по признаку на две категории:

- электрические;
- неэлектрические [40; 41].



Рисунок 1.12 – Неразрушающие способы контроля за изоляцией КЛ

Для того, чтобы создать, а потом внедрить неразрушающие способы по выявлению реального состояния КЛ в последние годы проводятся усиленные исследования. Из уже имеющихся и известных можно отметить основные, которые представлены в Таблице 1.5 [42], заодно данные способы были проанализированы, благодаря чему были выделены их главные «плюсы» и «минусы», которые тоже указаны в этой Таблице.

Таблица 1.5 – Анализ современных способов и диагностики оценки состояния КЛ

Способ	«Плюсы»	«Минусы»
Испытание повышенным напряжением (U) постоянного тока	1. Устанавливает только пред-пробойное состояние. 2. Обнаруживают местные сосредоточенные повреждения.	1. Условно разрушающий. 2. Даёт результат «годен» или «не годен», не даёт оценку оставшегося ресурса.

Способ	«Плюсы»	«Минусы»
Испытание переменным U промышленной частоты	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нагрузка при испытании равна нагрузке, при которой КЛ работает (частота напряжения тоже равна).</li> <li>2. Применимость для разного вида изоляции.</li> <li>3. Возможно измерение характеристик.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Невозможно использование в полевых условиях из-за большой массы трансформаторов, так как для испытаний требуется высокая мощность.</li> <li>2. Стоимость оборудования очень высокая.</li> </ol>
Испытание переменным U сверхнизкой частоты	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Небольшая масса оборудования, следовательно, подходит для полевых условий.</li> <li>2. Применимость для различного вида изоляции.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Имеет искажение напряжения из-за емкости и вида нагрузки.</li> <li>2. Образование «блуждающих» и асимметричных волн, что приводит к деградации изоляции.</li> <li>3. Нет возможности для замеров характеристик.</li> </ol>
Метод частичных разрядов	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможно проведение данного метода в режиме реального времени под рабочим напряжением.</li> <li>2. Компактное оборудование.</li> <li>3. Источники имеют испытательные напряжения разных форм.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Трудность фильтрации частичных разрядов(ЧР) от соседнего рабочего оборудования</li> <li>2. Неосуществимость регистрации ЧР, образующихся среди фаз трехжильных КЛ в единой оболочке.</li> <li>3. Дорогое оборудование.</li> <li>4. Потребность в обучении персонала.</li> </ol>
Тепловизионный метод	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность дистанционного обследования в рабочем режиме.</li> <li>2. Возможно одновременное исследование большого количества КЛ.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Невозможность замерить температуры из-за прокладки КЛ в туннелях или на эстакадах.</li> <li>2. Не даёт оценку оставшегося ресурса.</li> </ol>

Вдобавок эти методы были рассмотрены с практической точки зрения, то есть их применимость на таких предприятиях как нефтегазовых. В Таблице 1.6 представлено число сотрудников с целью проведения того или иного способа и их квалификация.

В целом итоги проводимых исследований на КЛ ещё раз акцентируют внимание на необходимость доработок нынешних способов диагностики, которые позволили бы следующее: устанавливать пред-пробойное состояние; эффективно составлять план вывода на ремонт КЛ; существенно экономить время и сократить расходы, связанные с внеплановыми обстановками [43].

Таблица 1.6 – Число и квалификация сотрудников методов исследования КЛ

Способ	Число сотрудников	Квалификация
Испытание выпрямленным повышенным U	6	6 разряд
Испытание U сверхнизкой частоты	6	6 разряд
Диагностика методом отклика U	4	инженер-испытатель
Диагностика методом частичных разрядов	2	инженер-испытатель
Диагностика методом тока релаксации	2	инженер-испытатель
Диагностика частотным методом	2	инженер-испытатель

С целью изучения КЛ в наше время используются разнообразные средства и оборудование, вот самые распространённые из них [31; 44–49]:

- АИД-70 М предназначен с целью проведения испытаний на прочность изоляции КЛ 6-35 кВ с помощью подачи высокого постоянного либо переменного напряжения [46];

- 2801 1N устройство, специализированное на замере сопротивлений ручным способом, также для установления коэффициента абсорбции [44];

- МРІ-520 – это измеритель характеристик электробезопасности сети при ремонте, наладке, испытаниях и других видах работы;

- трассодефектоискатель ТДИ-05М-3, наименование говорит само за себя;

- Fluke 1550В – это мегомметр в виде цифрового тестера для изоляции [48];

- тепловизор Testo 880 применяется для того, чтобы делать снимки объектов, по которым затем производится анализ инфракрасных изображений и определяется температура и состояние объекта [47];

- установка портативная CDS используется для диагностики КЛ с изоляцией поливинилхлоридной и бумажно-масляной, базирующаяся на изотермическом рассмотрении тока релаксации, также определении возвратного напряжения;

- цель системы LPD-Monitor – это мониторинг частичных разрядов КЛ под рабочим напряжением;

- установка FRIDA TD любой серии создана для испытаний оболочки КЛ, обладающая функцией замера тангенса угла диэлектрических потерь в комбинации с системой оценки степени частичных разрядов [31; 49].

## Выводы по главе

На предприятиях нефтегазовой отрасли предоставление бесперебойного электроснабжения на технологические установки и конструкции считается одним из основных условий, так как оно в значительной степени определяет безопасность процессов и самого предприятия в целом. Но главную часть аварийности на данных предприятиях из числа компонентов электроснабжения и питания составляют неполадки в кабельных линиях напряжением 6-35 кВ, чей отказ способен послужить причиной к формированию аварийных ситуаций, которые приводят к материальным убыткам, нанесению вреда природе, а в некоторых случаях в том числе и к летальным исходам.

Кабельные линии 6-35 кВ используются и работают в условиях воздействия на них пожаро- и взрывоопасных сред, скачков температур, давлений, вибраций и иных воздействий, что как правило приводит к её выходу из строя.

Нормативно-техническими документами сейчас определен один метод контроля за кабельными линиями – испытание повышенным выпрямленным напряжением. Однако обеспечить дальнейшую безаварийную работу невозможно, так как данные испытания влекут в большинстве случаев пробой изоляции. Переход на сервис по фактическому состоянию кабельных линий является одним из радикальных путей решения.

Установлено, что главным минусом имеющихся методов оценки состояния кабельных линий 6-35 кВ считается неумение обнаружить перемены характеристик и дефектов на их первоначальных стадиях, но кроме того давать прогноз их дальнейшей работы. А значительный уровень возможной угрозы технологических процессов в нефтегазовой сфере требует развития общего подхода к созданию концепции предупредительного и своевременного управления безопасностью имеющихся объектов. В связи с этим актуальной задачей считается создание новейшего метода оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ, учитывающего все без исключения характеристики объекта, а также условия и сроки эксплуатации.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ**

### **2.1 Основные требования к диагностике, необходимые для обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ**

Улучшить безопасность КЛ 6-35 кВ на нефтегазовых производствах, и тем самым избежать экстренные случаи, возможно вследствие раннего выявления повреждений и поломок. Данную задачу возможно решить путем использования концепции диагностики технического фактического состояния КЛ. Точность и достоверность определения развивающихся дефектов; невысокая трудозатратность проводимых работ; легкость выполнения замеров нужных параметров; выполнение обработки итогов замеров и их анализ за непродолжительный период времени с возможным использованием технических программных средств и так далее – всё это без исключения относится к основным требованиям, каким желательно должно соответствовать безупречное на сегодняшний день диагностирование [50].

К тому же, одними из значимых факторов диагностики, которые надо учесть – это постоянное наблюдение за состоянием КЛ напряжением 6-35 кВ, анализ за состоянием, для того чтобы была возможность осуществить принятие решений о последующей эксплуатации [51] кабелей (либо заключение о восстановлении, либо о выводе из работы).

Безопасность КЛ находится в зависимости от их технического состояния, которое определяется диагностикой, а основным условием для её выполнения считается этапность, представленная на Рисунке 2.1, где расписан каждый шаг (последовательность действий) [52].

Рассмотрим каждый шаг оценки технического состояния КЛ 6-35 кВ с целью построения диагностической концепции, и их условия. Первоначальным шагом является выявление тех повреждений, которые представляют особую угрозу для КЛ и их стандартного функционирования. Затем II шаг согласно Рисунка 2.1 – это установление сигналов диагностики, то есть необходимость определить природу

повреждений с целью понять какие средства и ресурсы потребуется применять: существующие либо разрабатывать новые [52; 53].

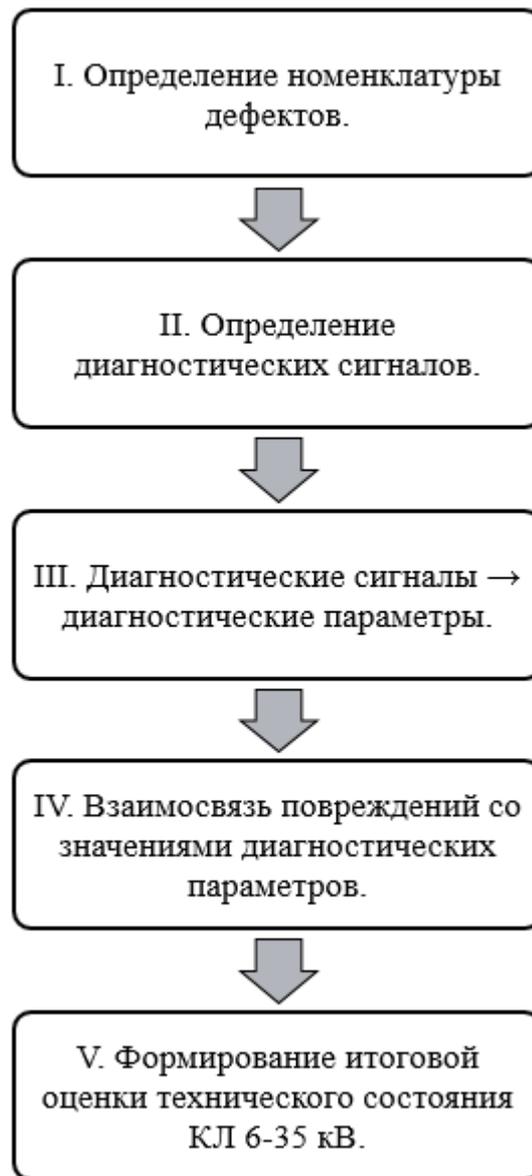


Рисунок 2.1 – Этапы проведения диагностики для КЛ 6-35 кВ

III шаг – на данном этапе из полученных сигналов выделяется совокупность измеряемых диагностических параметров, которые понадобятся для последующей оценки состояния КЛ. Здесь проводится большое число исследований, которые плавно переходят в следующий шаг, таким образом происходит изучение влияния разных повреждений на перемены того либо другого параметра кабеля [54]. Потом

проводится оптимизация параметров, где избираются только те, которые прямо зависят от характера повреждений, также наиболее доступны для замеров, этим самым выделяется комплекс диагностических параметров, измерение каковых будет вестись в последующих изучениях КЛ [55]. Тем самым создаются группы технического состояния КЛ вследствие взаимосвязи повреждений со значениями параметров.

На основании полученных результатов всех проведенных исследований КЛ 6-35 кВ формируется итоговая оценка состояния, это происходит на завершающем V шаге. Уже после того как метод диагностики был подтвержден как теоретически, так и практически, то формируется окончательный алгоритм его выполнения и также разрабатываются принципы проведения оценки в целом, где полностью прописываются применяемые средства замера, обработка итогов, места контроля и тому подобное [56].

## **2.2 Принципы формирования информативных параметров диагностирования, влияющих на безопасную эксплуатацию кабелей**

При диагностировании состояния предмета зачастую происходит утрата или недочет данных и информации, которая связана с неполнотой контролирования параметров, по этой причине анализ и выбор необходимых параметров КЛ 6-35 кВ является первоочередной задачей. Требуемые параметры, которые рационально применять с целью извлечения и передачи сведений определяют информативными, в соответствии с этим во время исследований будем устанавливать только лишь те параметры, какие очевидно оказывают большое влияние на состояние техническое КЛ напряжением 6-35 кВ. Они будут соответствовать тем физическим процессам, которые происходят внутри самого кабеля в период его эксплуатации, а также тем, которые возможно будет измерить [57; 58].

Формирование информативных параметров будет производиться на основе исследований, принимая во внимание, что КЛ 6-35 кВ можно рассматривать с двух точек зрения, как структура и как способ функционирования. И те и те параметры

нужно учесть, так как они имеют свои особенности [57].

Таким образом, рассматривая КЛ согласно первой точке зрения, понадобится принимать во внимание характеристики, которые соответствуют свойствам кабеля и обеспечивающие его работоспособность. Качество структуры КЛ напряжением 6-35 кВ в определенный период времени  $t$  будет обозначаться переменными параметрами, условно,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . А во время эксплуатации они будут меняться в связи с уровнем износа, повреждений, в том числе и пробоев, таким подобным информативным параметром являться сопротивление КЛ [59].

Далее, введя представление идеального КЛ, которому отвечает параметр  $x_0$ , ему отвечает абсолютно новый кабель, замеряем тот же параметр уже у ранее эксплуатирующего кабеля. Станет в этих параметрах заметна разница, так как все без исключения реальные предметы в том либо другом уровне различаются от безупречного. Тогда данную разность можно выразить формулой (2.1), которая охарактеризует некое несоответствие  $i$ -го параметра от эталона, в нашем случае от номинального параметра [60].

$$x_i = x_n - x_0. \quad (2.1)$$

КЛ может быть описана разными совокупностями параметров. Например, сопротивление изоляции, емкость, добротность и так далее. И несомненно то, что среди этих параметров, описывающих структуру кабеля, вероятны нахождения зависимости следующего вида (формула 2.2) [52; 60].

$$x_i = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (2.2)$$

Из вышеизложенного следует вывод, что техническое нынешнее состояние КЛ возможно установить из совокупности параметров, какие явно демонстрируют отклонения характеристик от её номинального режима, что способно послужить причиной внезапного выхода из строя. Данные параметры будут информативными, в случае если их значения смогут помочь в осуществлении конкретных решений в

плане последующего применения КЛ будь, то замена или ремонт, или прочее [61].

Аналогично рассматриваются параметры и по методу функционированию, то есть здесь предусматриваются такие параметры, какие порождают разнообразные процессы. Например, КЛ излучает тепло, следовательно, таким параметром может служить температура. Совокупность данных параметров может выражаться как функция состояния, но даже для КЛ можно установить безграничное количество таких функций. По этой причине только лишь во время исследований возможно отметить подобные параметры, которые несут за собой информацию [62].

Из всего этого следует, что диагностические параметры безграничны, однако только правильно выделенные из них обладают информацией, согласно которой станет возможно оценивать состояния КЛ напряжением 6-35 кВ. В первую очередь диагностические параметры обязаны обладать конкретной взаимосвязью с КЛ и её состоянием, также необходимо принимать во внимание условия контролирования и эффективности. Также необходимо принимать к сведению тот факт, что данные параметры во время диагностики могут меняться в зависимости от внешних условий и обстоятельств [63].

Концепция диагностики может быть выстроена на одном из двух принципах: статическом либо динамическом [64]. Первый имеет неизменяющиеся значения во времени, а второй – переменные, но обладающие огромным числом информацией. В связи с этим динамическое рассмотрение КЛ будет иметь больше плюсов, так как он не потребует изучения большого количества неоднородных процессов.

## **2.3 Методы оценки технического состояния кабельных линий 6-35 кВ с целью их дальнейшей безопасной эксплуатации**

Для того, чтобы дать оценку техническому состоянию КЛ 6-35 кВ возможно применить разнообразные существующие методы с целью определения образов, например, метрические либо статистические, либо динамические, или даже способ нейронных сетей [56; 60; 65].

Ниже рассмотрим каждый из них наиболее детально.

### **2.3.1 Метрические методы оценки технического состояния и безопасности кабельных линий напряжением 6-35 кВ**

Метрические методы определения образов могут быть применены с целью аутентификации технического состояния КЛ 6-35 кВ. Этот метод устроен на основе количественном анализе нахождения двух друг от друга состояний предмета, который исследуется. Состояние показываются точками в пространстве показателей, а, следовательно, расстояние между ними и является искомым мерой. Для этого создается диагностическое пространство, на нём в виде вектора наносится объект, который рассматривается, его длина может не совпадать с размерами вектора, который в пространстве показателей. Для того, чтобы оценить нынешнее состояние КЛ напряжением 6-35 кВ в роли диагностических параметров следует применить, например, электрические характеристики кабеля, числовые значения которых уже предварительно нормированы. А уже непосредственно из них и создается то самое диагностическое пространство [60; 66].

Данная метрическая задача, с учетом абсолютно всех характеристик КЛ, станет многопараметрической. И поэтому сможет производиться количественный анализ характеристик объекта, которые позволят непредвзято произвести оценку текущего технического состояния КЛ. Найти решения этих многопараметрических задач помогут инновационные ресурсы и компьютерные технологии. Но также для решений следует установить наилучший комплекс импульса напрямую меримых характеристик, также обнаружить более подходящие методы для обработки импульса, разрешающие формулировать характеристику, которая находится под контролем, по набору характеристик не одномерного импульса, если вкратце, то предоставить сочетание рационального не одномерного импульса. Из-за сложности многофункциональных связей характеристик импульса, а иногда в определенных вариантах из-за неосуществимости его представления даже через аналитику, не получится это осуществить методами традиционного анализа. В такие моменты метрический способ бессилен, но статистический аспект принесет результаты. Это объясняется тем, что взаимосвязь между характеристиками объекта и измеряемого

импульса очевидно обладают статистическим видом, и в то же время они не стоят в непосредственной каузальной связи, а они создают единую для них двоих группу, имеющую фактор причинный. Данные факторы оказывают влияние на импульсы, тем более осложняя непредсказуемость взаимосвязей. Таким образом методика будет затрудняться с повышением контролируемых характеристик, следовательно, крайне важно подобрать наилучшее количество данных, которые несут за собой информацию, и кроме того немаловажно сформировать алгоритм истолкования результатов контролирования [67; 68].

### **2.3.2 Статистические методы оценки технического состояния и безопасности кабельных линий 6-35 кВ**

После проведения опытных изучений и последующей обработки полученных значений строится многомерная взаимосвязанная модель в виде графика. Данный график демонстрирует взаимосвязь характеристик рассматриваемого предмета с полученными сигналами от измерительного устройства. В этом и есть вся сущность статистического способа. В последующем эти графики применяют с целью оценки состояния технического, используя данную методику контролирования. Чтобы понять подходит ли данный метод оценки нужно суметь отделить контролируемые характеристики КЛ от сигналов измерительных устройств, а в некоторых случаях это не всегда возможно. Так как характеристики КЛ часто переменчивы в связи с воздействием на них полей, например, магнитных, всевозможных перенапряжений, коррозии, вибраций и прочее. А на измерительное устройство приходят сведения о данных модификаций в форме сигнала. Характеристики, которые контролируются, и полученные сигналы могут быть затем представлены в виде мерных векторов [69] (формулы 2.3 и 2.4).

$$x_i = f_1(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m); \quad (2.3)$$

$$y_i = f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (2.4)$$

где  $x_i$  – элемент  $n$ -мерного вектора контролируемых характеристик;  
 $y_i$  – элемент  $m$ -мерного вектора сигналов измерительных устройств;  
 $f_1, f_2$  – функции для преобразования.

Присутствует каузальная взаимосвязь среди контролируемых характеристик и полученными сигналами.

Таким образом, получается, чтобы оценивать состояния КЛ 6-35 кВ можно рассматривать расстояние между вектором нынешнего состояния КЛ и вектором-образцом (номинальное состояние КЛ) либо плоскостью максимального состояния диагностических характеристик, которое построено полученными от устройства сигналами [70].

### **2.3.3 Методы динамической оценки технического состояния и безопасности кабельных линий 6-35 кВ**

В целях идентификации дефектов КЛ 6-35 кВ имеет место быть применение, заимствованное из такого инструмента как планирование опытов, точной модели. Во время опытов на данную модель возможна реализация разных возмущений, что даст возможность анализировать изменения характеристик КЛ. Для того, чтобы это воплотить в жизнь необходима модель, но не простая, а динамическая, что заранее подразумевает наблюдения во времени за переменами объекта. Модель не всегда просто произвести из-за трудности описания объекта, который диагностируют, по этой причине для её формирования применяют следующие аспекты, показанные на Рисунке 2.2 [71].

Характеристики объекта, установленные после диагностики с применением динамической оценки, возможно отобразить на одной из двух областях: временной либо частотной [31; 71].

Как уже ранее известно, передаточная функция считается одной из ключевых точных модификаций в разделе динамики. Данная функция записывается всегда в операторной форме и в итоге выступает в роли отношения изменения сигнала ответа к сигналу наружного влияния на объект [72].



Рисунок 2.2 – Формирование динамической модели

Проще говоря передаточная – это функция, демонстрирующая взаимосвязь между входными и выходящими сигналами, подающие на анализируемый объект. Описывается эта взаимосвязь уравнениями дифференциальными [73]. Эта функция рассчитывается как отношение отображения выходного сигнала, к отображению входному (формула 2.5). А сигналы непременно реорганизованы согласно Лапласу.

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (2.5)$$

Таким образом способ оценки состояния исследуемого предмета при помощи передаточной функции состоит в последующем: рассчитываются значения каждого коэффициента этой функции, потом устанавливается расположены ли полученные значение в установленной области, то есть имеется в виду такая область, которая соответствует нормальному состоянию объекта во время его работы [56; 73].

Динамика движения изучения рассматриваемого объекта прослеживается в период проведения экспериментов, основанных на анализе приобретенных данных, которые представляют собой координаты на входе и выходе устройства [72].

Сейчас во время исследований используются такие способы аутентификации дефектов у объекта как:

- активные;
- пассивные;
- смешанные [74].

Активный отличается от пассивного способа тем, что на вход устройства дают уже заранее заданный сигнал, он может быть всевозможным, а при пассивном – натуральные колебания, а затем также и в том и в другом методе уже изучается сигнал, зарегистрированный на выходе. А в смешанном – название свидетельствует само за себя [74].

В случае с передаточной функцией используется пассивный способ, который состоит в контроле и регистрации характеристик на входе и выходе в отсутствие интенсивного вмешательства изыскателя. Данные характеристики и определяют анализируемый объект. А непосредственно сам процесс, происходящий в объекте, считается периодически обусловленным. Тем самым, если применять передаточную функцию, то именно на ней будут отображаться перемены свойства предмета в срок его функционирования [75]. Также использование данной функции возможно в качестве параметра интегрального либо диагностического для оценки реального состояния. Он позволит применять общематематический анализ для динамических систем, благодаря которому возможно будет предотвращать аварийные положения на предприятиях, следовательно, формировать сервис по фактическому состоянию.

Резюмируя вышеописанное, эти опытные изучения базируются на принципе, именуемом «чёрный ящик». Этот «ящик» представляет собой строение системы, которая спрятана от наблюдающего, но мнение о ее работе формируется на основе рассмотрения внешних влияний и итоговой реакции. «Черный ящик» применяется, если нереально точно изложить проходящие процессы внутри изучаемого объекта.

Хотелось бы подчеркнуть то, что методы динамической оценки кроме того обширно применяются в кибернетике, данное обуславливается тем, что этот метод дает возможность в комплексе четко дать оценку нынешнему состоянию тому или иному предмету, а также давать прогноз действия в перспективе [76; 77].

### **2.3.4 Методы нейронных сетей в задачах оценки технического состояния и безопасности кабельных линий 6-35 кВ**

Одним из многообещающих способов оценивания технического состояния КЛ 6-35 кВ являются методы искусственных нейронных сетей (ИНС). Её отличие от прочих методов в том, что она применяется, если неизвестен конкретный тип взаимосвязей между входящими и выходящими параметрами изучаемой системы. Эта зависимость формируется в период обучения ИНС в результате прибавления либо убавления числа входов в нейросеть, то есть проще говоря принимая или нет во внимание существующие внешние характеристики [78].

Само представление о нейросети возникло в XX столетии во время изучения строения и деятельности мозга людей и животных, однако главные выводы были получены при изучении нервной системы непосредственно человека [79]. Это дало возможность основательно исследовать и понять работу нейронов, что в следствии привело к созданию для проверок различных концепций точные модели. И таким образом ИНС – это комплект нейронов, которые между собой соединены, подобно тому как составляющие преобразователей информации объединены друг с другом какой-либо связью для передачи данных, сопряженные общей деятельностью [80].

На Рисунке 2.3 показана модель нейрона ИНС. Где  $x_1 - x_n$  – это сигналы на входе, их может быть огромное число, и они обозначаются как  $X$ , что соответствует вектору. Этот сигнал протекает через синапсы, которые и являются односторонней связью, связывающей входа и выходы.  $w_1 - w_n$  это вес, обозначающий как вектор  $W$ . Каждый соответствующий вес умножается на свой сигнал. Затем всё проходит через источник, отмеченный как  $\sum$ , что и считается телом самого нейрона, в итоге он и формирует вывод в виде NET [78; 81].

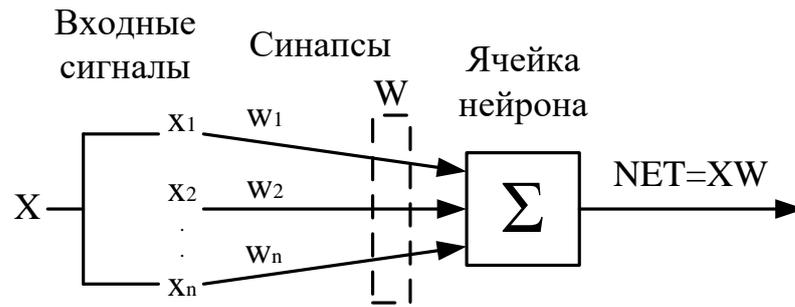


Рисунок 2.3 – Модель нейрона ИНС

Нейроны ИНС в зависимости от окружающей среды изменяют свои действия и затем без помощи других могут настроиться таким образом, чтобы гарантировать необходимый итог. Благодаря этому нейросеть дает возможность уменьшить время распознавания без всякого изменения правдивости результатов [82].

На выходе некоторых моделей нейронов ИНС добавляют вспомогательный блок, который усиливает сигнал. Достоинство данного блока в том, что сеть легко приспосабливается в отсутствии огромного числа нейронов, особенно скрытых в её слоях. Эта модель представлена на Рисунке 2.4 [83].

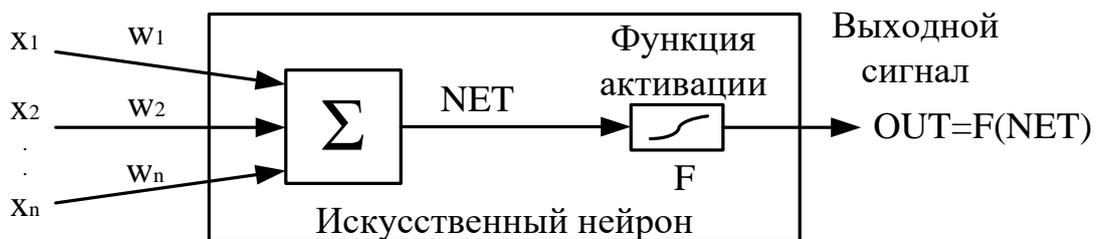


Рисунок 2.4 – Модель нейрона ИНС с вспомогательным блоком

Любой нейрон характеризуется собственным состоянием, обозначается  $S$  – весовая совокупность его входов, установить которую можно по формуле 2.6 [82].

$$S = NET = \sum_{i=1}^n w_i x_i = XW = |X||W| \cos \alpha, \quad (2.6)$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ;

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ;

$|X|, |W|$  – длины векторов  $X$  и  $W$  соответственно;

$\alpha$  – угол, образующий между векторами.

А если в модели содержится вспомогательный блок (блок  $F$  на Рисунке 2.4), то рассчитывается коэффициент  $k_y$ , который называется усилением (формула 2.7). С учетом данного блока на выходе получаем сигнал, обозначенный как  $OUT$  [79].

$$k_y = OUT = F(S) = F(NET) = F\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right) = F(XW), \quad (2.7)$$

где  $F$  – функция активации, является нелинейной характеристикой нейрона ИНС при усилении [79; 80].

Чем больше соединений нейронов между собой, тем сложнее сеть, но тем больше возможностей для вычислений и иных операций. В связи с этим нейросети имеют пласты. Они могут состоять как из одного, так и из большого количества пластов. Так на Рисунке 2.5 представлена сложная нейросеть, состоящая из двух пластов, соединенных последовательно, то есть выход одного считается входом для последующего пласта [78; 81–83].

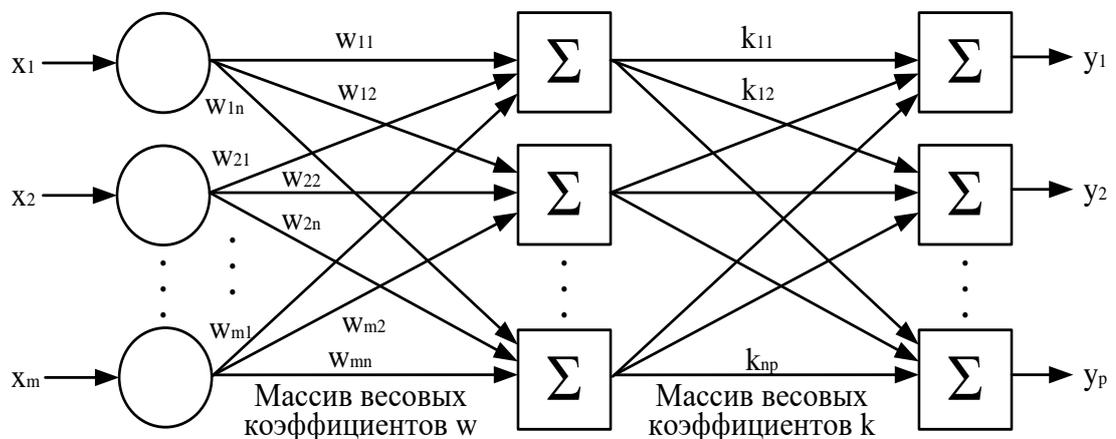


Рисунок 2.5 – Нейросеть из двух пластов

Модель ИНС создается во время её обучения, что и считается значимой особенностью данных сетей. Для этого важно приготовить комплект обучающих сведений – это данные на входе и надлежащие им значения на выходе. Также важно настроить значения весов, понимать модель окружающей среды и знать доступную для сети информацию. По этой причине обучение – это определенный процесс по настройке данных и весов. Сам алгоритм обучения ИНС разделяют на два типа обучения: «с учителем» и без. Различие их заключается в том, что «с учителем» предварительно имеются откалиброванные значения на выходе. Также способов по обучению ИНС имеется весьма немалое количество, например, Кохонена или Розенблатта, или обратного распространения и прочие [78; 84].

Так, применяя ИНС с целью оценки технического состояния КЛ 6-35 кВ в качестве значений, подающих на вход, могут быть использованы электрические характеристики, к примеру, сопротивление, емкость, добротность и так далее. А далее обучить, чтобы нейросеть анализировала и выдавала итог в виде некоего кода, который и определяет текущее состояния КЛ [84].

Следует отметить, что для увеличения уровня достоверности определения состояния КЛ 6-35 кВ следует применять в период обучения ИНС существенную базу данных, созданная во время выполнения значительного количества опытных замеров. Это считается главным минусом нейросетей в задачах диагностики. Для устранения этого недостатка возможно применение такой теории как планирование исследований [85], позволяющую существенно сократить число экспериментов и увеличить базу данных. Цель этой теории – это получение прямолинейной модели, которая базируется на варьировании условий, в данном случае видов дефектов КЛ.

Применение ИНС в задачах диагностики кабелей является актуальной, так как нейросети дают возможность уменьшить аппарат оценивания состояния, и при этом не изменяя правдивость итоговых результатов [68; 84].

## **2.4 Разработка ключевых этапов исследований кабельных линий 6-35 кВ**

Разработаны ключевые этапы изучения КЛ 6-35 кВ, продемонстрированные

на Рисунке 2.6. Их задача гарантировать безопасность при эксплуатации КЛ, а это достигается за счет рассмотрения взаимосвязи нынешнего технического состояния со значениями их полученных характеристик во время диагностики.

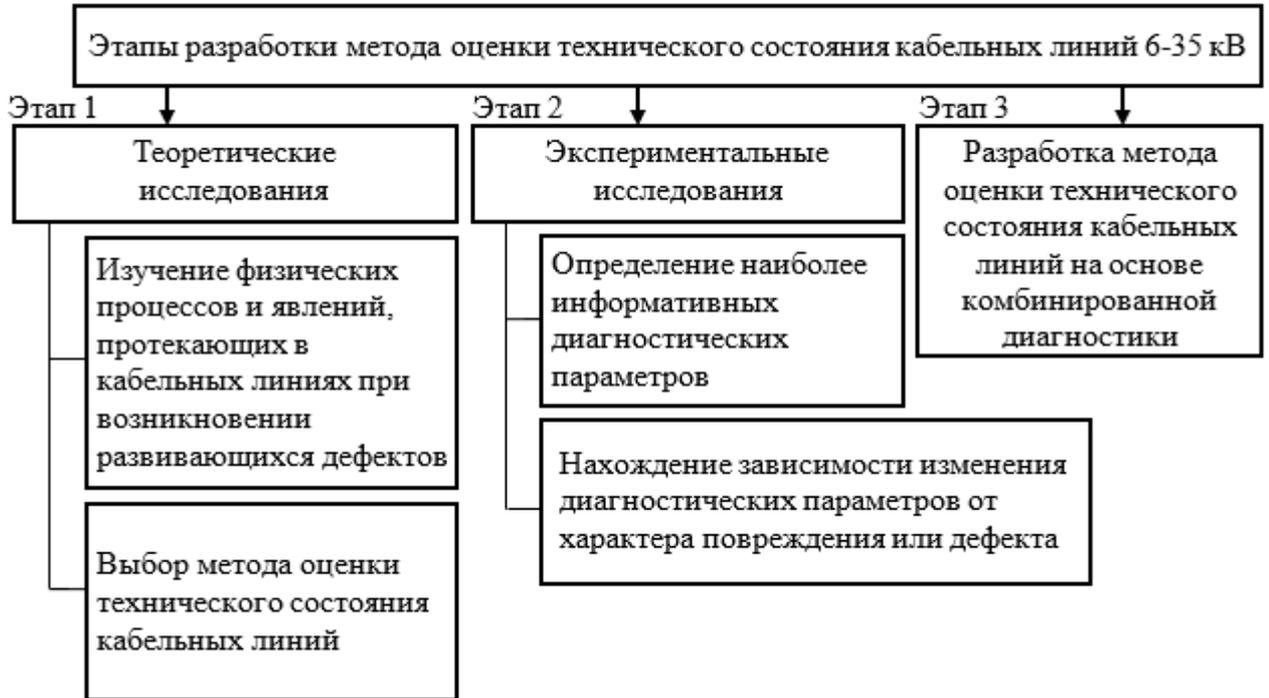


Рисунок 2.6 – Ключевые этапы для проведения исследований КЛ

Первостепенно – это изучение физических процессов, которые проходят в КЛ при появлении повреждений, то есть проще говоря проведение исследований теоретических. Затем рассмотрение уже существующих способов идентификации технического состояния и выбор методов, которые будут использоваться во время проведения опытов.

На следующем втором этапе – проведение экспериментов. Их главная цель – это установление зависимости изменения измеряемых параметров диагностики от степени повреждения КЛ.

На последнем этапе уже разрабатывается непосредственно сам метод оценки состояния изучаемой КЛ. Но в третьей и четвертой главе данной диссертации более детально рассмотрены второй и третий этапы этих исследований.

## Выводы по главе

Обеспечить надежную, следовательно, безопасную работу кабельных линий 6-35 кВ немислимо без оценки технического состояния, а для этого требуется применение концепции диагностики.

Любое изменение диагностических характеристик имеет свою собственную зависимость от конкретных повреждений кабельных линий, вследствие чего может быть оценено их текущее состояние.

С целью оценки технического состояния могут быть применены методы следующей идентификации: метрической или динамической, либо другие методы. Но использование искусственных нейронных сетей в целях диагностики обретаёт значительный интерес. Они дают возможность уменьшить аппарат по определению образов без всевозможных изменений точности и правдивости результатов. Одним из значимых превосходств применения данных сетей считается возможность их обучения. Оно даёт возможность расширить базу данных и увеличить подлинность итогов.

Для оценки технического состояния кабельных линий 6 – 35 кВ может быть использована совокупность способов и приборов, которые в свое время измеряют разнообразные параметры и снимают различные характеристики. Но эти сведения должны давать точное определение текущего состояния кабельной линии. Логично предположить, что полученных во время исследований параметров может быть безграничное количество, но только безошибочно выделенные из них обладают информацией. Для этого эти параметры обязаны иметь конкретную взаимосвязь с повреждением, но также следует принимать к сведению условия контроля и тот факт, что параметры могут быть подвержены изменению от внешних условий и обстоятельств. Из этого следует, что техническое нынешнее состояние кабельной линии 6-35 кВ возможно определить из совокупности информативных параметров, явно демонстрирующих отличия характеристик от её номинального режима, что способно стать фактором неожиданного выхода из строя.

## ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ

### 3.1 Разработка методики экспериментальных исследований

На предприятиях нефтегазовой отрасли и не только всегда остро стоял и по сей день стоит вопрос безопасности во время технологических процессов, во многом определяющихся состоянием КЛ среднего напряжения, которые снабжают данные процессы. В связи с этим в ходе работы либо по окончании срока службы зачастую возникает вопрос по проверке и осмотру КЛ и соответственно способу их исполнения, чтобы решить дальнейшую «судьбу» того или иного кабеля. Кроме того, на сей день актуально продление работоспособности электрооборудования, которые уже израсходовали установленный свой срок службы. Поэтому верно спланированные и созданные диагностические обследования могут повысить срок работы, что как результат отразится на экономической составляющей, то есть на снижениях расходов. Не вдаваясь в дальнейшее обсуждение отметим, что для достижения вышесказанного понадобится немалое число проделанных опытных исследований с КЛ среднего напряжения. А для данных исследований потребуется разработка методики по выполнению экспериментов, основанной на выявлении корреляционной зависимости полученных диагностических значений с уровнем поврежденностью КЛ. Из чего следует, что методика в данной работе заключается в решении двух поставленных задач, представленных на Рисунке 3.1 [86; 87].

Первая задача заключается не только лишь в нахождении основных наиболее информативных параметров [57], и в установлении дополнительных показателей, например, таких как срок и условия эксплуатации, коэффициент безопасности. Для решения данной задачи выполняется всё перечисленное на Рисунке 3.1 слева. Затем по полученным результатам опытных данных отбираются требуемые параметры.

А к задаче номер два относятся перечисленное справа согласно Рисунка 3.1 и сводится она к нахождению зависимостей перемен значений информативных параметров от уровня, степени повреждений или каких-либо других дефектов [57].



Рисунок 3.1 – Общая структура методики по проведению экспериментальных исследований

В качестве объектов исследования в данной работе были выбраны кабельные линии, которые принадлежат к среднему классу напряжения, то есть 6-35 кВ. А основными опытными образцами при проведении экспериментов стали следующие объекты:

- иркутский кабель ААШв-6 (3x185(150));
- камский кабель ААБл-10 (3x150);
- кабельные свинцовые соединительные муфты СС – 90 и СС – 110.

Перечисленные выше типы кабелей рассматривались в виде отрезков длиной 2 и 5 метров, включая концевые разделки. Данные опытные образцы имели разные технические состояния, таким образом изучались исправные объекты, объекты с

дефектами, повреждениями и те, которые были сильно увлажнены, неисправны, то есть выведены из эксплуатации.

Исследование выбранных типов кабелей обусловлено тем, что они часто применяются на промышленных предприятиях, так как большая их часть была ещё проложена с советских времен – это как некий архаизм, оставшийся от прошлого, по факту довольно много оборудования применяемого ещё с советских времён и не соответствующего требованиям современных правил, хотя ещё есть нюансы из-за неточностей в технических заданиях (ТЗ) при проектировании, также из-за желания удешевить проект, заложив кабели с алюминиевыми жилами. И это остаётся на совести проектировщиков и специалистов, которые согласовывают такие решения. И как следствие этого службе эксплуатации ничего иного не остаётся кроме как заниматься обслуживанием данных типов КЛ, и в случае необходимости проводить восстановительный ремонт. Поэтому в данной диссертационной работе изучаются КЛ уже имеющиеся на предприятиях и рассматриваются со стороны их безопасной эксплуатации.

Однако существует и тот факт, связанный с разночтением и толкованием тех же правил, нормативных документов таких как ПУЭ, ГОСТ, каталог по области применения тех или иных видов кабелей. Если разбираться более подробно:

- согласно ПУЭ глава 7.3, а именно 7.3.93 во взрывоопасных зонах (ВОЗ) классов В-I и В-Ia должны применяться кабели с медными жилами [25], но рассматриваемые в данной работе КЛ не лежат в данной зоне, например, от НСТЭЦ (теплоэлектроцентраль) до РТП – эта зона где нет установок технологических, это трасса по поставке электроэнергии. А сами зоны от технологических объектов определяются в главе 7.3.39 [25]. Таким образом данный пункт в ПУЭ не обязывает в любом без исключения опасном производственном объекте (ОПО) иметь только медные КЛ, учитывая тот факт, что в состав ОПО ВОЗ может и не входить;

- согласно ГОСТ Р 58342-2019 и Каталога по области применения кабелей: «...с алюминиевыми жилами допускается применять во взрывоопасных зонах в соответствии с требованиями нормативных документов (отраслевых стандартов и федеральных норм)».

Касательно изоляции, то в настоящее время КЛ 6-35 кВ в основном имеют два типа изоляции – это бумажная и полиэтиленовая. Несмотря на то, что сейчас обозначилась тенденция к переходу от бумажной изоляции к сшитому полиэтилену, однако проанализировав предприятия нефтегазовой отрасли в России, кабели с бумажной изоляцией до сих пор остаются наиболее распространенными, так на одном из предприятий их число составляет более 80 % от общего количества кабеля данного класса напряжения, и они особо применимы в электрических приводах машинных аппаратов таких как вентиляторы, насосы как центробежные, так и поршневые и в прочих агрегатах. И до сих пор промышленные компании внедряют данные КЛ в работу, и не стремятся производить их замену по причинам, связанным с экономическими затратами и существенным количеством времени на данный процесс. Также изучив заводы по выпуску кабельных изделий в нашей стране, можно сделать заключение, что приблизительно 60 % выпуска изделий приходится на КЛ с бумажной пропитанной изоляцией (согласно данных ВНИИКП в городе Москва от 2016 года) [31; 88].

Резюмируя вышесказанное, непосредственно от состояния описанных КЛ и зависит основная безопасность технологического процесса на предприятиях [4; 6].

### 3.2 Разработка экспериментальной установки

Исследование КЛ будет основываться на изучении выходных характеристик, которые зависят от подаваемого сигнала, поэтому применим следующую систему, изображенную на Рисунке 3.2 [39; 52; 68; 61; 89].

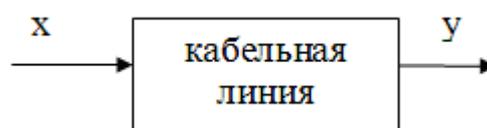


Рисунок 3.2 – Структурная схема системы

С целью исследования КЛ была разработана установка для экспериментов с учетом требований основных официальных документов, таких как: [24; 25; 90; 91; 44; 47; 48; 92], а именно ПУЭ, ПТЭЭП, «Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок», ГОСТ 12.2.007.14-75, руководства по эксплуатации и РД 34.45-51.300-97.

Структурная схема установки для экспериментов с целью исследования КЛ и нахождения связи между степенью развития дефектов и изменениями значений параметров и её внешний вид представлены на Рисунках 3.3 и 3.5 соответственно.

А на Рисунке 3.4 изображены фотографии объектов для изучения.



Рисунок 3.3 – Структурная схема установки для экспериментов [93]

Разработанная установка предполагает, что генератором на вход изучаемой КЛ или муфте подается единичный сигнал, имеющий прямоугольную ступенчатую конфигурацию, а на выходе исследуемого предмета фиксируется переходной процесс в виде кривой прибором. Также вместе с этими измерениями производится измерение характеристик КЛ либо муфты, например, подобным устройством как E7-22, рассчитанный с целью автоматического замера емкости и индуктивности, также сопротивления на разных диапазонах частоты. Помимо этого, для наиболее углубленного исследования используется контроль избыточной температуры, а для этого уже применяются тепловизионные оборудования [93; 94].



Кабель высоковольтный ААШВ-6



Свинцовые соединительные муфты  
СС-90 и СС-100

Рисунок 3.4 – Объекты для изучения



Рисунок 3.5 – Внешний вид установки для экспериментов

### 3.3 Метрологическое обеспечение измерений

Во время проведения исследований достоверность измерений имеет весьма существенную важность. Поэтому приобретенные данные и полученные значения анализируются и на основе их строится понимание о состоянии рассматриваемого объекта, по этой причине следует, что чем подлиннее произведенные замеры, тем точен конечный итог. В связи с данным следует иметь в виду, что с уменьшением погрешностей растет точность результатов, следовательно, нужно стараться чтобы неточность замеров не превысила заранее установленных пределов, а для этого и определяют две погрешности – относительную и абсолютную. Так, установление погрешности замеров – это ключевая цель в метрологии [95].

Таким образом, метрологическая обработка значений, полученных во время экспериментов, будет проводится согласно [95–98], а также с учетом паспортов или инструкций использующихся приборов.

Отметим, что основными формулами при расчете ошибок прямых измерений будут следующие:

- по формуле 3.1 находится среднее значение  $x$  из проделанного количества замеров  $n$  [98].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.1)$$

- среднеквадратичная ошибка рассчитывается по формуле 3.2 [98].

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}. \quad (3.2)$$

Далее по справочнику в таблице находим коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha(n)}$ , где  $\alpha$  принимаем равным 0,95 – это доверительная вероятность, а остальное зависит от числа проделанных замеров  $n$ . И потом находим погрешность измерений, которая в дальнейшем записывается со знаком  $\pm$  [98; 99].

$$\Delta x = t_{\alpha(n)} \cdot \sigma_x. \quad (3.3)$$

А относительная погрешность уже вычисляется по формуле 3.4 [98].

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \%. \quad (3.4)$$

Обработка и анализ замеренных значений важны, но и ещё необходимо знать метрологические характеристики приборов, используемых во время изучения КЛ. Разберем главные из них для того, чтобы в последующем учитывать погрешность приборных измерений [99].

Как генератор для подачи на исследуемый объект прямоугольного импульса применяли осциллограф марки GOS-620FG. Его внешний вид и также технические характеристики представлены на Рисунке 3.6 и в Таблице 3.1 [100].

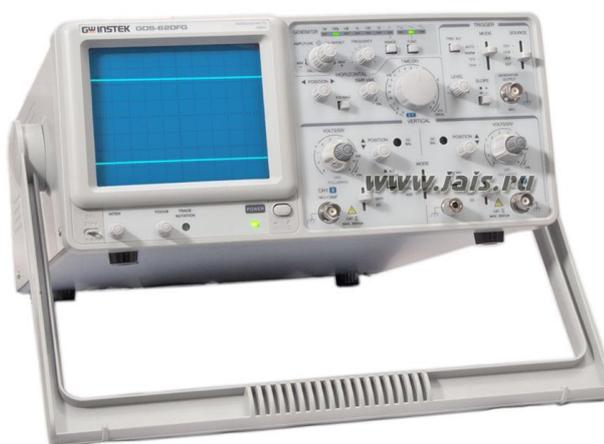


Рисунок 3.6 – Внешний вид осциллографа для подачи импульса

Таблица 3.1 – Характеристики осциллографа марки GOS-620FG [100]

Основные	
Источник питания	115 В/230 В ± 15 %, 50/60 Гц
Необходимая мощность не превышает	45 ВА
Размер экрана	80 x 100 мм
Габариты	310 x 150 x 455 мм
Масса не более	8,0 кг
Канал с вертикальным отклонением	
Напряжение на входе max	300 В (DC+AC, вплоть до 1 кГц)
Регулирование	плавное перекрывание в 2,5 раз
Пропускная способность	от 0 Гц до 20 МГц
Нарастание сигнала	более 18 нс
Электрический импеданс на входе	1 Мом при 25 пФ
Коэффициент отличия	5 мВ/дел
Погрешность	от ± 3 % до ± 5 %
Канал с горизонтальным отклонением	
Коэффициент развертывания	от 0,2 мкс/дел до 0,5 с/дел
Режимы включения развертки	автоколебательный/режим ожидания
Регулирование	плавное перекрывание в 2,5 раз
Погрешность	от ± 3 % до ± 5 %
Процесс синхронизации	
Источник (-и)	каналы 1 или 2, внешний, TV, сеть
Уровень	до 300 В (вплоть до 1 кГц)
Внешний вход	1 МОм при 30 пФ
Вход X-Y	
Пропускная способность	от 0 Гц до 500 кГц
Коэффициент отличия	5 мВ/дел
Разность фаз	менее 30 (от 0 до 50 кГц)
Вход Z	
Частота	от 0 Гц до 2 МГц
Сопротивление на входе	примерно 47 кОм
Многофункциональный генератор	
Частота	от 0,1 Гц до 1 МГц
Сигнал на выходе	прямоугольный, синусоидальный, треугольный
Выход	до 14 В

продолжение Таблицы 3.1 [100]

Регулирование	плавное
Сопротивление на выходе	50 Ом
Коэффициент искажения	менее 2 % при частоте 10 Гц и 100 кГц
Фронт сигнала	менее 120 нс на каждые 50 Ом
Асимметрия сигнала на 1 кГц	$\pm 2 \%$
Смещение	$\pm 6 \text{ В}$

Благодаря прибору марки АСК серии 2108 фирмы АКТАКОМ (Рисунок 3.7) производилась регистрация выходящих сигналов, а также сохранение полученных осциллограмм. Его основные характеристики представлены в Таблице 3.2 [45].



Рисунок 3.7 – Внешний вид прибора для приема сигнала на выходе КЛ

Таблица 3.2 – Основные технические данные прибора АСК-2108 [45]

Параметры дисплея	3,7", жидкокристаллический с 65536 цветов, 640 x 480 точек
Источники питания	аккумулятор (8,5 В, 1,5 А постоянный ток, до 4 ч); адаптер, работающий от сети 50 Гц/60 Гц
Необходимая мощность не превышает	6 Вт
Масса не более	0,6 кг

Этот прибор дает возможность визуально следить за сигналами (Рисунок 3.8) и сохранять их на электронных носителях с целью последующего анализа. Кроме того, АСК многофункционален, в него включен режим осциллографа, погрешность

измерения амплитудных характеристик которого равна  $\pm 3 \%$ , а у характеристик, зависящих от времени –  $\pm 5$  нс от максимального предела каждой характеристики. В Таблице 3.3 представлены более подробные погрешности данного устройства в зависимости от измеряемой величины и её диапазона [45].

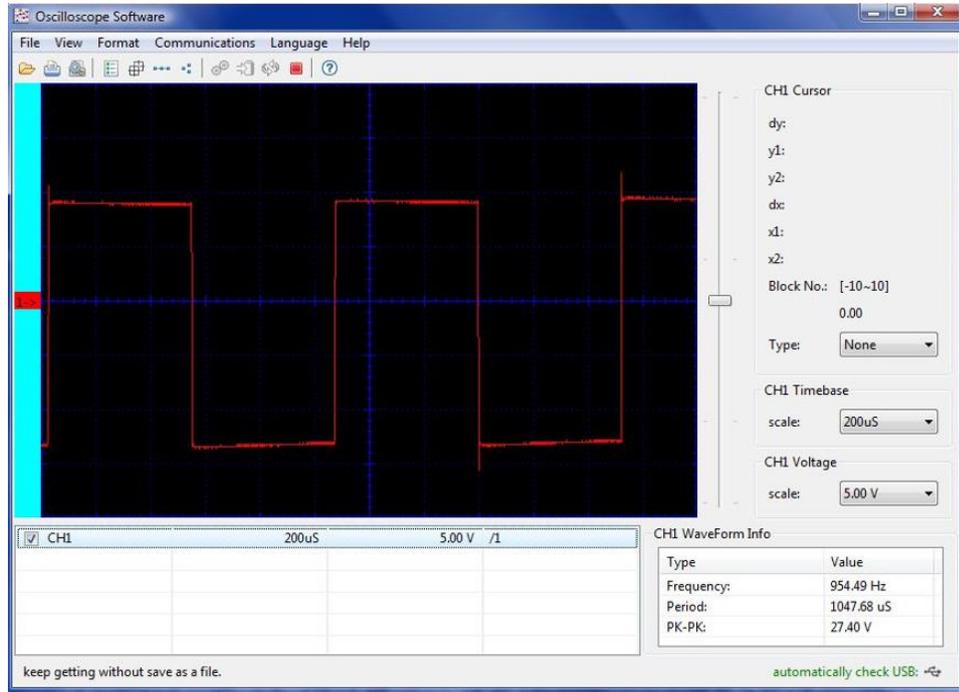


Рисунок 3.8 – Визуализация сигнала на АСК-2108

Таблица 3.3 – Погрешность величин при измерении прибором АСК-2108 [45]

Название величины	Диапазон измерения	Погрешность
Напряжение при токе DC	от 100 мкВ до 400 В	$\pm (1 \% + 1 \text{ е.м.р.})$
	от 400 В до 1 кВ	—
Напряжение при токе AC в пределах частоты от 40 Гц до 400 Гц	от 1 мВ до 400 В	$\pm (1 \% + 3 \text{ е.м.р.})$
	от 400 В до 750 В	—
Ток DC	до 10 мкА	$\pm (1 \% + 3 \text{ е.м.р.})$
	от 10 мкА до 10 А	—
Ток AC	до 10 мкА	$\pm (1,5 \% + 3 \text{ е.м.р.})$
	от 10 мкА до 10 А	—
Сопротивление	от 0,1 Ом до 40 МОм	$\pm (1 \% + 1 \text{ е.м.р.})$
Электрическая емкость	от 10 пФ до 100 мкФ	$\pm (3 \% + 3 \text{ е.м.р.})$

Для замера следующих характеристик как сопротивление, индуктивность, емкость использовался прибор E7-22, предоставляющий возможность производить измерения при разных значениях частоты. Внешний вид этого прибора представлен на Рисунке 3.9, он имеет жидкокристаллический экран, на котором выводятся итоги измерений в виде четырехразрядного числа, также на нем отображаются параметры установленного измерения. В Таблице 3.4 приведены параметры, которые измеряет прибор, а также погрешность его измерения [101].



Рисунок 3.9 – Внешний вид измерительного прибора E7-22

Таблица 3.4 – Погрешность измеряемых параметров прибором E7-22 [101]

Параметры	Погрешность	
Активное сопротивление	на частоте 1 кГц и 120 Гц	$\pm (0,5 \% + 3 \text{ е.м.р.})$ при 2000 Ом / 20 / 200 / 2000 кОм;
		$\pm (0,8 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 200 Ом; $\pm (1,2 \% + 8 \text{ е.м.р.})$ при 20 Ом; $\pm (2 \% + 8 \text{ е.м.р.})$ при 10 МОм
Индуктивность	на частоте 1 кГц	$\pm (0,7 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 200 / 2000 мГн / 20 Гн; $\pm (1 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 мГн / 200 Гн; $\pm (2 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 мкГн; При 2000 Гн не нормируется
		на частоте 120 Гц $\pm (0,7 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 мГн / 20 / 200 Гн; $\pm (1 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 200 мГн / 2000 Гн; $\pm (2 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 мГн

Емкость	на частоте 1 кГц	$\pm (0,7 \% + 3 \text{ е.м.р.})$ при 20 / 200 / 2000 нФ / 20 мкФ, (потери < 0,5); $\pm (1 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 пФ / 200 мкФ, (потери < 0,1); $\pm (5 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2 мФ, (потери < 0,1)
	на частоте 120 Гц	$\pm (0,7 \% + 3 \text{ е.м.р.})$ при 200 / 2000 нФ / 20 / 200 мкФ; $\pm (1 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 нФ / 2 мФ, (потери < 0,1); $\pm (5 \% + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 мФ, (потери < 0,1)
Добротность, тангенс угла диэлектрических потерь	на частоте 1 кГц	$\pm (0,7 \% + 100/C + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 / 200 нФ / 2000 нФ / 20 мкФ; $\pm (1,2 \% + 100/L + 5 \text{ е.м.р.})$ при 200 / 2000 мГн / 20 / 200 Гн; $\pm (2 \% + 100/C + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 пФ / 200 мкФ; $\pm (5 \% + 100/L + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 мГн; $\pm (10 \% + 100/C + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 мкФ; $\pm (10 \% + 100/L + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 мкГн; При 2000 Гн не нормируется
	на частоте 120 Гц	$\pm (0,7 \% + 100/C + 5 \text{ е.м.р.})$ при 200 / 2000 нФ / 20 / 200 мкФ; $\pm (1,2 \% + 100/L + 5 \text{ е.м.р.})$ при 2000 мГн / 20 / 200 Гн; $\pm (2 \% + 100/C + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 нФ / 2 мФ; $\pm (3 \% + 100/L + 5 \text{ е.м.р.})$ при 200 мГн / 2 кГн; $\pm (10 \% + 100/C + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 мФ; $\pm (10 \% + 100/L + 5 \text{ е.м.р.})$ при 20 мГн; При 10 кГн не нормируется

На состояние и работоспособность объекта также оказывает влияние и его тепловое состояние, которое можно определить при помощи прибора, называемым тепловизором, позволяющий наблюдать за температурой исследуемого объекта на его поверхности [52].

В данной работе применялась современная тепловизионная камера фирмы NEC TH-9100, представленная на Рисунке 3.10. Данный прибор бывает различной серии, к примеру, TH-9100 - ML; - ProMV; - WL и так далее, в зависимости от функционала. Основное преимущество данной камеры – это возможность делать термографические отчеты и осуществлять идентификация изменения температуры КЛ. В Таблице 3.5 расписаны основные характеристики тепловизионной камеры в зависимости от выпускаемой серии [102].



Рисунок 3.10 – Внешний вид тепловизионной камеры NEC TH-9100

Таблица 3.5 – Основные характеристики тепловизионной камеры [102]

Характеристики	NEC TH-9100 -	
	Серия - ML / - WL	Серия - ProMV / - ProWV
Сенсор	320 x 240 мм матрица неохлаждаемая с микроболометром	
Диапазон измерений	1) от -30°C до +100°C, от -50°C до +130°C; 2) от 0°C до +300°C, от 0 до +600°C; 3) от +100°C до 800°C, от +300°C до +2000°C; 4) от +300°C до +2000°C	1) от -30°C до +100 °C, от -50°C до +130°C; 2) от 0°C до +300°C, от 0°C до +600°C; 3) от +100°C до +800°C, от +300°C до +2000°C; 4) от +300°C до +2000°C
Чувствительность параметрическая	60 Гц	
	от 0,09°C до 0,2°C	от 0,07°C до 0,09°C
	от 0,05°C до 0,06°C (16 измерений)	от 0,01°C до 0,03°C (64 измерения)
Отображение измерений	до 10 точек измерения, отображение min и max температур и их разности	
Погрешность	± 2°C либо ± 2 %	
Угол поля зрения	21,7° x 16,4°	
Спектр	от 8 мкм до 14 мкм	
Частота развертки	60 кадров/с	
Видеокамера	цветная, 752 x 480 мм, цифровой зум с 4х-кратным увеличением	
Автофокус	30 см – min расстояние	
Масса не более	1,7 кг	

### 3.4 Исследование с помощью разработанного метода комбинированной диагностики для обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ

Перед проведением исследований КЛ были подвержены испытаниям с целью получения опытных образцов, обладающих разными техническими состояниями, о которых упоминалось прежде в разделе 3.1. Данные испытания содержат в себе следующие мероприятия:

- проверка повышенным напряжением;
- контроль на прочность или такое механическое воздействие как навивание;
- термическое влияние или проверка на долговечность, состоящая из резкого охлаждения и нагрева;
- замачивание в воде либо увлажнение [103].

Перечисленное выше предусмотрено таким действующим стандартом, как ГОСТ 18410-73, в котором и расписана процедура исполнения, а также их условия.

Так, например, на Рисунке 3.11 представлена панель прибора для проверки повышенным напряжением, где указано испытательное напряжение для КЛ 6 кВ, оно соответствуют 36 кВ согласно ПТЭЭП или Таблице 1.3 [24; 46; 103].



Рисунок 3.11 – Панель прибора для проверки повышенным напряжением

А на Рисунке 3.12 представлена часть процесса выполнения испытаний.



Рисунок 3.12 – Процесс выполнения испытаний

Полученные числовые данные свели в Таблицу 3.6, из которой следует, что проведенные испытания подвергли к изменению диэлектрических, а соответственно и электрофизических свойств испытуемых образцов [31; 104; 105].

Таблица 3.6 – Итоги испытаний

Измеренные величины	Состояния опытных образцов			
	Поставка от производителя	3 цикла механического воздействия	250 циклов термического влияния	100 циклов замачивания в емкости с водой
$R_{60}$ , МОм	388,1213	235,0697	155,7091	0,3000
$R_{15}$ , МОм	265,8413	188,0059	140,6234	0,3000
$K_{abc}$	1,4599	1,2503	1,1073	1,0000
$C_1$ , нФ	0,0037	0,0032	0,0030	0,0028
$tg\delta_1$	0,0776	0,0800	0,0807	0,0810
$C_{0,120}$ , нФ	0,0042	0,0041	0,0039	0,0037
$tg\delta_{0,120}$	0,0519	0,0620	0,0643	0,0675

Резюмируя вышеизложенное важно отметить, что проведенные испытания помогли выделить три образца КЛ, которые в последующем были использованы для изучения их свойств на разработанной экспериментальной установке, описанной в главе 3.2. Полученные образцы следующие:

- исправный (не подвергался никаким испытаниям, абсолютно новый);
- деформированный (работоспособный, однако имеющий дефекты);
- неисправный (вышел из строя из-за полученного пробоя).

Первый образец соответственно взят за эталон.

Таким образом вышеприведённые испытания ещё раз показали, что во время эксплуатации КЛ 6-35 кВ всевозможные перемены в их состоянии отображаются на электрофизических свойствах и характеристиках, которые могут быть в свою очередь определены при замерах и применяться для последующей оценки текущего состояния КЛ. По этой причине очевидно, что любое влияние на КЛ способствует возникновению и формированию в них повреждений и дефектов, которые также могут быть описаны числовыми или графическими изменениями тех или иных параметров, что ещё раз доказывает возможность применения их с целью установления степени поврежденности КЛ. Так при оценивании состояния КЛ основной задачей станет нахождение предельного состояния также критерия, описывающего данное состояние. Этим критерием будет являться такое значение, нахождение которого сведется к тому, чтобы довести натуральный образец изучаемого кабеля до критического технического состояния, то есть доведение до пробойного состояния, при котором он неработоспособен, либо использовать кабель, который уже вышел из строя на предприятии [52; 68; 104]. Данный аспект и определение предельного состояния отвечает действующим ГОСТам 2990-78 и 18410-73 [106].

Для решения задачи выше предлагается исследование с помощью метода, разработанного на основе комбинированной диагностики, и который содержит в себя следующее [93]:

- способ «черного ящика»;
- измерение технических характеристик и параметров;
- определение теплового состояния [93; 94].

Так, рассматривая КЛ как некую систему или как «черный ящик», который имеет только вход и выход [107], так текущее состояние изучаемого кабеля можно определить по предварительно установленным воздействиям, подающимся на вход. Данным воздействием был выбран сигнал, изображенный на Рисунке 3.13. Сигнал во время исследования подобран простой, и состоит из импульсов, в совокупности представляющих прямоугольную конфигурацию, характеризующийся равными и постоянными амплитудой и частотой, что и соответствует тому, что сигнал назван как периодически прямоугольным [108].

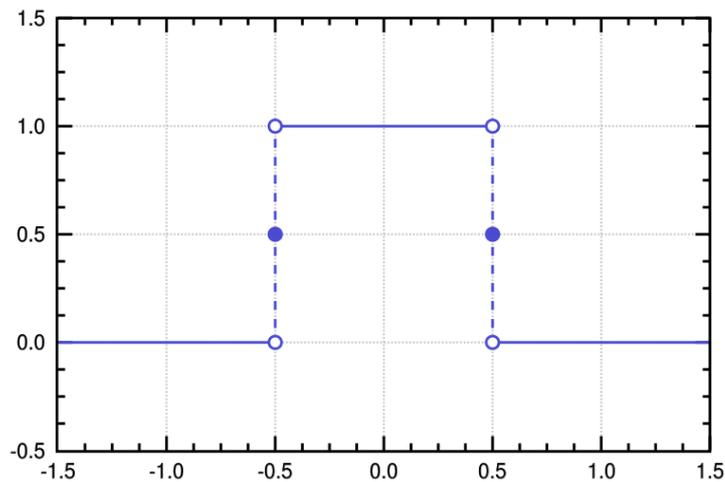


Рисунок 3.13 – Подобранный сигнал для исследования

Концепция данного выбора относительно сигнала состоит в том, что другие формы несинусоидальные либо негармонические. А практика подтверждает тот факт, что в случае если на выходе сигнал периодичный, то и напряжение, и ток периодические на каждом выходе, но следует учитывать, что в различных выходах станут различаться между собой формы сигналов [109; 110].

Согласно данному разделу и разделам 3.1 и 3.2 изучались отрезки образцов кабелей и муфты на опытной установке. На один конец этих образцов подавали генератором единичный ступенчатый прямоугольный сигнал, а на другом конце, то есть выходе, фиксировали его осциллографом. Таким образом задача «черного

ящика» свелась к установлению взаимосвязи между сигналом на входе и итоговым сигналом на выходе кабеля, что эквивалентно нахождению передаточной функции. Дальнейшая идентификация данной функции, а непосредственно определение её корней, дает возможность перевести полученную передаточную в диагностический параметр, при использовании которого допустимо осуществить оценку изменения состояния кабеля или муфты. Кроме того, бесспорным достоинством передаточной считается ее гибкость из-за того, что преобразования можно рассчитывать равно как для непрерывных, так и для дискретных функций времени [111].

Исследование кабеля проводилось при семи следующих значениях частоты: 1 МГц, 100 кГц, 10 кГц, 1 кГц, 100 Гц, 10 Гц, 1 Гц (Рисунки 3.14 и 3.15).

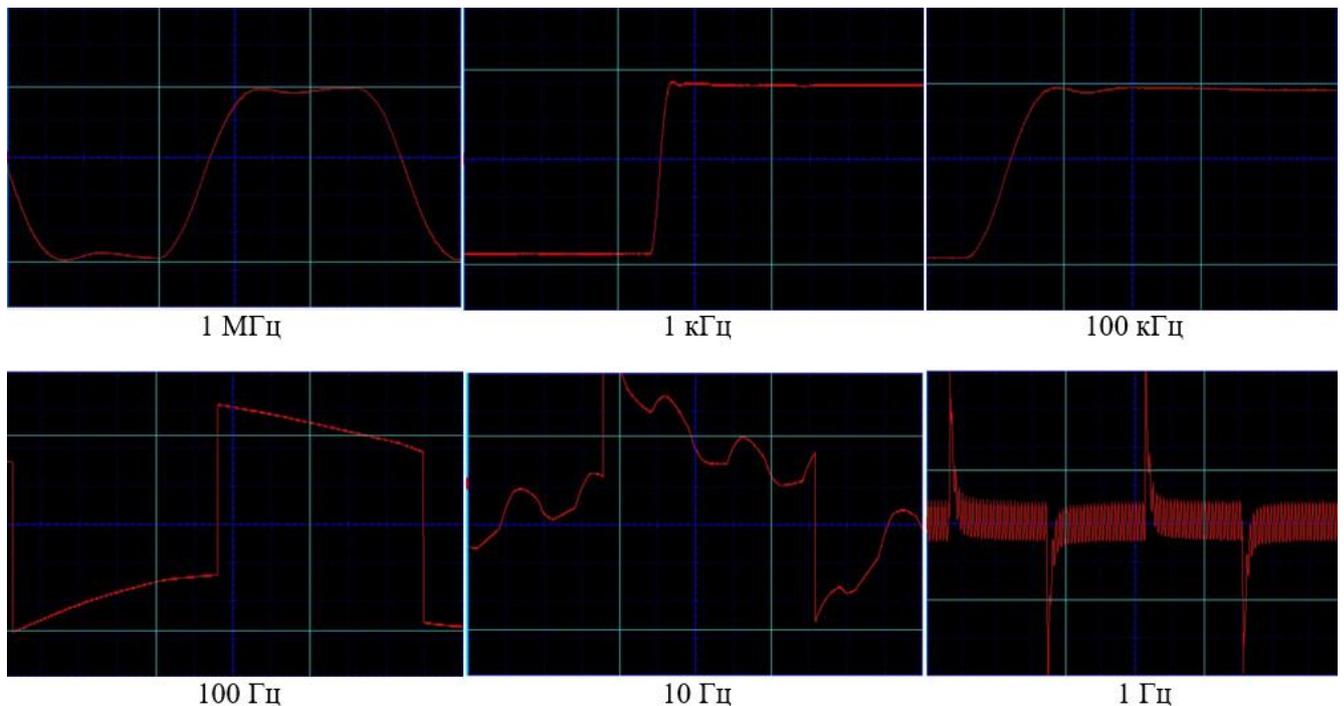


Рисунок 3.14 – Полученные графики во время исследования при разных частотах

Таким образом при помощи опытов была выбрана частота равная 10 кГц, это разъясняется тем, что при других более больших значениях частоты, подаваемых сигналов, колебания попросту проходили по поверхности кабеля. И только при

десяти кГц был заметен и отчетливо зарегистрирован переходной процесс в кабеле, что показано на Рисунке 3.15.

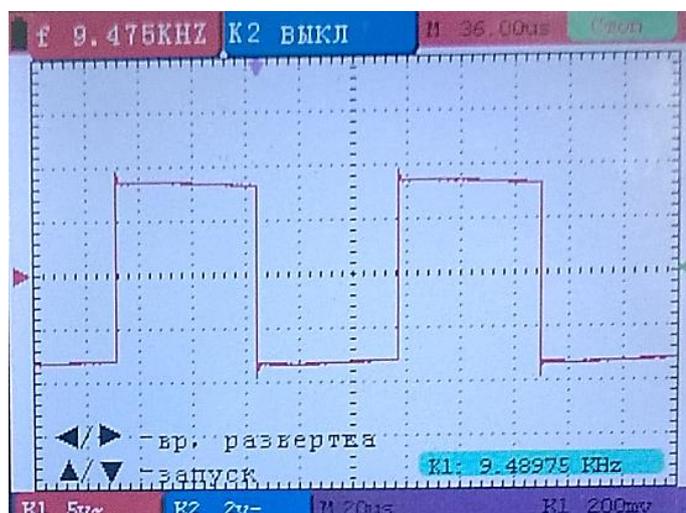


Рисунок 3.15 – Зарегистрированный сигнал при частоте 10 кГц

Благодаря тому, что осциллограф имеет ПО данные, зарегистрированные на выходе изучаемого образца, отображали на экране ноутбука (Рисунок 3.16) [45].

Выбрать	CH1/10	CH2/1	CH3/1	CH4/1	CH5/1	CH6/1
1	24.00					
2	20.00					
3	18.00					
4	22.00					
5	20.00					
6	20.00					
7	20.00					
8	16.00					
9	26.00					
10	28.00					
11	22.00					
12	16.00					
13	20.00					
14	12.00					
15	16.00					
16	18.00					
17	20.00					
18	20.00					
19	20.00					
20	22.00					
21	20.00					
22	20.00					
23	22.00					
24	16.00					
25	22.00					
26	18.00					
27	20.00					

Единицы:(mV)

Сохранить

sequence

ch1

ch2

A

B

C

D

Сохранить как...

Выход

Рисунок 3.16 – Таблица данных в окне программы осциллографа

А потом полученные числовые значения обрабатывались и анализировались для дальнейшего их применения с целью последующей оценки состояния объекта.

При исследовании и контроле технических данных рассматриваемых кабелей производились замеры следующих параметров [112–116]:

1) сопротивление,  $R$ . Характеризует способность изоляции выдерживать без какого-либо пробоя номинальное и рабочее напряжения, что тем самым и делает его одним из основных характеристик КЛ 6-35 кВ. Однако согласно официальным документами он не нормируется для кабелей на напряжение выше 1 кВ, по этой причине определить дефекты КЛ либо их изнашивание, либо другие разрушения изоляции возможно за счет наблюдения за этим параметром, понимая (и опытные наблюдения данное подтверждают), что при ухудшении состояния происходит снижение сопротивления [116];

2) добротность,  $Q$ . Помогает узнать во сколько раз потери энергии меньше, чем запасов, протекающей в исследуемом объекте за одно полное колебание. Во время исследований было установлено, что при присутствии больших потерь, а это эквивалентно ухудшению состоянию кабеля, снижается значение добротности;

3) ёмкость,  $C$ . Кабели за счет своего строения схожи с конденсаторами и по этой причине они также, как и другие имеют разную емкость в зависимости от значения частоты. В ходе проведения опытных исследований был отмечен тот факт, что контролируемый параметр малочувствителен к процессу старения;

4) тангенс угла диэлектрических потерь,  $\text{tg}\delta$ . Определяет состояние качества изоляции, так как ей свойственно изнашивание. Так, исследуя кабель марки ААШв, был получен график зависимости  $\text{tg}\delta$  от частоты, представленный на Рисунке 3.17. Благодаря измерению и контролю  $\text{tg}\delta$  можно оценить состояние изоляции, если она состоит из бумаги и масла, так как её старение сопровождается явным разрушением цепочек молекул и образованию радикал, а это всё в совокупности влияет на такое поглощение как диэлектрическое. Однако важно отметить, что  $\text{tg}\delta$  не всегда может нести за собой информацию, что объясняется его особой чувствительностью к происходящим процессам и к накоплению данных процессов (будь то увлажнение, усыхание и прочее, зависящее от состояния бумаги либо масла) [115].



продолжение Таблицы 3.7

Деформированный образец:						
C, нФ	0,871	0,451	0,454	0,422	0,270	0,424
tg $\delta$	0,309	0,002	0,002	0,082	0,003	0,082
Q	66,920	67,520	66,870	12,700	317,400	15,320
R, МОм	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000	36,000
Неисправный образец:						
C, нФ	1,185	0,455	0,466	0,355	0,274	0,360
tg $\delta$	0,796	0,004	0,004	0,148	0,003	0,150
Q	1,770	261,000	96,000	10,110	207,000	13,500
R, МОм	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500

Аналогично были произведены измерения кабельных муфт (Таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Экспериментально полученные значения по кабельным муфтам

Образец муфты и её параметры	Фаза					
	A	B	C	AB	BC	AC
Исправная муфта						
C, нФ	0,730	0,721	0,700	0,540	0,500	0,540
tg $\delta$	0,002	0,002	0,004	0,034	0,028	0,024
Q	430,000	413,000	413,000	374,000	380,000	414,000
Деформированная муфта:						
C, нФ	0,740	0,710	0,732	0,540	0,550	0,520
tg $\delta$	0,309	0,002	0,018	0,086	0,001	0,082
Q	2,680	529,800	619,200	12,700	317,400	12,300
Неисправная муфта:						
C, нФ	0,450	0,500	0,510	0,370	0,380	0,370
tg $\delta$	0,679	0,049	0,104	0,150	0,012	0,150
Q	1,243	253,400	244,00	6,877	252,000	6,596

Кроме того, в период исследований рассматривалось и тепловое состояние КЛ. Для этой цели использовался такой вид диагностики как тепловизионный, но оценка давалась не сразу, основываясь на показание прибора, а вследствие расчета избыточной температуры  $\Delta T_{0,5}$  согласно приложению 3 документа [92] по формуле.

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left( \frac{0,5 \cdot I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \right)^2. \quad (3.5)$$

Оценивается тепловое состояние изучаемого объекта по числовым областям, в которые входят полученные значения избыточной температуры, рассчитанной по формуле выше. Данным областям соответствуют следующие уровни неполадок:

- от 5°C до 10°C – начальный уровень зарождения неисправности или какого-либо дефекта, необходимо наблюдение и контроль;
- от 10°C до 30°C – развивающийся дефект, необходимо в кратчайшие сроки осуществить мероприятия по его нахождению и устранению;
- выше 30°C – аварийное состояние, что требует неотложного устранения поврежденного участка или полную замену самого объекта на новый [92; 102].

На Рисунке 3.18 представлен тепловой снимок, на котором демонстрируется соединение муфты с КЛ и разброс температур.

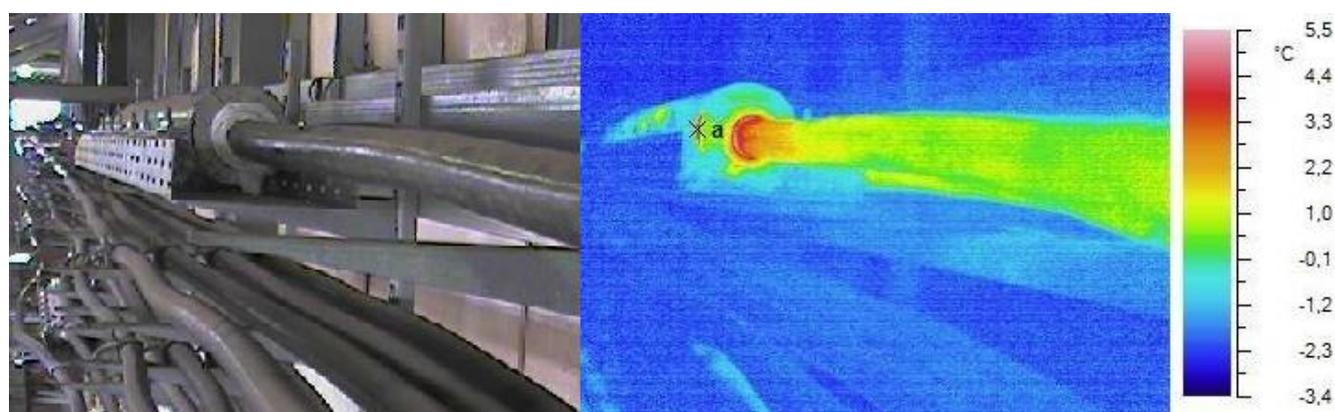


Рисунок 3.18 – Тепловой снимок соединения КЛ с муфтой

Так термографические (тепловые) снимки, представленные на Рисунке 3.19, дают возможность обнаружить локальные перегревы, что может свидетельствовать о присутствии частичных разрядов, образующихся в изоляции КЛ [102].

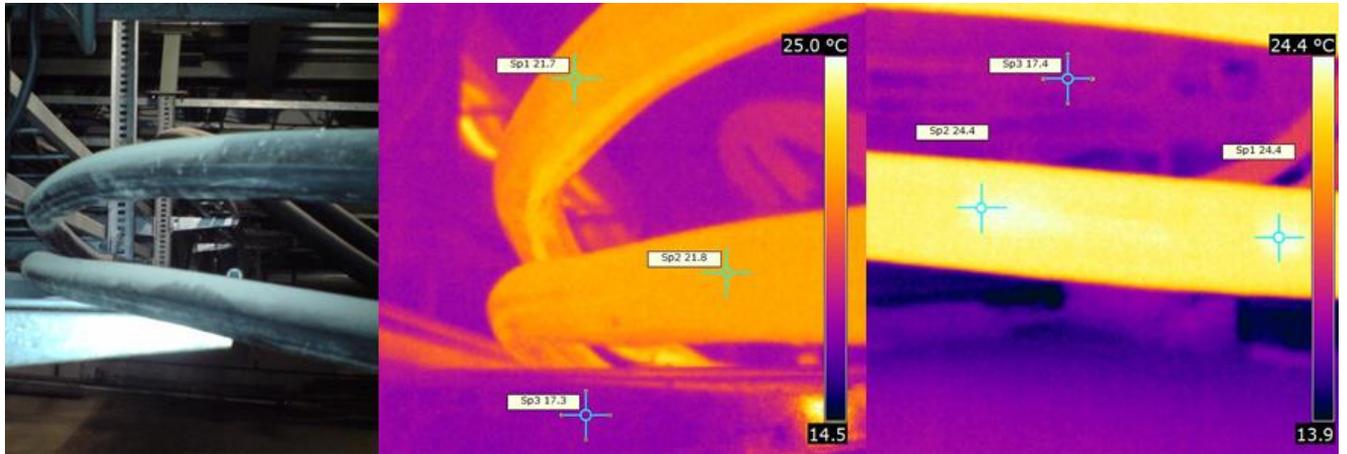


Рисунок 3.19 – Термографический снимок кабеля в цеху марки ААШв-6 3x150

Однако, как показала практика, определение теплового состояния свинцовых муфт, которые дополнительно закрыты корпусом из металла, также КЛ, которые закопаны в земле или расположены в специальных отсеках ячеек высоковольтных, не является возможным (Рисунок 3.20).

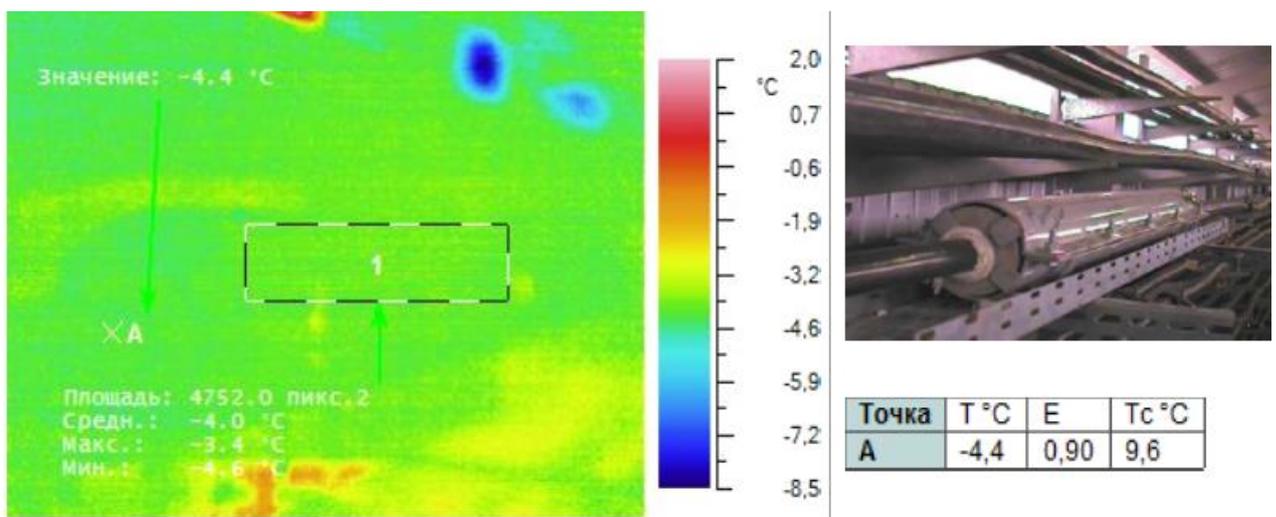


Рисунок 3.20 – Тепловой снимок муфты в металлическом корпусе

### 3.5 Обработка и анализ полученных экспериментальных данных

Обработка полученных результатов во время исследования кабелей и муфт комбинированным методом диагностики в большей степени коснулась способа «черный ящик», так как при определении теплового состояния достаточно расчета по формуле 3.5, а измерение технических характеристик предполагает контроль за параметрами, описанными в разделе 3.4.

Таким образом, обработка и анализ полученных данных в виде откликов на входной сигнал в системе «черный ящик» (Приложение А) состоит в определении передаточной функции, применяя способ динамической идентификации. Для этого эти данные занесли в программный пакет ТАУ 2 (Рисунки 3.21), разработанный ФГБОУ ВО УГНТУ на кафедре АХТП (в настоящее время АТПП) [118].

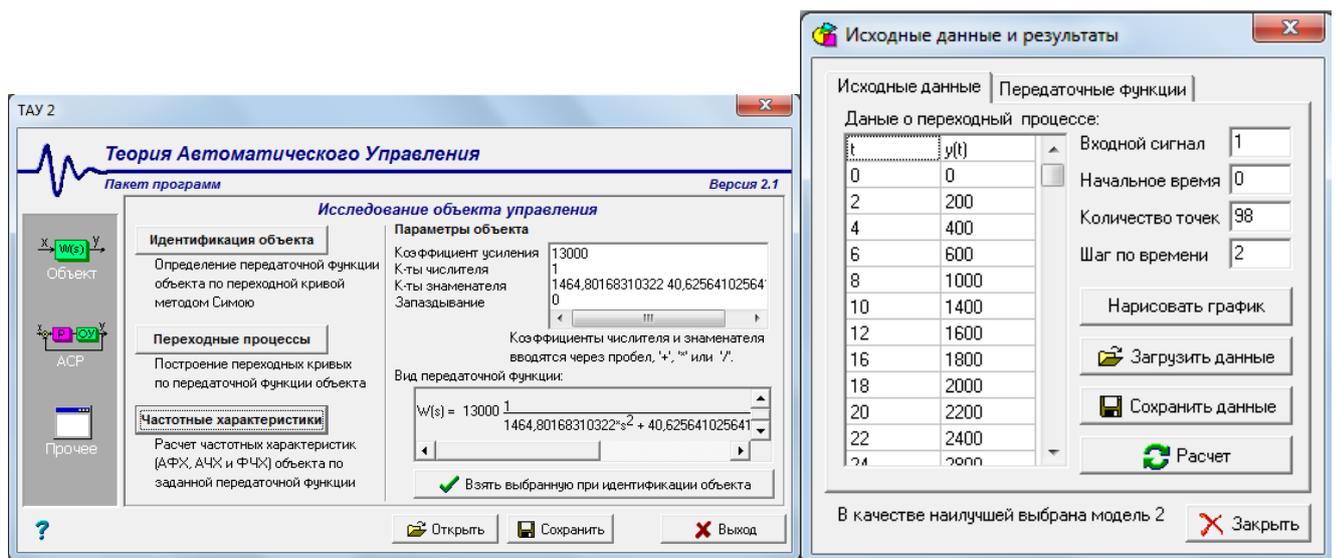


Рисунок 3.21 – Окна программного пакета ТАУ 2 [118]

Итак, определена передаточная функция  $W(p)$ , выражающаяся формулой

$$W(p) = \frac{k}{T^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}, \quad (3.6)$$

где  $k$  – коэффициент преобразования;

$T, T_1$  – постоянные времени.

Далее, для того, чтобы согласно функции  $W(p)$  охарактеризовать состояние исследуемой КЛ выполнен поиск корней (Рисунок 3.22).

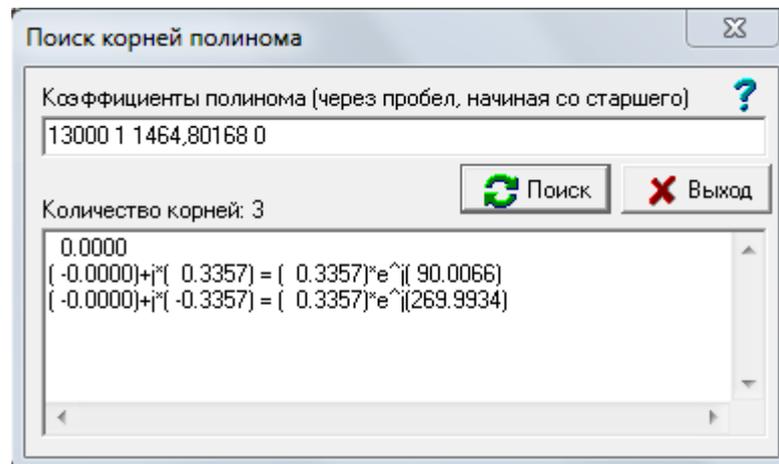


Рисунок 3.22 – Определение корней в программном пакете

С помощью полученных корней и рассмотрения исследуемого объекта как системы возможно определить её состояние, которое либо устойчиво, либо нет. Это заключение базируется на методе распределения на плоскости координат корней полиномиального уравнения. Концепция этого метода заключается в установлении области, что обуславливается степенью устойчивости, если в ней находятся данные корни. Рассматривая с геометрической точки зрения, то суть состоит в нахождении расстояния от координаты корня до мнимой оси. Подобным способом возможно проследить перемещение корней на плоскости. Каждое перемещение скрывает за собой какие-либо изменение рабочих свойств и характеристик кабеля, муфты [119].

Основываясь на первой теории ученого А. М. Ляпунова, система устойчива, если полученные корни данной линеаризованной системы имеют отрицательную действительную часть. Но эта теория работает с учетом того, что на устойчивость никаким образом не оказывают влияние члены более высших степеней отклонения, которые были убраны при проведении линеаризации. Таким образом необходимо

для устойчивости то, чтобы на плоскости все значения корней располагались с левой стороны от мнимой оси, то есть когда корни имеют вид комплексного числа и при этом полностью отрицательные либо достаточно, когда у них действительная часть отрицательна [75; 120].

Что касается границы устойчивости, то она определяется при условии, что, если хотя бы одна пара корней расположена на оси мнимой, а другие – в левой части плоскости. Это возможно только при конкретных числовых значениях уравнения характеристического, таким образом граница разделяет значения коэффициентов этого уравнения на две области: первая область – это где система устойчива, а вторая – неустойчива [121].

Рассматривая неустойчивость отметим, что ей свойственно повышение коэффициента усиления, однако если и при резком его уменьшении устойчивость нарушилась, в таком случае система считается условно устойчивой [120].

Из вышеизложенного можно заключить, что определить состояние кабелей возможно с помощью корневой оценки, представленной на Рисунке 3.23, а именно благодаря расположению полученных корней во время исследований на плоскости, где мнимая ось представляет собой границу устойчивости, и, следовательно, чем ближе размещены значения корней к ней, тем ближе система к этой границе [122].

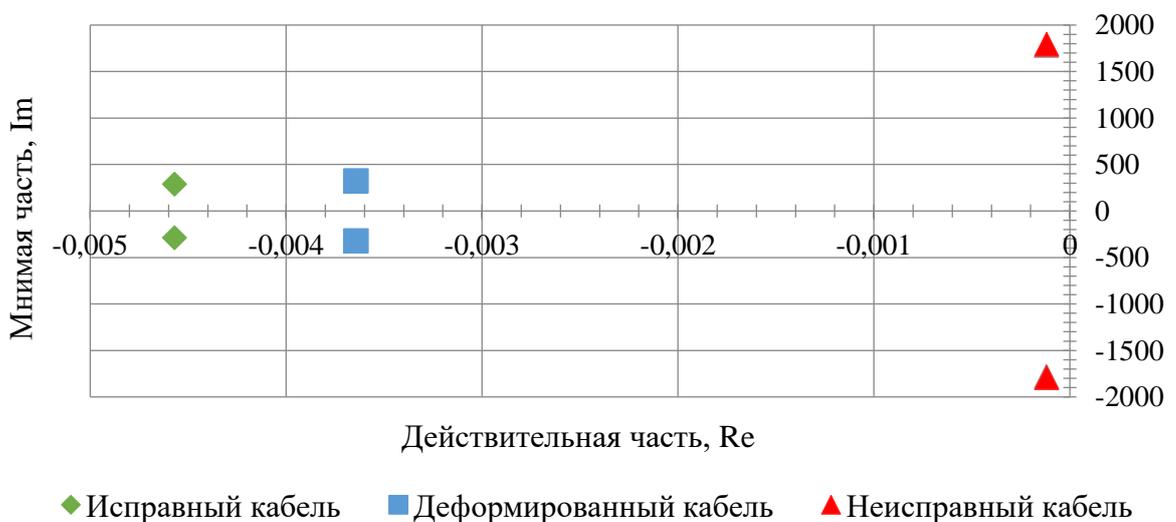


Рисунок 3.23 – Корневая оценка текущего состояния для КЛ

Существует, помимо корневой оценки, ещё метод, который также оценивает техническое состояние по функции  $W(p)$ . В данном методе оценка выполняется с помощью критерия Михайлова, где данный критерий представляет собой анализ кривой и её перемещения на плоскости, связанные с изменениями устойчивости системы. На Рисунке 3.24 представлен график с данным критерием, где видно, что при ухудшении устойчивости происходит смещение кривой, что влечет за собой уменьшение области, а как только кривая оказывается на границе устойчивости, то это указывает о пробое КЛ, в нашем случае, или о его выходе из строя в ближайшее время [123].

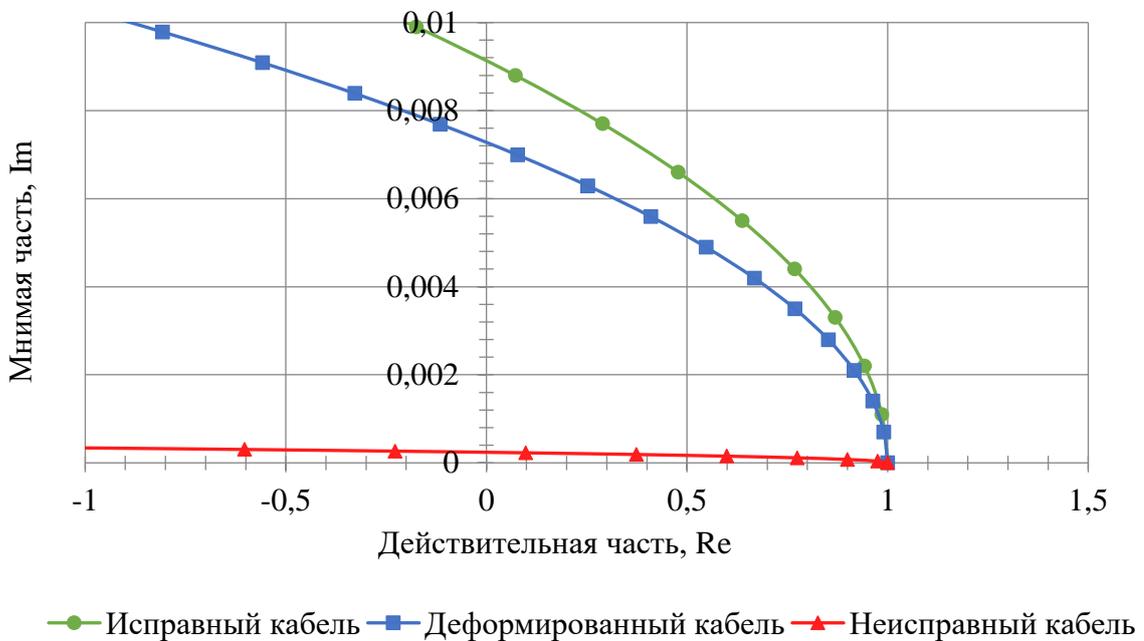


Рисунок 3.24 – Оценка технических состояний образцов кабелей по критерию Михайлова

Анализируя графики безусловен тот факт, что чем меньше ресурса осталось у изучаемого объекта, тем поближе к мнимой оси размещаются корни, подходя к рубежу устойчивости. Из этого следует заключение, объект имеет хуже состояние техническое, чем ближе к границе приближаются значения корней, однако также

допустимо предположение о текущем техническом состоянии, и, следовательно, возможно определить и запас устойчивости [124].

Когда графики корневой оценки построены и определены местоположения корней передаточной функции, проанализировав также рассчитав можно отыскать такую область  $S$ , которая соответствует исправному состоянию кабеля. А опытным путем установить границы области  $S$ , которые отвечают неисправному, то есть критическому состоянию кабеля. Таким образом сравнивая координаты корней исследуемого кабеля с построенными границами областями  $S$  делается заключение о текущем техническом состоянии. В результате выходит количественная оценка, для которой применен метрический метод определения образов. Расстояние между исследуемыми значениями координат и координатами, которые соответствуют исправному или критическому состоянию кабеля, и является критерием для оценки степени поврежденности [124].

Так на Рисунке 3.25 представлено графическое изображение расположения корней на плоскости при корневой оценке. Одним из основных показателей по установлению устойчивости системы является степень устойчивости  $\eta$ , то есть расстояние от мнимой оси до значения координат. Если задать показатель  $\eta_{\text{зад}}$ , то должно выполняться следующее условие (формула 3.7), для того, чтобы состояние кабеля отвечало исправному. Но в случае если условие не выполняется, то кабель либо деформирован (на Рисунке это  $\eta_2$ ), либо неисправен (на Рисунке это  $\eta_1$ ) [125].

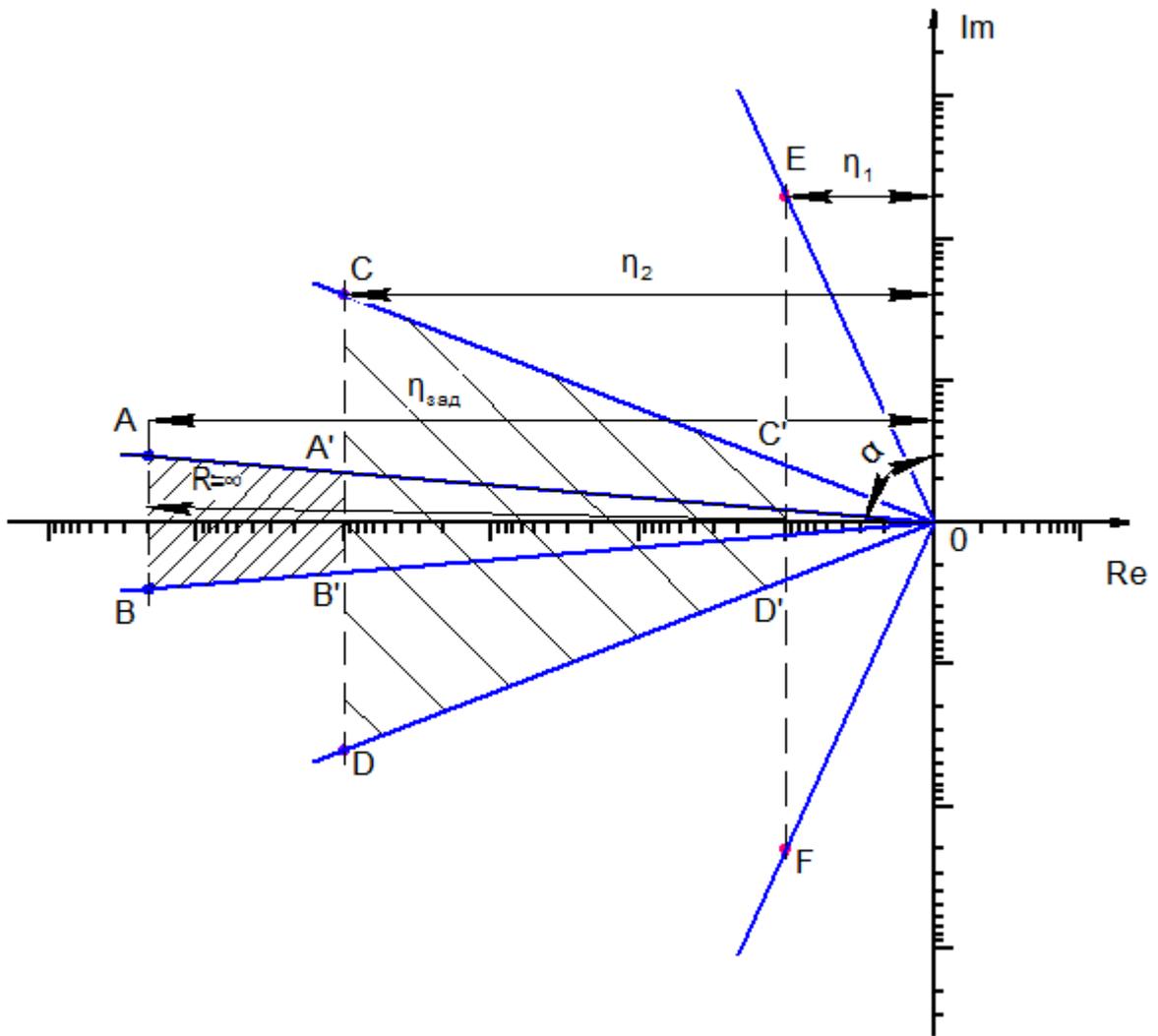
$$\eta \geq \eta_{\text{зад}}. \quad (3.7)$$

Следующий показатель – степень колебательности  $\mu$ , который является минимальным модулем отношения  $X$  к  $Y$ , где  $X$  и  $Y$  – это действительная и мнимая части корней соответственно. Так, согласно Рисунка 3.25,  $\text{tg}\alpha$ , находящийся между лучом  $OA$  и осью  $\text{Im}$ , и является  $\mu$  (формула 3.8) [125; 126].

$$\mu = \min \left| \frac{X}{Y} \right| = \text{tg}\alpha. \quad (3.8)$$

А с учетом формулы 3.8 логично, что  $\alpha = \arctg \mu$ . Таким образом, если корни рассматриваемого кабеля расположены на лучах ОА и ОВ либо по левую сторону от них, то он является исправным. Поэтому для того, чтобы гарантировать запас устойчивости необходимо выполнение условия, представленного формулой 3.9, а полученные границы определяются областью AA'BB' [124–126].

$$\mu \geq \mu_{\text{зад}} \quad (3.9)$$



А и В – координаты исправного кабеля, С и D – координаты деформированного кабеля,  
Е и F – координаты неисправного кабеля

Рисунок 3.25 – Расположение корней на плоскости

Таким образом для оценки состояние КЛ можно учитывать одновременно два вышеописанных показателя.

Так, учитывая условия формул 3.7 и 3.9 и ориентируясь на Рисунок 3.25, была найдена область  $S_{норм}$  исправного состояния КЛ (формула 3.10) [94].

$$S_{норм} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{кр} \leq \arctg \left| \frac{X}{Y} \right| \leq \alpha_{норм}; \\ \sqrt{X_{кр}^2 + Y_{кр}^2} \leq \sqrt{X^2 + Y^2} \leq \sqrt{X_{норм}^2 + Y_{норм}^2} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Аналогично вибрационной диагностике текущее состояние КЛ поделили на три подгруппы с соответствующим им состоянием: первая – «Нормальная» («Не обнаружено повреждение»); следующая – «Удовлетворительная» («Обнаружено незначительное повреждение»); и третья – «Неудовлетворительная» («Обнаружено критическое повреждение»). Таким образом первому состоянию отвечает  $S_{норм}$ , внутри которой расположены корни функции  $W(p)$ . В случае, если корни не принадлежат  $S_{норм}$ , то это другая область, которой равно другое состояние. Так, учитывая ГОСТ 27.002-2015, если уровень поврежденности равен либо приближается к 100 %, то последующая эксплуатация КЛ запрещена, и это отвечает состоянию «Обнаружено критическое повреждение» (подгруппа «Неудовлетворительная»). А область второй подгруппы, если обнаружены незначительные дефекты, была установлена экспериментально и определяется как 20 % от критического состояния. Этому состоянию соответствует расположение корней в области  $S_{уд}$  (формула 3.11) [94; 127; 128].

$$S_{уд} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{кр} \leq \arctg \left| \frac{X}{Y} \right| \leq [\alpha_{кр} + 0,2 \cdot (\alpha_{норм} - \alpha_{кр})]; \\ \sqrt{X_{кр}^2 + Y_{кр}^2} \leq \sqrt{X^2 + Y^2} \leq \sqrt{[X_{кр} + 0,2 \cdot (X_{норм} - X_{кр})]^2 + [Y_{кр} + 0,2 \cdot (Y_{норм} - Y_{кр})]^2} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Из описанного ранее вытекает, что анализ КЛ как «черный ящик» является целесообразным, так как корни передаточной  $W(p)$  несут в себе информацию, что

и делает их информативными диагностическими параметрами. Однако для каждого случая процесс старения и деградации КЛ происходит по-своему, по этой причине необходимо оценивать состояние объекта по диагностическим параметрам вместе (и параметры «черного ящика», и параметры теплового состояния, и технические параметры), так как по одному тесту сделать заключение трудно и неэффективно. Кроме того, для абсолютной достоверности оценки предпочтительно принимать во внимание и учитывать историю эксплуатации, механизмы старения изоляции и динамику деградации для каждой отдельно взятой единицы. В связи с этим, выше выведенные области  $S$  будут учитываться при расчетах в программе, а для полной оценки и её визуализации на мониторе ПК либо операторской панели в перспективе применена многопараметровая динамическая оценка текущего состояния объекта. Эта оценка считается количественной и приведена в виде лепестковой диаграммы на Рисунке 3.26 для кабелей марки ААШв.

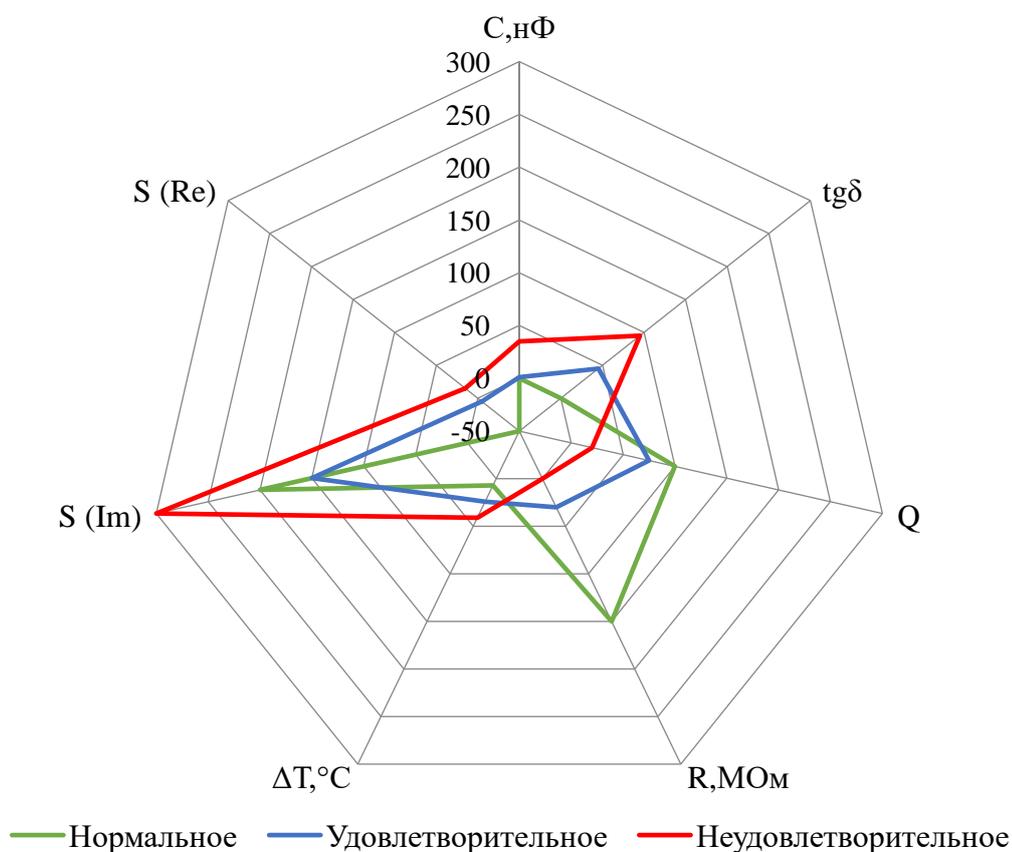


Рисунок 3.26 – Лепестковая диаграмма для оценки состояний кабелей ААШв

Данная диаграмма отражает техническое состояние КЛ в виде 7-лепесткового графика. Она построена на основе полученных результатов исследований, где на каждом луче отложены числовые значения диагностических параметров: тангенс угла диэлектрических потерь,  $\text{tg}\delta$ ; добротность,  $Q$ ; сопротивление,  $R$ ; избыточная температура,  $\Delta T$ ; мнимая,  $S(\text{Im})$ , а также действительная,  $S(\text{Re})$  части корней  $W(p)$ ; емкость,  $C$ . Отсчет параметров идет с середины диаграммы (центр – начало отсчета). Уже указанные координаты лучей соединяются, создавая прямые отрезки. В итоге получили своеобразную паутину, то есть образ, который и описывает состояние диагностируемого кабеля.

Аналогичным образом была построена диаграмма и для оценки состояния исследуемой муфты (Рисунок 3.27).

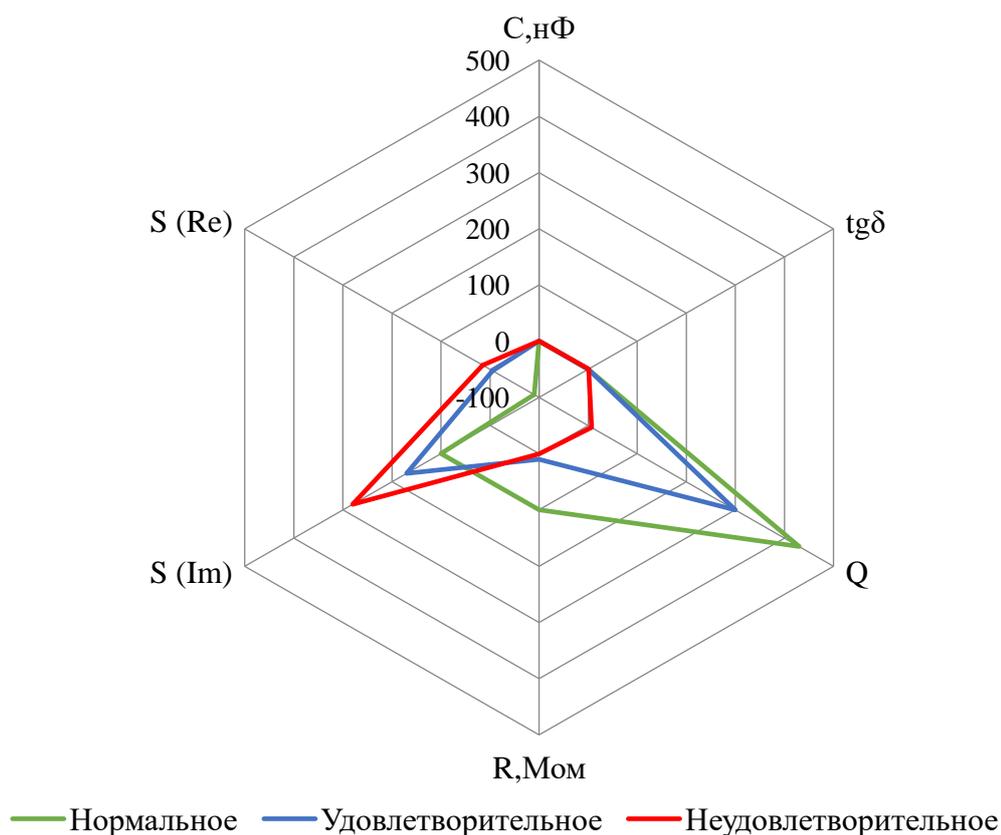


Рисунок 3.27 – Лепестковая диаграмма для оценки состояний муфты СС

Образ «Нормальное» был построен с помощью нанесения числовых значений диагностических параметров исправного кабеля (или муфты) на диаграмму. Таким

образом, этот образ – это состояние неповрежденного объекта. Но если хоть одно значение параметра исследуемой КЛ (либо муфты) выходит за границы данной области, то подразумевается наличие того или иного дефекта и повреждения, тогда состояние определяется благодаря сопоставлению с границами следующих образов «Удовлетворительное» и «Неудовлетворительное» и последующему анализу [129].

Суть вышеизложенного сводится к тому, что данная лепестковая диаграмма дает возможность оценивать техническое состояние диагностируемого объекта с учетом всех диагностических параметров в совокупности, что является одним из её преимуществ.

### **3.6 Исследование кабельных линий 6-35 кВ с целью проверки их соответствия требованиям пожарной безопасности**

Ранее в главе 1 раздел 1.1 упоминалось, что КЛ традиционно считаются более пожароопасными по сравнению с иными установками либо другим оборудованием, в связи с этим было осуществлено исследование на соответствие КЛ требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 31565-2012. Данное исследование проводилось в ФГБОУ ВО УГНТУ на специальной установке, отвечающей ГОСТ ИЕС 60332-1-1-2011. Установка позволяет проводить проверки на нераспространение горения одиночного кабеля, который располагают вертикально и подвергают воздействию пламени от газовой горелки с заблаговременным смешением газов, мощность которой 1 кВт [130; 131]. То есть подразумевается проведение испытания суть которого заключается в том, что распространяет ли материал, из которого кабель изготовлен, горение или нет.

Так, например, при испытании камского кабеля марки ААШв на напряжение 6 кВ (Рисунки 3.28 и 3.29) были получены результаты, которые представлены в Таблице 3.9, где  $D$  – наружный диаметр испытуемого кабеля;  $t$  – время воздействия пламени в зависимости от  $D$ ;  $l_1$  и  $l_2$  – длины от края верхней опоры установки до начала и конца обугленной части соответственно. Эти параметры нормируются

согласно стандарту [132]. Так оценка результатов и вывод по ним сделаны в соответствии с данным ГОСТ [132] (Приложение А).



Рисунок 3.28 – Воздействие пламени на кабель ААШв во время испытаний



Рисунок 3.29 – Внешний вид образцов кабелей после проведения испытаний

Таблица 3.9 – Результаты и выводы после воздействия пламени на образец

Марка кабеля	Параметры				Вывод
	D, мм	t, с	l <sub>1</sub> , мм	l <sub>2</sub> , мм	
ААШВ-6 (3x185)	42,2	120	395	505	Прошел испытание

Суть данного исследования заключалась в определении такого показателя как параметр нераспространения горения  $K_B$ , который имеет следующий вид, согласно формуле 3.12.

$$K_B = f(D, t, l_1, l_2). \quad (3.12)$$

Каждой прокладке КЛ будет соответствовать свой показатель  $K_B$ , что отвечает требованиям ГОСТ ИЕС 60332-3-22-2011.

Данный показатель предлагается принимать во внимание непременно вследствие того, что кабель – это непростая конструкция, имеющая много частей, которые содержат в себе источники тепла, а также зажигания, к примеру, во время аварийных ситуаций, подобных как короткое замыкание, источником может стать жидкий металл, который расплавился. Непосредственно по этой причине из каждой партии кабелей нужно отбирать образцы для проведения испытаний и определения показателя нераспространения горения, а ни в коем случае не просто учитывать материал, из которого он выполнен [133].

Таким образом, учитывая показатель нераспространения горения  $K_B$  кабелей можно заранее в некой степени обеспечить их пожарную безопасность как во время эксплуатации, так и во время аварий за счет проверки соответствия заявленного изготовителем стандарта либо технического условия (ТУ) на тот или иной кабель.

### Выводы по главе

С целью выявления информативных диагностических параметров, которые взаимосвязаны со степенью поврежденности и уровнем дефектов кабелей и муфт

разработана экспериментальная установка в ФГБОУ ВО УГНТУ и проведены исследования. В качестве объектов изучения отобраны часто применяемые на промышленных предприятиях типы кабелей и муфт, такие как ААШв-6, ААБл-10 и СС-90 (110) соответственно. Во время проведения исследования применялась комбинированная диагностика, содержащая в себе измерения и регистрацию электрических параметров и характеристик, теплового состояния и применение системы «черного ящика». Разные технические состояния объектов имитировались путем преждевременного проведения испытаний в соответствии с ГОСТ 18410-73.

Экспериментально установлена форма подаваемого сигнала – это единичный ступенчатый сигнал с прямоугольной формой, с дальнейшей целью регистрации кривой переходного процесса. И опытным путем подобрана частота этого сигнала 10 кГц, при которой был очевидно заметен переходной процесс.

Результаты исследований подтвердили, что в процессе развития дефектов происходят изменения диагностических параметров. И определены их значения, которые отвечают критическому состоянию изучаемых объектов. Также отмечено, что для каждого случая процессы деградации и старения происходят по-своему и это требует рассмотрения диагностических параметров в совокупности.

Также были проведены исследования на соответствие кабелей требованиям пожарной безопасности в условиях воздействия на них пламенем, в результате чего был выведен параметр нераспространения горения. Параметр дает возможность проводить проверку на соответствие заявленного изготовителем стандарта либо ТУ на конкретный тип и марку кабеля.

Для обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ необходим такой критерий, который предоставит возможность интегрировано осуществлять оценку нынешнего состояния кабеля согласно совокупности диагностических параметров, как технического состояния, так и с учетом их показателя нераспространения горения, что в дальнейшем позволит предупреждать чрезвычайные ситуации на предприятиях нефтегазовой отрасли.

## ГЛАВА 4. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6-35 кВ

### 4.1 Формирование интегрального критерия безопасности на основе применения комбинированной диагностики

По каждому способу исследования КЛ, описанному в главе 3, были получены диагностические параметры, из которых и формируется интегральный критерий безопасности, использующийся как критерий оценивания технического состояния КЛ и муфт [52]. Схема формирования представлена на Рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Формирование интегрального критерия безопасности

Таким образом вследствие исследования кабелей и муфт как некие «черные ящики» был выведен интегральный диагностический параметр  $D_{W(p)}$  (формула 4.1), который находится в зависимости от передаточной функции и её корней. Данный параметр дает возможность анализировать процессы, протекающие внутри КЛ, которые оказывают большое влияние на их техническое состояние в общем, однако малозаметных для людских глаз [68].

$$D_{W(p)} = f \left( w_{j0} + \sum_{i=1}^m w_{ji} \cdot (S(Im)_i + S(Re)_i) \right), \quad (4.1)$$

где  $w_{j0}$  – предельный порог;

$m$  – входы для параллельных компонентов;

$w_{ji}$  – вес входа  $i$ , которому соответствует свой нейрон  $j$ .

Отметим, что этот параметр и последующие параметры сформированы через искусственную нейронную сеть (ИНС), а именно через слой Кохонена [134–136]. Нейросеть, основанная на данном слое, состоит из конкретного числа параллельно действующих линейных элементов, или иначе линейных формальных нейронов, имеющих равное количество входов, на которые подаются одни и те же вектора сигналов. А на выходе линейного элемента формируется итоговый сигнал, который и описывается общей формулой Кохонена [135], на основе которой и расписаны интегральные диагностические параметры.

Исследования доказали, что всевозможные дефекты и повреждения, которые несут за собой отклонения от нормальных режимов работы КЛ, оказывают влияние на изменения технических характеристик объекта, которые регламентированы, что со временем приводит к аварийным ситуациям. Чтобы не доводить до критического положения необходимо наблюдать за степенью отклонения данных характеристик от норм. Для этого сформирован нормированный интегральный диагностический параметр  $D_n$ , который определяется формулой 4.2 [117].

$$D_n = f \left( w_{j0} + \sum_{i=1}^m (w_C \cdot C_i + w_{tg\delta} \cdot tg\delta_i + w_Q \cdot Q_i + w_R \cdot R_i) \right), \quad (4.2)$$

где  $w$  – весовой коэффициент для ИНС, который соответствует определенному диагностическому параметру.

А интегральный диагностический параметр, который характеризует тепловое состояние КЛ, рассчитывается по формуле 4.3.

$$D_{t^{\circ}C} = f(\Delta T) = f \left( w_{j0} + \sum (w_T \cdot k_{\Delta T}) \right), \quad (4.3)$$

где  $k_{\Delta T}$  – тепловой коэффициент, определяет на сколько процентов повысилась температура от заданного значения.

Важно принимать во внимание данный интегральный параметр, потому что изоляция должна выдерживать максимальную температуру внешней среды, также режим наибольшей нагрузки во время эксплуатации, что сопровождается резким ростом температуры. Вышеописанное касается любого вида кабеля [137].

Далее с учетом вышеописанных интегральных диагностических параметров также применяя ИНС выведем интегральный критерий, который поможет оценить технического состояния КЛ в настоящий момент диагностики. Данный критерий определяется по формуле 4.4.

$$I = \delta_{W(p)} \cdot D_{W(p)} + \delta_n \cdot D_n + \delta_{t^{\circ}C} \cdot D_{t^{\circ}C}, \quad (4.4)$$

где  $\delta_{W(p)}$ ,  $\delta_n$ ,  $\delta_{t^{\circ}C}$  – коэффициент или «вес», который устанавливает значимость соответствующего ему параметра. Имеет пределы значений от 0 до 1. Вводится с применением такого метода как экспертная оценка.

Ряд исследователей отмечает, что приблизительное состояния КЛ возможно уже установить, зная их срок службы, который во многом определяется степенью и культурой сервиса КЛ эксплуатирующей организацией. По этой причине с целью

наиболее точной и достоверной оценки текущего состояния и для более надежного обеспечения безопасности КЛ напряжением 6-35 кВ на предприятиях предлагается рассматривать не только лишь критерий I, но и также учитывать такие показатели как срок службы и условия во время эксплуатации, показатель нераспространения горения, рассмотренный в разделе 3.6 данной диссертации. Данные показатели выступают в первую очередь как добавочные уточняющие характеристики, которые хорошо определяют примененный материал для кабеля и его конструкцию [138].

В итоге благодаря вышеописанному интегральному критерию и показателям составим математическую модель, которая посредством нейросети и формирует  $I_{\Sigma}$  – интегральный критерий безопасности для КЛ 6-35 кВ (формула 4.5).

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m (\delta^j \cdot I_i + q^j \cdot K_{Bi} + g^j \cdot r_i), \quad (4.5)$$

где  $r_i$  – коэффициент срока эксплуатации;

$\delta^j$  – коэффициент («вес»), определяющий важность критерия I для j-го кабеля;

$q^j$  – коэффициент («вес»), определяющий важность показателя  $K_B$  для j-го вида кабеля;

$g^j$  – коэффициент («вес»), определяющий важность коэффициента  $r_i$  для j-го вида кабеля.

Коэффициенты («веса»)  $\delta^j$ ,  $q^j$ ,  $g^j$  устанавливаются в процессе экспертного оценивания. А  $r_i$  определяется ИНС, в которую на основании экспериментальных исследований и расчетов заранее задали числовые коэффициенты в зависимости от времени эксплуатации кабеля, к примеру, если кабель вводится в эксплуатацию впервые то ему отвечает число 0, если эксплуатируется более 30 лет, то 1. Данные коэффициенты значимы, так как пробои кабелей непосредственно взаимосвязаны с материалом, из которого они изготовлены, также с условиями их эксплуатации, поэтому принимать во внимание данные сведения немаловажно при проведении оценки их состояния и дальнейшего обеспечения безопасности [134; 139].

Опираясь на известную шкалу экспертной оценки для оборудования и машин критерий  $I_{\Sigma}$  был поделен на следующие уровни (Рисунок 4.2) [140]. Основываясь на ГОСТ 27.002-2015 установлено, что уровень, равный 100 %, отвечает такому состоянию КЛ, когда дальнейшее их использование не разрешено.

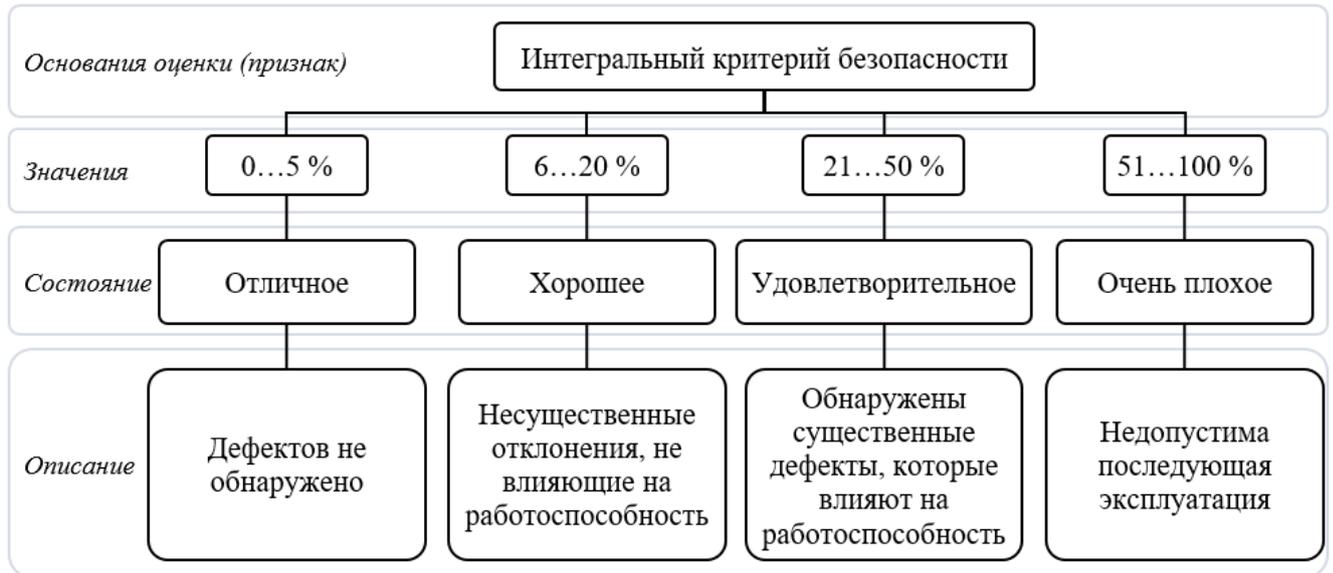


Рисунок 4.2 – Значения  $I_{\Sigma}$ , которым соответствует техническое состояние КЛ

А с целью комплексной оценки можно применить абсолютный показатель, выраженный формулой 4.6. Показатель А и критерий  $I_{\Sigma}$  с величиной материального ущерба  $Y$  (ущерб принимается в расчет только тот, который был причинен во время чрезвычайной ситуации из-за кабеля напряжением 6-35 кВ) находятся в обратной пропорциональной зависимости. Благодаря этому А возможно вычислить согласно прошедшим авариям.

$$A = \frac{1}{I_{\Sigma} \cdot Y}. \quad (4.6)$$

В совершенстве если снимать все требуемые характеристики на одном и том же образце кабеля через равные интервалы времени в течении его эксплуатации, то в таком случае в дальнейшем может стать допустимо применение  $I_{\Sigma}$  и А с целью

ранжирования КЛ напряжением 6-35 кВ по их текущему состоянию, а это позволит создать управленческие постановления или решения, которые ориентированы на увеличение энергобезопасности компаний нефтегазовой отрасли [141–143].

#### 4.2 Программно-аппаратного комплекса для реализации разработанного метода оценки технического состояния и обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ

Основной целью разработанного метода является контроль за состоянием КЛ и предупреждение аварийных обстановок, связанных с их отказом либо пробоем. Поэтому данный способ (патент РФ на изобретение № 2729173), основанный на комбинированной диагностике, имеет важный принцип, суть которого состоит из поочередной и систематичной регистрации информативных параметров, а также в наблюдении за изменениями параметров и в их сопоставлении с первоначальными значениями (Приложение Б). Предлагается программно-аппаратный комплекс для реализации этого, структурная схема которого приведена Рисунке 4.3 [94; 144].



Рисунок 4.3 – Структурная схема комплекса для установления состояния КЛ

Одной из первоочередных задач данного программного комплекса является сбор сведений и также предварительная обработка имеющихся данных. Это нужно для следующего шага. Он предполагает анализ сведений и обучение машины на интеллектуальном уровне. Алгоритм первичной обработки показан на Рисунке 4.4.

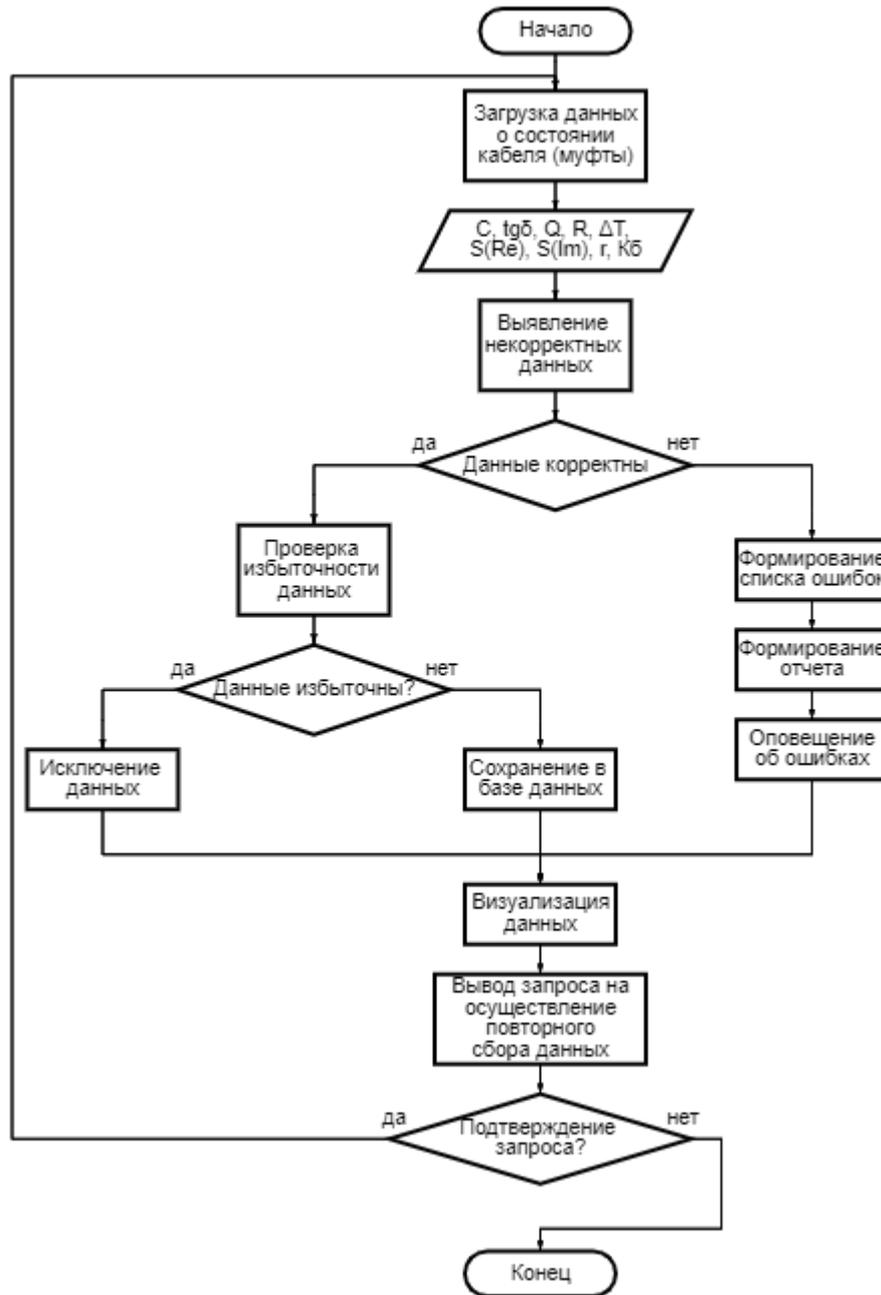


Рисунок 4.4 – Алгоритм первичной обработки данных

Затем сохраненные в базе данные применяются для оценки состояния КЛ. И

для этого процесса также собран алгоритм, нижеприведенный на Рисунке 4.5.

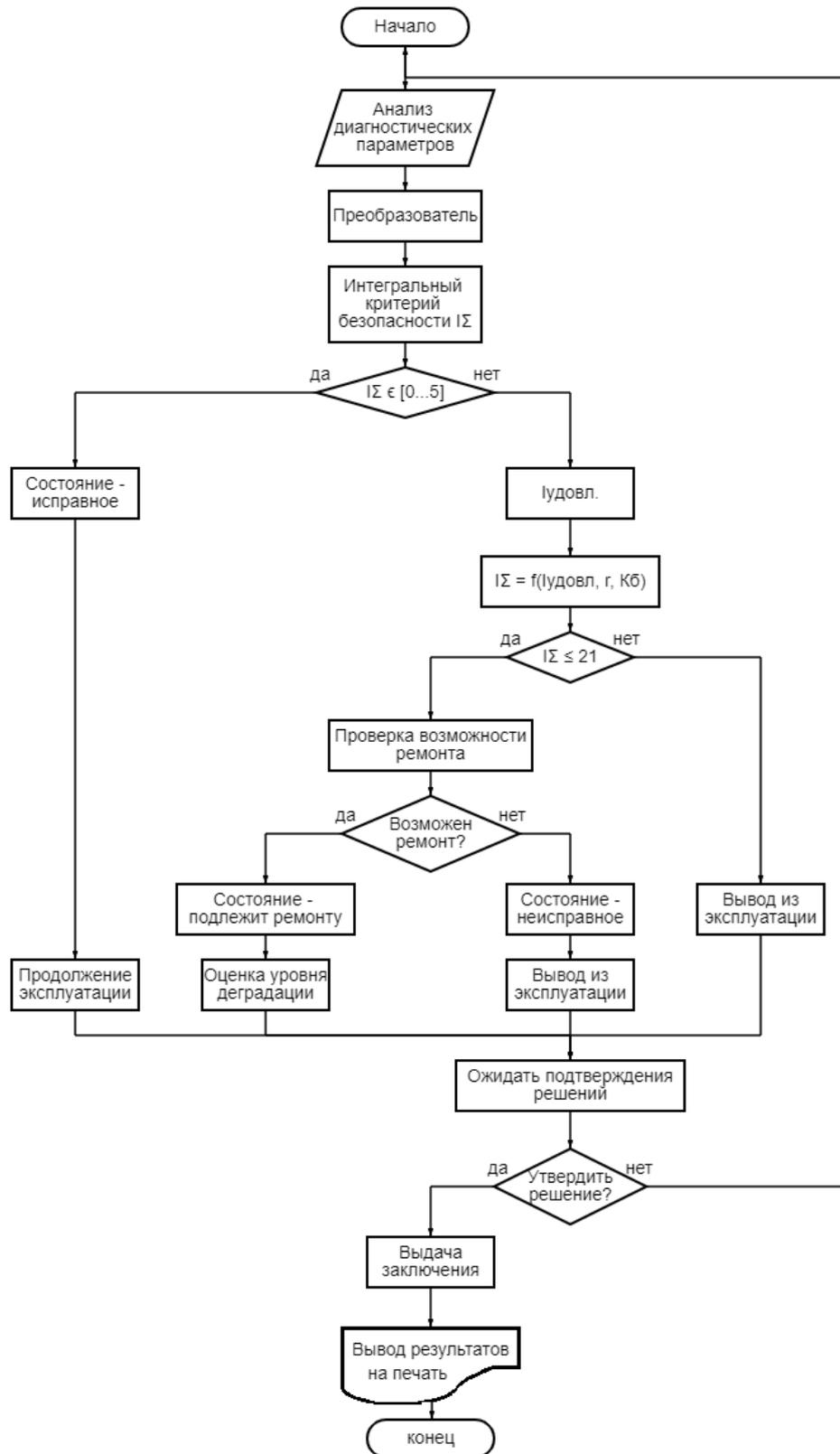


Рисунок 4.5 – Алгоритм принятия решения о дальнейшей эксплуатации КЛ

В узле, который описан алгоритмом выше, проходит отбор и формирование оптимальных решений и заключений. Во время этого процесса либо согласно итога оператор имеет возможность сделать запрос на обоснование хода решений, в связи с этим система дает визуализацию разъяснения действий, представленную в виде лепестковой диаграммы.

С целью первоначальной обработки измеренных данных были использованы подручные ресурсы и известные математические программные комплексы [145; 146]. А уже для обработки диагностических опытных данных было разработано программное обеспечение под названием «Оценка технического состояния кабельных линий». Окна самой программы презентованы на Рисунке 4.6.

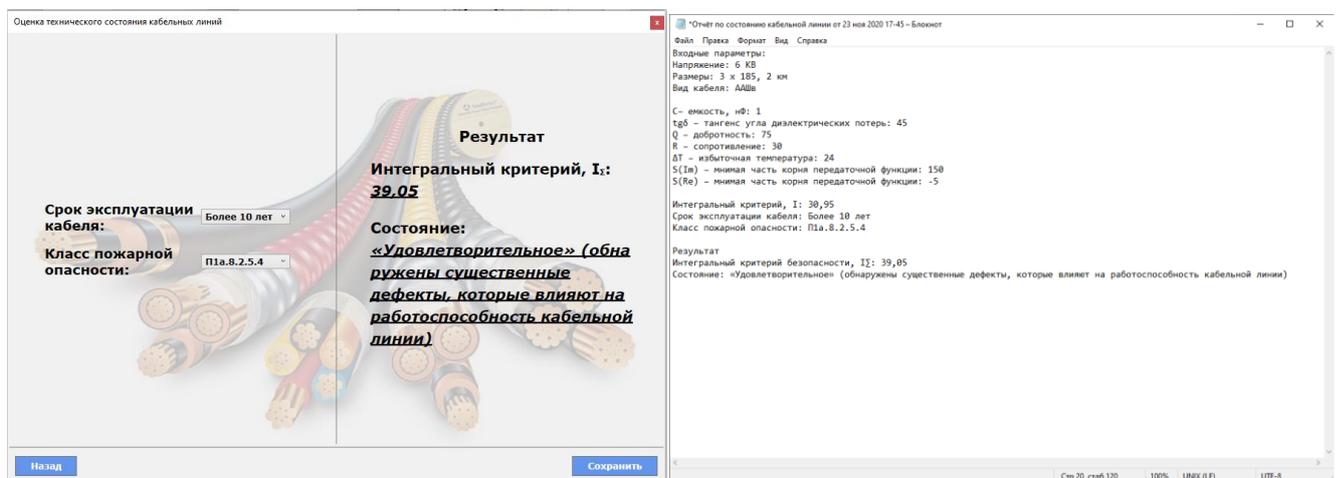
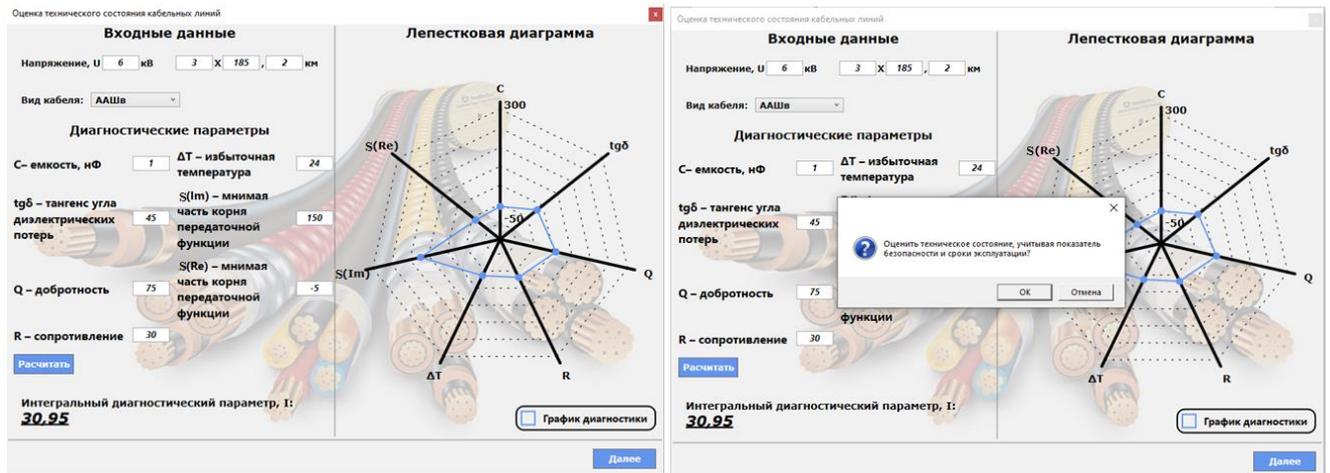


Рисунок 4.6 – Оконные интерфейсы программы

Данная программа создана на основе наблюдений и анализа приобретенных опытных параметров и их взаимосвязях. Для её разработки применена среда в виде языка программирования C Sharp, иначе C#. На Рисунках 4.7 – 4.9 представлены основные элементы (части) листинга программного кода [147; 148].

```

10 1 reference
11 public partial class StartPage : Page
12 {
13     16 references
14     public MainViewModel MainViewModel => (MainViewModel)DataContext;
15     1 reference
16     public StartPage()
17     {
18         InitializeComponent();
19     }
20
21     0 references
22     public void GenerateLineClick(object sender, RoutedEventArgs e)
23     {
24         var result = MainViewModel.ValidateParams();
25         if (result.Equals("OK"))
26         {
27             MainViewModel.AddLineClick();
28             MainViewModel.CalculateIntegralParameter();
29         }
30         else
31         {
32             MessageBox.Show(result);
33         }
34     }
35
36     0 references
37     private void DoneClick(object sender, RoutedEventArgs e)
38     {
39         if (string.IsNullOrEmpty(MainViewModel.IntegralParameter))
40         {
41             MessageBox.Show("Для продолжения необходимо рассчитать интегральный диагностический параметр");
42             return;
43         }
44         if (string.IsNullOrEmpty(MainViewModel.Voltage) || string.IsNullOrEmpty(MainViewModel.CableLineWidth) || string.IsNullOrEmpty(MainViewModel.CableLin
45         {
46             MessageBox.Show("Необходимо заполнить все поля");
47             return;
48         }
49         var result = MessageBox.Show("Оценить техническое состояние, учитывая показатель безопасности и сроки эксплуатации?", "", MessageBoxButton.OKCancel,
50         if (result == MessageBoxResult.OK)
51         {
52             MainViewModel.SelectedClassFire = null;
53             MainViewModel.SelectedLifetimeCable = null;
54             MainViewModel.IntegralCriterion = string.Empty;
55             MainViewModel.CableLineStyle = string.Empty;
56         }
57     }
58 }

```

### а) начальная страница (start page)

```

52 var integralcriterionBlock = new TextBlock()
53 {
54     FontWeight = FontWeights.Bold,
55     FontSize = 20,
56     LineHeight = 30,
57     TextWrapping = TextWrapping.Wrap
58 };
59 integralcriterionBlock.Inlines.Add("Интегральный критерий, I");
60 integralcriterionBlock.Inlines.Add(new Run("I") { FontSize = 10 });
61 integralcriterionBlock.Inlines.Add(" ");
62 integralcriterionBlock.Inlines.Add(new Run(MainViewModel.IntegralCriterion) { TextDecorations = TextDecorations.Underline, FontStyle = FontStyles.Italic });
63
64 var integralcriterionGrid = new Grid
65 {
66     Margin = new Thickness(20, 20, 20, 0)
67 };
68 integralcriterionGrid.Children.Add(integralcriterionBlock);
69 ResultStackPanel.Children.Add(integralcriterionGrid);
70
71 var stateBlock = new TextBlock()
72 {
73     FontWeight = FontWeights.Bold,
74     FontSize = 20,
75     LineHeight = 30,
76     TextWrapping = TextWrapping.Wrap
77 };
78 stateBlock.Inlines.Add("Состояние: ");
79 stateBlock.Inlines.Add(new Run(MainViewModel.CableLineStyle) { TextDecorations = TextDecorations.Underline, FontStyle = FontStyles.Italic });

```

### б) страница расчета состояния (final state calculator page)

Рисунок 4.7 – Листинг кода страниц программы (pages)

```

173 //Расчёт состояния кабельной линии
174 public void CalculateCableLinesState()
175 {
176     Constants.CableLifetimes.TryGetValue(SelectedLifetimeCable, out double lifetimeCableValue);
177     Constants.ClassFireTypes.TryGetValue(SelectedClassFire, out double classFireValue);
178
179     var IntegralCriterionValue = (Constants.WeightingFactorIntegralParameter * double.Parse(IntegralParameter)) + (Constants.WeightingFactorLifetime * lifetimeCabl
180
181     for (int i = Constants.CableLineStates.Count - 1; i >= 0; i--)
182     {
183         var stateValue = Constants.CableLineStates.ElementAt(i).Value;
184
185         if (IntegralCriterionValue >= stateValue)
186         {
187             IntegralCriterion = IntegralCriterionValue.ToString();
188             CableLineStyle = Constants.CableLineStates.ElementAt(i).Key;
189             break;
190         }
191     }
192 }
193
194 //Проверка диагностических параметров на их корректность
195 public string ValidateParams()
196 {
197     var message = "OK";
198
199
200     if (string.IsNullOrEmpty(Capacity) || string.IsNullOrEmpty(Tangent) || string.IsNullOrEmpty(Quality) || string.IsNullOrEmpty(Resistance) || string.IsNullOrEmpty
201     {
202         return "Поля диагностических параметров не могут быть пустыми";
203     }
204
205     double.TryParse(Capacity, out double capacity);
206
207     if (capacity < 0.1)
208     {
209         return "C - емкость не может быть меньше 0.1";
210     }
211
212     double.TryParse(Tangent, out double tangent);
213
214     if (tangent < 0.00000009)
215     {
216         return "tgδ - тангенс угла диэлектрических потерь не может быть меньше 0.00000009";
217     }
218
219     double.TryParse(Quality, out double quality);

```

Рисунок 4.8 – Модуль основного вида (main view models)

```

8 public static List<string> CableTypes = new List<string>
9 {
10     "АВВГ",
11     "ВВГ",
12     "АВВГ-П",
13     "ВВГ-П",
14     "АВВГнг(А)",
15     "ВВГнг(А)",
16     "АВВГ-Пнг(А)",
17     "АВБШв",
18     "ВБШв",
19     "ААШв",
20     "КГ",
21     "АКПВГ",
22     "ПвБШв",
23     "ПВГ"
24 };
25
26 //значения классов безопасности
27 private static readonly double ClassFireVal1 = 0.2;
28 private static readonly double ClassFireVal2 = 0.6;
29 private static readonly double ClassFireVal3 = 0.6;
30 private static readonly double ClassFireVal4 = 0.8;
31 private static readonly double ClassFireVal5 = 1.0;
32 private static readonly double ClassFireVal6 = 0.4;
33 private static readonly double ClassFireVal7 = 0.2;
34
35 //классы безопасности
36 public static Dictionary<string, double> ClassFireTypes = new Dictionary<string, double>
37 {
38     {
39         { "01.8.2.5.4", ClassFireVal1 },
40
41         { "П1а.8.2.5.4", ClassFireVal2 },
42         { "П1б.8.2.5.4", ClassFireVal2 },
43         { "П2.8.2.5.4", ClassFireVal2 },
44         { "П3.8.2.5.4", ClassFireVal2 },
45         { "П4.8.2.5.4", ClassFireVal2 },
46
47         { "П1а.8.2.2.2", ClassFireVal3 },
48         { "П1б.8.2.2.2", ClassFireVal3 },
49         { "П2.8.2.2.2", ClassFireVal3 },
50         { "П3.8.2.2.2", ClassFireVal3 },
51         { "П4.8.2.2.2", ClassFireVal3 },

```

Рисунок 4.9 – Листинг констант статического класса (является пополняемым)

```

103 // Состояния кабельных линий. Второй параметр - минимальный процент вхождения
104 public static Dictionary<string, double> CableLineStates = new Dictionary<string, double>
105 {
106     { "«Отличное» (дефектов на кабельной линии не обнаружено)", 0 },
107     { "«Хорошее» (несущественные отклонения, не влияющие на работоспособность кабельной линии)", 6},
108     { "«Удовлетворительное» (обнаружены существенные дефекты, которые влияют на работоспособность кабельной линии)", 21},
109     { "«Очень плохое» (недопустима последующая эксплуатация кабельной линии)", 51 },
110 };
111
112 //Весовой коэффициент учета важности I для кабельной линии j-го вида (по умолчанию ставим 1, если не важен данный параметр, то 0)
113 public static int WeightingFactorIntegralParameter = 1;
114
115 //Весовой коэффициент учета важности срока и условия эксплуатации кабельной линии j-го вида(по умолчанию прописываем 1)
116 public static int WeightingFactorLifetime = 1;
117
118 //Весовой коэффициент учета важности КБ для кабельной линии j-го вида (по умолчанию 1)
119 public static int WeightingFactorClassFire = 1;

```

Рисунок 4.10 – Весовые коэффициенты для расчета итогового критерия

Для реализации поставленной задачи, определения и расчетов интегральных критерий, использовалась модель нейросети Кохонена. Одним из главных отличий данной сети – это принцип, при котором нейрон, получивший в сумме наибольший вес одерживает победу, то есть имеется правило «Победитель берет всё». В таком случае максимальный сигнал (в данной работе важный параметр) преобразуется в 1, а другие в 0. Так как сеть функционирует с числами в отрезке  $[0;1]$ , но входные сведения даются ранее проанализированными в процентах от значений идеального (эталонного) кабеля, то в таком случае в программе применяется нормализация в виде автоопределения видов полей и их нормализации, но если она не проходит, то прописывается вручную [135; 148].

Помимо этого, яркой особенностью сети является то, что она обучаемая. В ней нейроны практически расположены в пространстве данных, при этом нет никаких дополнительных сумматоров и многого другого. Так нейрон интерпретируется как диагностический параметр (их обычно большое число), но затем, и как критерий безопасности, которому он и обучился. Для самого обучения используется эталон и в программе указываются его значения на входе и желаемые значения на выходе. Окончательные множества указываются в процентах. Потом описывается состав и структура сети, очередность учета параметров и их количество. Немаловажное при обучении понимать условия, при которых обучение обязано закончиться [134].

Резюмируя вышеописанное можно сделать вывод, что суть хода обучения – это ничто иное как изменение и подбор весов связей нейронов.

Итак, на Рисунке 4.11 приведен листинг кода для обучения разработанной программы.

```

24 public void Study(int[] input, int correctAnswer)
25 {
26     var neuron = _neurons[correctAnswer];
27     for (var i = 0; i < neuron.IncomingLinks.Length; i++)
28     {
29         var incomingLink = neuron.IncomingLinks[i];
30         incomingLink.Weight = incomingLink.Weight + 0.5 * (input[i] - incomingLink.Weight);
    }

```

Рисунок 4.11 – Листинг процесса обучения

Далее происходит процесс идентификации степени поврежденности КЛ, он осуществляется за счет ранее сформированной базы в ИНС. База очень важна и чем она больше, тем достовернее итоговые результаты. Ввод данных, таких как тип и наименование кабеля, параметры и в зависимости от них степень повреждения, для базы возможен с помощью ручного набора с клавиатуры. Также обязательно в базу указать заранее возможные классы пожарной опасности согласно ГОСТу, которым, во время обучения, присваиваются свои веса. Затем происходит в программе расчет и анализ, потом выдается результат в виде отчета. Так, если при вводе исходных данных и расчете получается итоговое число, которому уже соответствует ранее известный уровень или степень дефектности, то цикл идентификации оканчивается и выдается результат итоговый, а если – нет, то придется ввести в ручном режиме, где это сохранится уже в базе.

Отчет программа сохраняет в формате .txt и записывает в следующем виде: «Отчет по состоянию кабельной линии от «числа» «месяца», «время»» (например, «Отчет по состоянию кабельной линии от 23 ноября 2020 17-43»).

Таким образом, предоставляемый итог демонстрирует, что любые изменения параметров и характеристик КЛ несут информацию о повреждении, а применение способов средств обработки данных, которые основаны на технологии ИНС, дает возможность установить текущее техническое состояние объекта в определенный

момент времени.

### **4.3 Рекомендации по применению разработанного метода обеспечения безопасности кабельных линий 6-35 кВ**

Предлагаемый метод по обеспечению безопасности КЛ напряжением 6-35 кВ заключается в оценке их технического состояния согласно патента на изобретение RU № 2729173 с применением комбинированной диагностики. Данный способ считается неразрушающим контролем за состоянием КЛ, так как он включает в себя несколько способов диагностики, где важным вопросом является определение устойчивости системы (объекта исследуемого), а в этом способе он в достаточной мере проработан. Установить устойчива ли система и как следствие определить состояние КЛ, не прибегая к сложным расчетам и упрощениям нетрудно, используя инновационные технические и вычислительные ресурсы. Так, с целью оценки КЛ рекомендуется следующая последовательность операций, представленная кратко на схеме Рисунка 4.12 [94].

Данный способ подчеркнул факт, что когда происходят изменения состояния объекта, то это отражается и на значениях параметров, которые регистрируются в период диагностики. Но важно отметить и то обстоятельство, что данные замеры во время опытов производились на отрезках кабелей малой длины в сопоставлении с КЛ, проходящих на предприятиях, протяженность которых в некоторых случаях достигает до сотни километров, по этой причине нужна в последующем наработка данных на более протяженных линиях и внесение полученных показателей в базу данных программы с целью более достоверного получения результатов.

Помимо разработанной программы на языке C# рекомендовано и довольно удобно применять и подобные программные комплексы такие как MathCad, TAU2, Excel, тому подобное, благодаря которым отсутствует необходимость вычислять сложные математические функции, в данном случае это передаточные функции с получением мнимых и действительных чисел, также строить график образов в виде лепестковой диаграммы.



Рисунок 4.12 – Схема последовательности действий для определения текущего состояния КЛ

Разработанный метод обладает множеством возможностей и является весьма перспективным, так при дальнейшем его применении есть возможность увеличить базу данных и как следствие обучить ИНС новым данным, а также можно повысить достоверность замеров, прибавив ещё параметры и характеристики исследуемого объекта, определяющие состояние КЛ. Кроме того, преимуществом этого способа будет формирование отдельной базы с целью сохранения интегрального критерия безопасности для каждого отдельного кабеля, так при регулярной диагностике его

значения будут сохраняться, тем самым создавая базу для каждого кабеля. Эта база сможет помочь отслеживать и контролировать динамику изменения состояния КЛ, а в перспективе она даст возможность прогнозировать и остаточный ресурс [149].

#### **4.4 Обеспечение требований безопасности и иных технических мероприятий во время применения разработанного метода комбинированной диагностики**

Разработанный метод оценки КЛ относится к неразрушающему контролю, но не считается ещё общепризнанным, поэтому к его проведению можно допускать лиц, которые успешно прошли аттестацию и имеют надлежащую квалификацию согласно таким нормативным документам, как ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля», также ГОСТ Р ИСО 9712-2019.

Помимо этого, перед проведением этой диагностики КЛ обязан быть освоен инструктаж по технике безопасности, который определен на предприятие нефтегазовой отрасли.

Перед приступлением к работе также специалист обязан осуществить оценку визуально исследуемого объекта, уровень опасности и условия места проведения комбинированной диагностики. Это разрешит принять решения о дополнительных мерах защиты [150].

Рабочее место специалистов должно отвечать абсолютно всем требованиям ГОСТ 12.1.004-91, то есть общим стандартам и пожарной безопасности. Должны быть гарантированы выполнения требований электробезопасности, в связи с тем, что данный неразрушающий контроль направлен на электрооборудование, к чему и относятся КЛ согласно ПУЭ и ПТЭЭП [151].

Время выполнения работы согласуется с начальником службы эксплуатации КЛ на высокой стороне и с испытательной лабораторией.

Сам неразрушающий контроль должен проводиться с предоставлением лишь исправных оборудования, средств измерений. Электрооборудование должно быть подвержено визуальному осмотру перед включением на наличие заземления.

Имеется особая последовательность действий перед началом обследования

на самой КЛ, тут важно соблюдать следующее:

- отключить питание от КЛ;
- заблокировать от случайного или внезапного включения питания;
- проверить на отсутствие напряжения;
- заземлить;
- отделить рядом расположенные под напряжением устройства и элементы.

Оболочку исследуемого кабеля обязательно заводить в электроинструмент и во избежание излома крепко фиксироваться [24; 25].

Также при выполнении обследования в целях исследовательской работы в лаборатории необходимо при сборке лабораторной установки в целях безопасности использовать специальные инструменты с изолированными ручками.

Таким образом приборы, устройства и место выполнения обследования КЛ обязаны иметь такое рабочее состояние, которое отвечает абсолютно безопасному проведению работ и правилам, утвержденным таким федеральным органом РФ как Госэнергонадзор [152].

#### **4.5 Эффективность от внедрения комбинированной диагностики КЛ 6-35 кВ и её роль в повышении безопасности на предприятиях нефтегазовой отрасли**

Как ранее показывала статистика и сведения, полученные на практике, КЛ 6-35 кВ занимают первое место из всех электрооборудований по аварийности, однако они крайне редко отказывают во время эксплуатации, данные случаи единичны. Но важно учесть, что из всех причин аварий большую часть составляют пробой. Так, например, рассмотрев отказы КЛ 6-35 кВ за 3 года на предприятиях нефтегазовой отрасли, были выделены следующие причины [5]:

- слабая запрессовка либо неплотное прилегание наконечника к жиле, то есть нехорошая и слабая затяжка болтового соединения к выводам электротехнического оборудования. Как результат – перегрев и прогар жил и электротепловой пробой изоляции. Это составляет примерно 1,9 %;
- пробой в период проведения высоковольтных испытаний и после них при

подключении КЛ в работу в связи с попаданием влаги в концевые разделы, таким образом происходит увеличение электропроводности, кроме того, пробой в связи с усыханием, науглероживанием участков кабеля. Это приблизительно 97,8 %;

- следующий пробой составляет 0,3 %. Связанно с ухудшением пропиточного состава кабеля, его теплоотвода в местах прокладки на вертикальных участках, при прокладке их в пучке и при покрытии огнезащитным материалом или веществом. Таким образом происходит локальное нагревание конкретного участка.

Таким образом, резюмируя вышенаписанное, в основном пробой происходит из-за высоковольтных испытаний (методы косвенно-разрушающие), и поэтому с целью сокращения числа пробоев предлагается разработанный неразрушающий способ, представленный в данной работе. Чтобы наглядно оценить эффективность использования были составлены сравнительные «деревья событий» [153].

Данное «дерево событий» представляет собой алгоритм последовательности событий, которые начинаются с главного аварийного события – отказ КЛ; также применяется с целью количественного анализа сценариев происшествий. Рядом с названиями событий указаны числовые значения, обозначающие вероятность их возникновения, так для их определения применялись статистические сведения из аварийных журналов эксплуатирующих организаций. Бесспорно, и то, что данный алгоритм имеет много плюсов – это наглядность, информативность, возможность проведения подборки наиболее опасных происшествий и установление уязвимых зон, также возможность выполнения локального анализа для конкретного случая.

Так было составлено «дерево событий» для КЛ 6-35 кВ, представленное на Рисунке 4.13. Оно соответствует событиям на предприятиях на данный момент при использовании высоковольтных испытаний как метод контроля.

А на Рисунке 4.14 представлено «дерево» при применении разработанного метода комбинированной диагностики, где эффективность его обуславливается отсутствием такой «ветви» как пробой при испытании и как следствие сокращению вероятности аварийных событий таких как пробой под нагрузкой и изнашивание (старение) КЛ. Происходит это за счет перехода с применяемого ныне ППР на периодическое диагностирование, позволяющее своевременно обнаружить кабели,

которые пора вывести на ремонт или пришло время заменить полностью [153; 154].

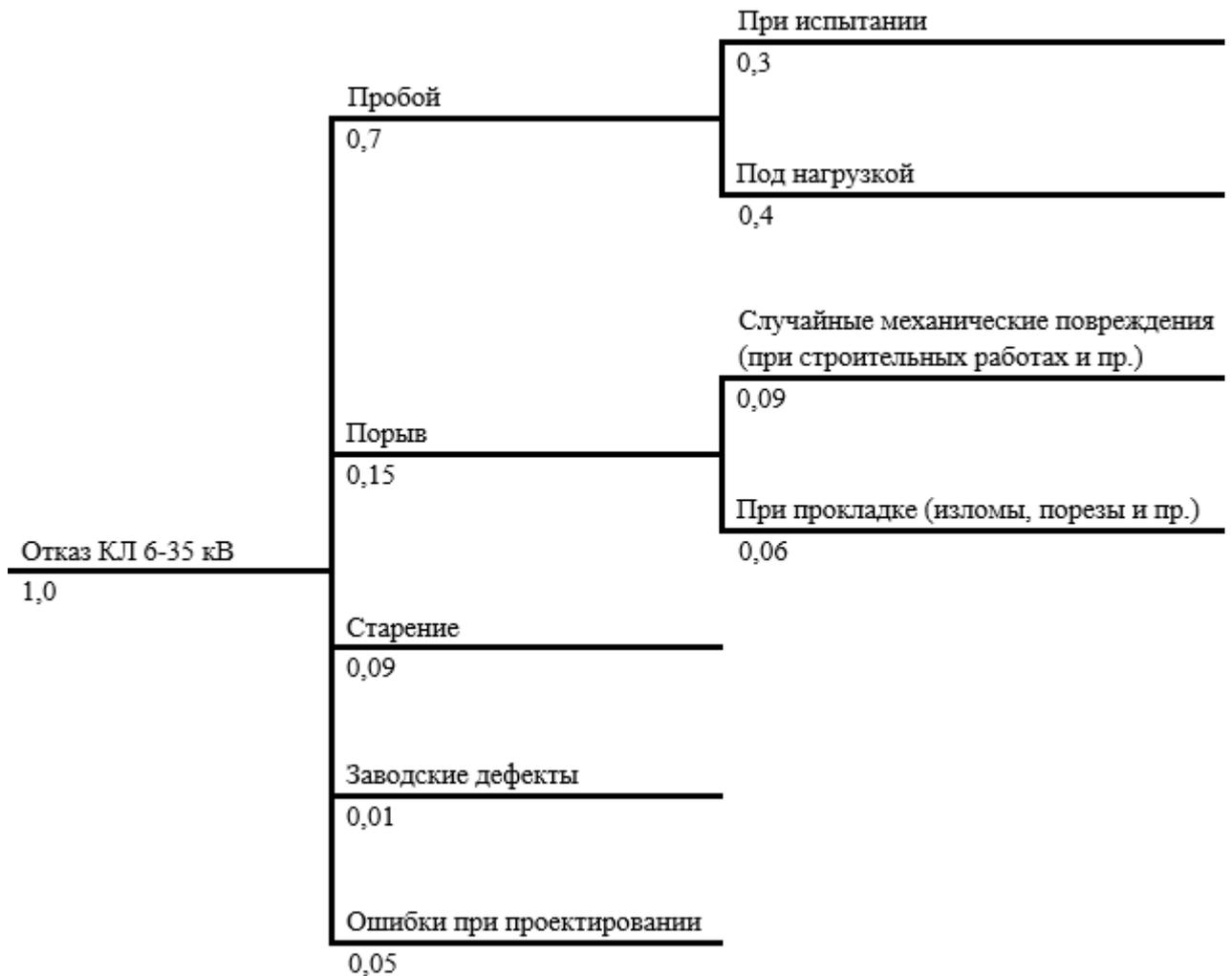


Рисунок 4.13 – «Дерево событий» для КЛ 6-35 кВ на предприятиях нефтегазовой отрасли при применении высоковольтных испытаний

Главным преимуществом во время рассмотрения и сравнения применяемого метода испытаний и разработанного с помощью этого «дерева событий» или иначе ЕТА (event tree analysis) считается простота построения и изображения, кроме того очевидное представление цепочки событий. Однако ЕТА имеет и некие недочеты – это трудность в идентификации абсолютно всех возможных событий, существует вероятность, что определенные значимые события или возможные происшествия

могут быть упущены. По этой причине некоторые ученые полагают, что «дерево» предоставляет более оптимистичную оценку, чем объективную.



Рисунок 4.14 – «Дерево событий» для КЛ 6-35 кВ при внедрении комбинированной диагностики

Помимо прочего, для того чтобы показать эффективность от предлагаемого способа обеспечения безопасности КЛ можно проанализировать и экономическую составляющую. По этой причине предварительно было проанализировано на какой стадии развития располагается на сегодняшний день нефтегазовая отрасль, а также и интенсивность инвестирования в диагностирование КЛ. Данный анализ выявил, что «привлекательность» находится на среднем уровне, что соответствует графику на Рисунке 4.15. Это означает, что данные вложения считаются целесообразными и аргументированными, что в последующем даст возможность гарантировать более высокую безопасность и рациональное потребление энергетических ресурсов.

Суть ранее изложенного сводится к тому, что каждое новое введение требует важных вложений, которые обязаны быть оправданны [155].

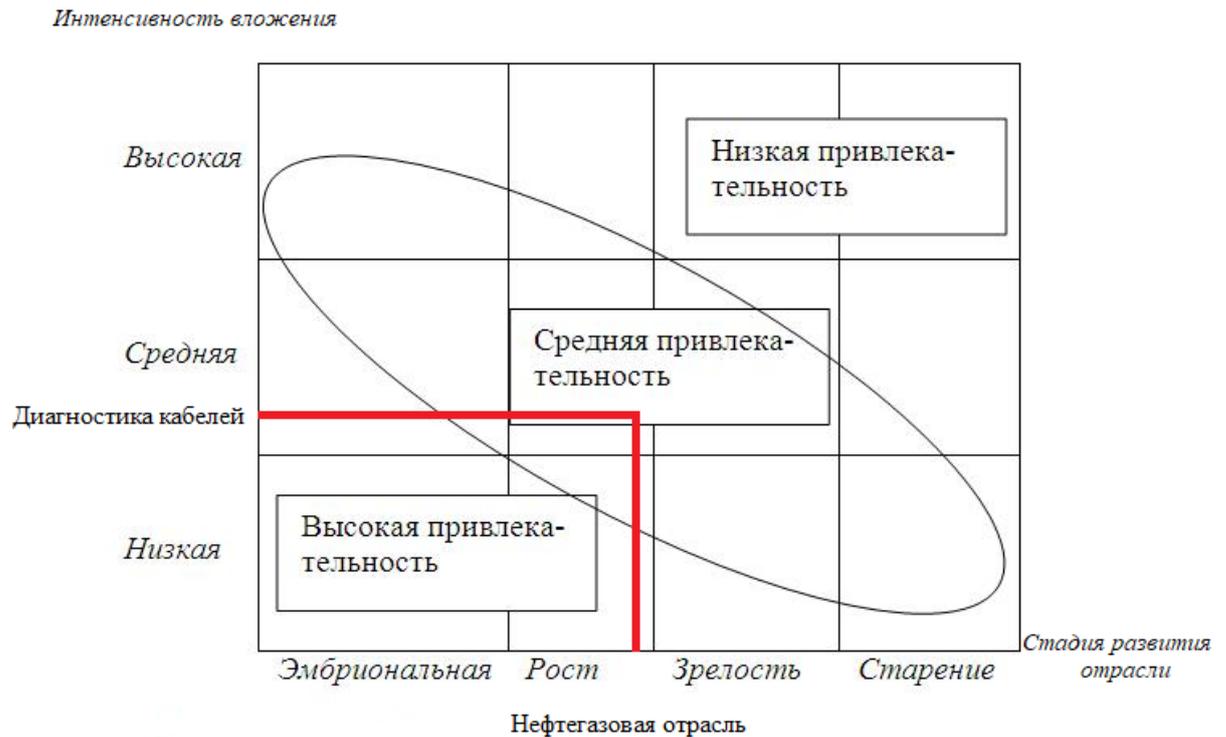


Рисунок 4.15 – Анализ уровня «привлекательности» предложенного метода в нефтегазовой отрасли

При планировании внедрения нового изначально предполагают снижение расходов, затрат на эксплуатацию, ремонт, восстановление, диагностику объекта, в связи с этим вначале рассчитывают один из главных показателей в экономике – это капитальные вложения. Затем определяют её эффективность благодаря сравнению расходов и полученного эффекта [156; 157].

При внедрении разработанной комбинированной диагностики фундаментом для эффективности с экономической точки зрения станет следующее – снижение расходов на периодические высоковольтные испытания и восстановления КЛ. Так исходные данные приведены в Таблице 4.1, в качестве основы взят используемый способ повышенного выпрямленного напряжения и предлагаемый разработанный метод, предусмотрены их инвестиции также затраты с помощью конструктивных и рабочих параметров [157].

Таблица 4.1 – Начальные данные для расчета эффективности

Величина	Испытание высоковольтное	Разработанный метод
Затраты капитальные (К), тыс. руб.	450,00	187,30
Степень перебраковки, %	36,00	0,00
Время проведения работы (Т <sub>п</sub> ), мин	45,00	30,00
Потребляемая мощность (Р <sub>потр</sub> ), кВт	2,40	1,60
Расходы на электроэнергию (З <sub>э</sub> ), тыс. руб.	29,97	13,32
Стоимость электроэнергии (С <sub>э</sub> ), руб/кВт·час	3,33	

Вычисления проводились по формулам 4.7-4.11. Расчет считается условным, отталкиваясь от средств и ресурсов, которые применялись во время проведения диагностики и исследований, также учитывалось, что средняя расчетная цена 1 м кабеля равна 1500 рублей, и что за 1 год проходят проверки 10000 кабелей. Помимо этого, предусматривались амортизационные показатели, равные 5 % от стоимости всей установки, необходимой для разработанного метода. Однако перспективно в будущем написание и создание полноценного программного обеспечения, которое соответственно и изменит экономические расчеты. Потому как для дальнейшего обучения нейросети и создания обширной базы для её обучения по каждому типу кабеля для определенного предприятия нефтегазовой отрасли потребуется более мощный компьютер с более высокой производительностью.

Вопреки тому, что расчеты условные, экономия уже очевидна видна за счет такого показателя как степень перебраковки, которая явно существует только при испытаниях.

Период окупаемости находится:

$$T_p = \frac{(K \cdot 100)}{\mathcal{E}_r}, \quad (4.7)$$

где  $\mathcal{E}_r$  – экономический годовой эффект от применения разработанного метода, определяющийся по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E} - \mathcal{E}_o - K \cdot E_H, \quad (4.8)$$

где  $\mathcal{E}$  – общая экономия от внедрения метода, тыс. руб.;

$\mathcal{E}_o$  – дополнительные расходы на сервис и эксплуатацию, тыс. руб.;

$E_H$  – коэффициент экономической эффективности, из справочных данных и принимается равным 0,15.

В дополнительные расходы включают следующие затраты: на амортизацию  $\mathcal{Z}_a$ ; на заработную плату работникам  $\mathcal{Z}_p$ ; на электрическую энергию  $\mathcal{Z}_{э2}$ ; на обучение персонала  $\mathcal{Z}_{об}$  (формула 4.9).

$$\mathcal{E}_o = \mathcal{Z}_a + \mathcal{Z}_p + \mathcal{Z}_{э2} + \mathcal{Z}_{об}. \quad (4.9)$$

Расход на электрическую энергию вычисляется по формуле:

$$\mathcal{Z}_{э2} = T_{п} \cdot P_{потр} \cdot C_{э}. \quad (4.10)$$

Общая экономия от внедрения метода разработанного находится по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_B + \mathcal{E}_K + \mathcal{E}_{э1}, \quad (4.11)$$

где  $\mathcal{E}_B$  – заработная плата высвобожденных работников, тыс. руб.;

$\mathcal{E}_K$  – экономия в связи с уменьшением затрат на те кабели, которые раньше во время высоковольтных испытаний пробивало, тыс. руб.;

$\mathcal{E}_{э1}$  – экономия электричества, тыс. руб.

Полученные технико-экономических значения представлены в Таблице 4.2.

Дополнительно был оценен финансовый риск от внедрения предложенного метода для обеспечения безопасности КЛ 6-35 кВ, и он оценен как средний. Это подразумевает за собой только внезапный прыжок инфляции вверх, из-за данного следует повышение стоимости оборудования и другого необходимого оснащения

для нового метода и как результат увеличение стоимости на услуги. Но и при этом рекомендуется мероприятие с целью уменьшения этого риска – это альтернативное оборудование, например, другой страны-изготовителя либо серии, марки, что даст возможность урегулировать цены [157].

Таблица 4.2 – Полученные значения для оценки экономической эффективности

Технико-экономические параметры	Значения
Сервисные расходы ( $\mathcal{E}_o$ ), тыс. руб	51,5
Амортизация ( $\mathcal{Z}_a$ ), тыс. руб.	9,4
Расходы на переобучение специалистов ( $\mathcal{Z}_{oc}$ ), тыс. руб.	28,8
Общая экономия благодаря внедрению метода ( $\mathcal{E}$ ), тыс. руб.	5429,9
Экономия, связанная с сокращением затрат на кабели, которые ранее терпели пробой во время высоковольтных испытаний ( $\mathcal{E}_k$ ), тыс. руб.	5400
Экономия на электрической энергии ( $\mathcal{E}_э$ ), тыс. руб.	16,65
Экономический годовой эффект ( $\mathcal{E}_r$ ), тыс. руб.	5350,3
Срок окупаемости ( $T_p$ ), год	3,5

Резюмируя вышенаписанное также расчеты и вычисления в этой главе можно сделать заключение, что если принимать во внимание всё для системы управления на предприятиях, то в последующем это приведет к уменьшению потерь, издержек, связанных с сервисом КЛ. Это позволит осуществлять распределение их с учетом текущего состояния, расходов и рисков на предоставление безопасности во время эксплуатации. Так, для каждого кабеля определяется  $I_\Sigma$ , анализируются затраты, а потом кабели с одними и теми же показателями сгруппировываются и для каждой группы уже вырабатываются рекомендации по дальнейшей их «судьбе».

### Выводы по главе

С целью повышения безопасности КЛ 6-35 кВ, нужны методы, которые дают возможность производить оценку технического текущего состояние кабелей заранее

до их пробоя, на уровне малейших изменений характеристик, и при этом должен гарантировать дальнейшую безаварийную службу. По итогам экспериментальных исследований разработан способ (патент РФ на изобретение № 2729173), который основан на комбинированной диагностике. Диагностические параметры включают в себя сведения о технических, электрических и тепловых свойствах кабеля и даже те свойства, которые не видны вооруженным глазом, поэтому рассматриваются как концепция «черный ящик». Графически установлены значения диагностических параметров, построенные образы, которые отвечают конкретному состоянию, а из них уже выведены интегральные диагностические параметры.

Для установления степени дефектности КЛ в целом разработан интегральный критерий безопасности  $I_2$ . Существенная отличительная черта данного критерия то, что он создается при помощи такой технологии как искусственная нейронная сеть (ИНС) Кохонена, так как анализ уже имеющихся многопараметрических способов распознавания выявил, что более оптимальным и наилучшим для оценки дефектов является непосредственно ИНС.  $I_2$  складывается из интегральных диагностических параметров, состоящих из тепловых и технических характеристик и передаточной функции, но кроме того содержащий в себе показатель нераспространения горения, сроки эксплуатации. Числовые значения  $I_2$  меняются в пределах от 0 % до 100 %, внутри которого существуют значения промежутков, описывающих текущее техническое состояние КЛ: «Отличное», «Хорошее», «Удовлетворительное», «Очень плохое».

Для реализации разработанного метода написан алгоритм последовательной обработки и идентификации уровня поврежденности и создана схема программно-аппаратного комплекса. Для практического применения этого метода разработаны рекомендации, где отмечено, что необходимо формирование более объемной базы данных и сведений в будущем для наиболее четкой и надежной оценки.

Представлена эффективность от внедрения предлагаемого метода, что даст возможность уменьшить расходы на замену кабелей при их отказах в результате преждевременной оценки его состояния и сведет уровень перебраковки к 0.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведен анализ по аварийным ситуациям на предприятиях нефтегазовой отрасли, в результате которого определено, что на безопасность технологических процессов значительное воздействие оказывают технические текущие состояния КЛ 6-35 кВ, так их отказ способен стать причиной несчастных случаев, пожаров и иных аварий, и простоев, которые влекут за собой крупные финансовые убытки и экологические и даже возможно и социальные ущербы. Кроме того, рассмотрены общие вопросы и проведен анализ существующих современных способов и средств обеспечения безопасности КЛ, изучены нормативно-технические документации, регламентирующие безопасную эксплуатацию и методы определения состояния. Вследствие установлено, что на данных предприятиях применяемые мероприятия для оценки и прогнозирования ресурса КЛ являются мало результативными и не эффективными, а как известно, бесперебойная работа системы электроснабжения, особенно для первой категории надежности, неосуществима без перебоев также безопасной работы КЛ.

2 Выполнены экспериментальные исследования по изменению технического состояния и безопасности КЛ 6-35 кВ, включающие в себя замеры и регистрацию электрических параметров, характеристики теплового состояния и применение концепции «черного ящика». Установлены значения диагностических параметров, которые отвечают критическому состоянию КЛ, и что в процессе формирования повреждения они изменяются, и для каждого процесса деградации либо старения изменения происходят по-разному. Помимо этого, определен параметр нераспространения горения, дающий возможность осуществлять проверку на соответствие ТУ либо стандарта, заявленного изготовителем на конкретную марку кабеля. Таким образом на основе установленных параметров определены интегральные диагностические параметры и определена их взаимосвязь с характерным уровнем поврежденности КЛ.

3 На уровне изобретения разработан способ обеспечения безопасности КЛ 6-35 кВ, основанный на комбинированной диагностике, и дающий точную оценку их

текущего состояния с учетом изменений технических характеристик и параметров, повреждений в ходе эксплуатации и показателя срока службы. Научно обоснована возможность его применения с целью снижения количества аварийных ситуаций из-за непредвиденного выхода из строя КЛ либо их пробоя из-за высоковольтных испытаний.

4 Предложена и научно обоснована математическая модель формирования интегрального критерия безопасности  $I_{\Sigma}$  для КЛ 6-35 кВ, формируемая с помощью искусственной нейронной сети. Значения  $I_{\Sigma}$  меняются в пределах от 0 % до 100 %, Данный предел поделен на четыре группы, где каждая группа имеет свой числовой интервал, отвечающему за соответствующее состояние: «Отличное», «Хорошее», «Удовлетворительное», «Очень плохое». Где за процентный уровень равный 100 взято такое состояние КЛ, которое не подлежит и не допустимо для дальнейшей его эксплуатации. Это отвечает требованиям ГОСТ 27.002-2015. Этот критерий дает возможность осуществлять решения об организации сервиса и дальнейшей эксплуатации КЛ.

5 Создана структурная схема программно-аппаратного комплекса и алгоритм с целью реализации поочередной обработки и идентификации уровня дефектов. Рекомендации и эффективность от внедрения предлагаемого способа и критерия безопасности  $I_{\Sigma}$  показали, что их внедрение обеспечит сокращение затрат на замену кабелей при их пробоях в результате ранней оценки его состояния и сведет уровень перебраковки к 0.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дьяков, А. Ф. Менеджмент и маркетинг в электроэнергетике / А.Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, В. В. Жуков, В. В. Молодюк – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 504 с.
2. Шикунов, В. Н. Обеспечение безопасности технологических процессов нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств при повреждениях в электроэнергетической системе предприятия / В. Н. Шикунов // Нефтегазовое дело: научно-технический журнал. Т. 6. – 2008. – № 1. – С. 181 - 188.
3. Белов, С. В. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для студентов / С. В. Белов, В. А. Девисилов, А. Ф. Козьяков и др.; 7-е издание; Под общей редакцией С. В. Белова – М.: Высшая школа НМЦ СПО. 2007. – 616 с.
4. Ежегодные отчеты с 2004 по 2018 гг. о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/) (дата обращения 08.12.2020).
5. Информация об авариях на опасных производственных объектах. Надзор за объектами нефтегазового комплекса. Уроки, извлеченные из аварий // Официальный сайт Ростехнадзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения 08.12.2020).
6. Интегрированный годовой отчет ПАО «ФСК ЕЭС» за 2019 год // Официальный сайт ПАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.fsk-ees.ru](http://www.fsk-ees.ru) или [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/GOSA\\_2020\\_Vopros\\_1-4\\_Integrirrovannyi\\_GO\\_2019.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/GOSA_2020_Vopros_1-4_Integrirrovannyi_GO_2019.pdf) (дата обращения 08.12.2020).
7. Леонов, В. М. Основы кабельной техники: учебник для студентов высших учебных заведений/ В. М. Леонов, И. Б. Пешков, И. Б. Рязанов, С. Д. Холодный; под ред. И. Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
8. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации кабельных линий / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, И. В. Прахов, В. Л. Талаев

// Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – Москва: Изд-во ООО «ОБРАКАДЕМНАУКА», 2016. – С. 48 - 50.

9. Хуснияров, М. Х. Техногенный риск и управление промышленной безопасностью нефтеперерабатывающих предприятий: учеб. пособие / М. Х. Хуснияров, А. П. Веревкин, И. Р. Кузеев и др. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. – 312 с.

10. Белорусов, Н. И. Электрические кабели и провода (теоретические основы кабелей и проводов, их расчет и конструкции) / Н. И. Белорусов. – М.: Энергия., 2009. – 512 с.

11. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: учеб. для вузов / Б. Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.

12. ГОСТ 22220-76. Кабели, провода, шнуры. Метод определения стойкости изоляции и оболочек из поливинилхлоридного пластика к растрескиванию и деформации при повышенной температуре [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-22220-76> (дата обращения: 09.12.2020).

13. Баширов, М. Г. Особенности подготовки инженеров-электриков для предприятий нефтехимии и нефтепереработки в области промышленной и экологической безопасности / М. Г. Баширов, В. Н. Шикунов // Научн.-метод. конф. по проблемам инженерного образования: Сб. тезисов. – М.: - Изд-во МЭИ (ТУ), 2005. – С. 76.

14. Федеральный закон РФ «Об электроэнергетике» от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ (действующая редакция от 01.07.2020) // Собрание законодательства РФ. – 2003. - № 13 – Ст. 1177.

15. Фарамазов, С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов: Учебник для техникумов / С. А. Фарамазов; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия. 1988. – 304 с.

16. Салиева, Л. М. Система управления техническим состоянием и безопасностью эксплуатации нефтегазового оборудования / Л. М. Салиева, И. Ф. Зайнакова, А. М. Хафизов, И. В. Прахов, И. С. Миронова // Наука и

образование в жизни современного общества. Часть 10. – Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. – С. 144 - 146.

17. Seifi H., Sepasian M.S. Electric Power System Planning: Issues, Algorithms and Solutions – Springer, 2011 – p. 388

18. Кузнецов, А. С. Управление энергетической безопасностью и энергетической эффективностью электрохозяйства предприятий нефтехимии и нефтепереработки / А. С. Кузнецов, Э. М. Баширова, И. С. Миронова // Энергоэффективность и энергобезопасность на предприятиях промышленности и ЖКХ : Труды Всероссийского научно-практического семинара (24 – 25 марта 2010 г.) /отв. ред. К. Б. Сабитов. – Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. – 298 с.

19. Коржов, А.В. Основные причины повреждения изоляции силовых кабелей, проложенных под дорогой / А. В. Коржов, Е. Ю. Юрченко // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеграция науки и практики: сб. научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции. – Ставрополь: изд-во СГУ; Сервисшкола, 2009. – С.163 - 166.

20. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждений в электрических сетях / Г. М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982.

21. Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. – p. 265

22. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии [Электронный ресурс]: РД 153-34.0-15.502-2002 – Утв. Госэнергонадзор Минэнерго России: ввод в действие с 01.08.2002. – М., 2002. – 32 с. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200032472> (дата обращения 09.12.2020).

23. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей на основе частотного метода диагностики. / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, И. С. Миронова, К. В. Чернов // Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции

«Теоретические и прикладные аспекты современной науки» Сборник трудов в 6 частях (РИНЦ) – Белгород: Издательство АПНИ, 2015. – С. 88 - 91.

24. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Ростов: Феникс, 2008. – 253 с.

25. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 7- ой выпуск. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. – 854 с.

26. Деверни, В. Г. О последствиях высоковольтных профилактических испытаниях в кабельных сетях 6-10 кВ / В. Г. Деверни, Р. Т. Данилова / Энергетик, 1999. – 18 с.

27. Коржов, А.В. Оценка влияния на изоляцию кабельных линий 6(10) кВ испытаний повышенным напряжением / А.В. Коржов // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды: сборник статей III международной научно-технической конференции: в 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 578 - 581.

28. Канискин, В.А. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Методы испытаний и диагностики силовых кабелей / В.А. Канискин, А.И. Таджибаев. Ч. 7. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – С. 76.

29. Баширов, М. Г. Способ диагностики состояния изоляции кабельных линий / М. Г. Баширов, Д. А. Заварихин, М. А. Миндолин, С. К. Мокшанцев // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2007. – 157 с.

30. Лебедев, Г. М. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6-10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики: автореф. ...д-ра техн. наук: 05.09.03 / Лебедев Геннадий Михайлович. – Москва, 2007. – 35 с.

31. Заварихин, Д. А. Разработка частотного метода обеспечения безопасной эксплуатации электроприводов машинных агрегатов нефтегазовых производств: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Заварихин Дмитрий Александрович. – Уфа, 2009. – 133 с.

32. Степанов, В. М. Диагностика технического состояния силовых кабельных линий напряжением 35-500 кВ / В. М. Степанов, П. А. Борисов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.6. – Ч.1 – 2011. – С. 66 - 71.

33. Полуянович, Н. К. Контроль, диагностика и прогнозирование изоляционных материалов кабельных линий / Н. К. Полуянович, М. Н. Дубяго // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2018. – № 1. – С. 143.

34. Сушко, А. Е. Проблемы оценки технического состояния динамического оборудования опасных производственных объектов / А. Е. Сушко, В. А. Грибанов // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – 10. – С. 58 - 65.

35. Юмагузин, У. Ф. Организация подготовки специалистов в области диагностического обслуживания оборудования нефтегазовой отрасли / У. Ф. Юмагузин, А. А. Абдуллин, Д. З. Газизов // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля - фундамент подготовки специалистов будущего: материалы Международной научно-методической конференции. – Уфа: Изд. УГНТУ, 2012. – С. 138 - 141.

36. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения: учебное пособие. Под редакцией Шабанова В.А. – Уфа: «Нефтегазовое дело», 2012. – 372 с.

37. Барков, А. В. Диагностическое обслуживание предприятий – основа перевода оборудования на ремонт по состоянию / А. В. Барков, В. В. Тулугуров. – М.: Промышленная энергетика №10, 2002. – С. 15 - 18.

38. Буланкин, Н. К. Электрооборудование промышленных предприятий: учеб. пособие / Н. К. Буланкин. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2011. – 183 с.

39. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Интегральные критерии для оценки повреждений машинных агрегатов в нефтегазовой отрасли. / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, А. В. Путенихина, А. В. Мельников // Наука и образование в XXI веке. Сборник трудов. Часть 3. – Тамбов 2016. – С. 61 - 63.

40. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 01.11.2020. – М.: ФГУП «ВНИИОФИ». [Электронный ресурс]. – URL: - <http://docs.cntd.ru/document/1200169346> (дата обращения 10.12.2020).

41. Кузеев, И. Р. Оценка состояния и прогнозирование ресурса оборудования по изменению электромагнитных диагностических параметров / И. Р. Кузеев, М. Г. Баширов // Мировое сообщество: проблемы и пути решения. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005. – С. 4 - 12.

42 Коржов, А. В. Исследование влияния переменного магнитного поля на интенсивность частичных разрядов в моделях, имитирующих изоляцию силового кабеля / А. В. Коржов // Кабели и провода. – 2013. – № 1 (338). – С. 8 - 13.

43. Химельблау, Д. Обнаружение и диагностика неполадок в химических и нефтехимических процессах / Д. Химельблау. – Л.: Химия, 1983. – 352 с.

44. Руководство по эксплуатации. Цифровой измеритель сопротивления изоляции 2801 IN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.etk-elcom.ru> (дата обращения: 10.12.2020).

45. Руководство по эксплуатации. Осциллограф цифровой ручной АСК-2108 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aktakom.ru> (дата обращения: 10.12.2020).

46. Руководство по эксплуатации 2АМБ.169.001-01 РЭ. «АИД 70 М» – аппарат испытания диэлектриков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electronpribor.ru/files/products/aid-70m.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).

47. Руководство по эксплуатации. Тепловизор testo 875. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/41960939-Тепловизор-testo-875-rukovodstvo-po-ekspluatácii.html> (дата обращения: 10.12.2020).

48. Руководство пользователя. Fluke 1550В. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://viva-telecom.org/SHOP/FILES/FLUKE/1550b-ip.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).

49. Прахов, И. В. Разработка программно-аппаратного комплекса для определения технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом /

И. В. Прахов, М. Г. Баширов, А. В. Самородов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2011. – № 3. – С. 12 - 16.

50. Смотри́н, К. А. Метод оценки и прогнозирования пожароопасных дефектов полимерной изоляции высоковольтного электрооборудования в нефтегазовой отрасли: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Смотри́н Константин Александрович. – Санкт-Петербург, 2006. – 170 с.

51. Баширов, М. Г. Формирование единого подхода к обеспечению энергосбережения и энергобезопасности предприятий нефтегазовой отрасли / М. Г. Баширов, И. С. Миронова, А. В. Самородов, У. Ф. Юмагузин // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сборник трудов IV Международной научно-технической конференции (24 - 25 апреля 2012 года). – Тольятти: ТГУ, 2012. – 4.1. – С. 252 - 257.

52. Новикова Ф. Ш., Ж. да К. Применение интегральных критериев с целью обеспечения промышленной безопасности при эксплуатации кабельных линий / Ж. да К. Новикова Ф. Ш., Ф. Ш. Хафизов, И. Ф. Хафизов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2018. – № 6. – С. 128 - 142. – URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6\\_2018/ogbus\\_6\\_2018\\_p128-142.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2018/ogbus_6_2018_p128-142.pdf).

53. СТО УГНТУ 005-2013. Стандарт организации ФГБОУ ВПО УГНТУ. Диагностирование асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором по значениям параметров высших гармоник токов и напряжений / М. Г. Баширов, А. В. Самородов, И. С. Миронова, У. Ф. Юмагузин, А. А. Абдуллин, Д. Г. Чурагулов. – Уфа: УГНТУ, 2013. – 13 с.

54. Дубовой, В. Г. Оперативное диагностирование электроустановок в ходе оперативного управления ими / В. Г. Дубовой, Л. Л. Богатырёв, В. Н. Осотов // Электричество. – 2005. – № 9. – С. 21 - 29.

55. Кадомская, К. П. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К. П. Кадомская, В. Е. Качесов, Ю. А. Лавров и др. // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48 - 51.

56. Altug, S. Fuzzy Inference Systems Implemented on Neural Architectures for Motor Fault Detection and Diagnosis [Text] / S. Altug, C. Mo-Yuen, H. Joel Trussell: IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 46. – № 6, 1999.

57. Хуснутдинова, И. Г. Разработка метода оценки ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Хуснутдинова Ильвина Гамировна. – Уфа, 2019. – 202 с.

58. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – Киев: Вища школа, 1983. – 455 с.

59. Петрова, Е. В. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 284 - 291.

60. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

61. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Идентификация технического состояния кабельных линий 6 кВ. / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, И. В. Прахов // Инновационные технологии в промышленности. Сборник материалов научно-практической конференции. – Стерлитамак, 2016. – С. 112 - 113.

62. Хафизов, А. М. Разработка автоматизированной системы диагностирования технологических процессов и оборудования предприятий нефтегазовой отрасли / А. М. Хафизов, М. Г. Баширов // «Тинчуринские чтения». В 4 т.; Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – С. 162.

63. Егоров, А. Ф. Управление безопасностью химических производств на основе новых информационных технологий / А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая. – М.: Химия, КолосС, 2006. – 416 с.

64. Викторов, Н. А. Экспертиза промышленной безопасности оборудования опасных производственных объектов. Актуальные вопросы / Н. А. Викторов // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 8. – С. 57 - 63. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-57-63

65. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2002. – 382 с.
66. Богданов, Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. пособие для вузов / Е. А. Богданов. – М: Высшая школа, 2006. – 279 с.
67. Ситников, В. Ф. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации / В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 9 - 15.
68. Khafizov, F. S. Methodological approaches to the development of an integral criterion for assessing the condition of 6 kV power cables at the industrial enterprises / F. S. Khafizov, Z. D. K. Novikova Freyre Shavier // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. – 2020, 2020(10). – P. 71 - 76. (переводная версия).
69. Чучуева, И. А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Чучуева Ирина Александровна. – Москва, 2012. – 154 с.
70. Краснянский, М. Н. Методология прогнозирования и обеспечения надежности функционирования технических систем многоассортиментных химических производств / М. Н. Краснянский, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник ТГТУ. – 2010. – Т. 16. – № 1. – С. 6 - 15.
71. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М.: Высш.шк., 2006. – 365 с.
72. Баширов, М. Г. Обеспечение безопасности эксплуатации и оценка ресурса оборудования для переработки нефти электромагнитными методами диагностики: автореф. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Баширов Мусса Гумерович. – Уфа: УГНТУ, 2002. – 364 с.
73. Пупков, К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов // Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с.
74. Мирсайтов, И. И. Исследование линейной автоматической системы управления / И. И. Мирсайтов, И. С. Миронова // Наука. Технология. Производство:

тезисы докладов межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд. УГНТУ, 2012. – С. 104 - 106.

75. Лазарева, Т. Я. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. – 352 с.

76. Цибульский, В. Р. Методы получения передаточной функции на основе частотных характеристик ЭКГ / В. Р. Цибульский, О. И. Сергейчик, М. В. Абрамов // Вестник кибернетики. – 2008. – № 7. – С. 79 - 85.

77. Панкратов, В. В. Избранные разделы современной теории автоматического управления / В. В. Панкратов, О. В. Нос, Е. А. Зима. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 223 с.

78. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

79. Dor D., Elovici Y. A model of the information security investment decision-making process // Computer & Security. 2016. Vol. 63. P. 1 - 13.

80. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 1104 с.

81. Веревкин, А. П. Усовершенствованное управление (АРС) нефтехимическим производством на основе многоуровневой нейросетевой системы поддержки принятия решений / А. П. Веревкин, М. С. Слетнев // Нефтегазовое дело. – 2012. – №10, № 2. – С. 61 - 64.

82. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 452 с.

83. Терехов, В. А. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. – М.: Высшая школа, 2002. – 183 с.

84. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Диагностика кабельных линий методом многопараметровой динамической оценки / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, М. Г. Баширов, И. В. Прахов, // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 4. – С. 33 - 37.

85. Юмагузин, У. Ф. Оценка опасности эксплуатации машинных агрегатов с использованием теории нечетких множеств: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Юмагузин Урал Фатихович. – Уфа, 2015. – 149 с.

86. Григораш, О. В. Методология экспериментальных исследований / О. В. Григораш // Научный журнал КубГАУ - Scientific Journal of KubSAU. 2017. – №127. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-eksperimentalnyh-issledovaniy> (дата обращения: 10.12.2020).

87. Лебедев, С. А. Парадигмы методологии науки и методологическая культура ученого / С. А. Лебедев // Гуманитарный вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2017. – № 7. – С. 1 - 14.

88. Мещанов, Г. И. Состояние производства кабелей энергетического назначения среднего и высокого напряжения на предприятиях ассоциации «Электрокабель» / Г. И. Мещанов // Кабели и провода. – М. – 2013. – № 5 (342). – С. 5 - 8.

89. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / ред. В. Б. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2003. – 567 с.

90. Приказ Минтруда России от 24.07.2013 N 328н (ред. от 15.11.2018) «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» (Зарегистрировано в Минюсте России 12.12.2013 N 30593) [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_156148/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156148/) (дата обращения: 11.12.2020).

91. ГОСТ 12.2.007.14-75. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Кабели и кабельная арматура. Требования безопасности [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051584> (дата обращения: 11.12.2020).

92. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. 6-е издание, с изменениями и дополнениями по состоянию на 01.03.2001. – Москва: «Издательство НИЦ ЭНАС», 2004. – 254 с.

93. Хафизов Ф. Ш. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий с использованием комбинированной диагностики / Ф. Ш. Хафизов, Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019. – № 2.

– С. 6 - 15. – URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2\\_2019/ogbus\\_2\\_2019\\_p6-15.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2019/ogbus_2_2019_p6-15.pdf)

94. Пат. 2729173 Российская Федерация, МПК G01N 27/82, G01R 31/08. Способ оценки технического состояния кабельной линии / Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К., Хафизов Ф. Ш., Хафизов И. Ф.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – № 2019138632; заявл. 28.11.2019; опубл. 04.08.2020, Бюл. № 22.

95. Штремель, М. А. Инженер в лаборатории (организация труда). – М.: Metallurgia, 1983. – 128 с.

96. ГОСТ 14014-91. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-14014-91> (дата обращения: 12.12.2020).

97. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200023321> (дата обращения: 12.12.2020).

98. Сергеев, А. Г. Метрология. – М.: Логос, 2005. – 272 с.

99. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

100. Руководство по эксплуатации. Осциллограф двухканальный GOS-620 (GOS-620FG). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/68494721-Oscillograf-dvuhkanalnuu-gos-620-gos-620fg.html> (дата обращения: 12.12.2020).

101. Руководство по эксплуатации измерителя RLC E7-22. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/958/DOC003958959.pdf> (дата обращения 12.12.2020).

102. Руководство по эксплуатации тепловизионной камеры NEC TH-9100. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/86402085-Teplovizor-nec-th-9100.html> pdf (дата обращения 12.12.2020).

103. ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. ТУ. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004968> (дата обращения: 12.12.2020).

104. Прахов, И. В. Оценка технического состояния и ресурса машинных агрегатов нефтегазовой отрасли на основе интегрального критерия / И. В. Прахов, Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, А. В. Путенихина, А. В. Мельников // Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий. Научный информационный сборник: Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – Москва. Издательство: ООО «ОБРАКАДЕМНАУКА», 2016 – С. 45 - 48.

105. Заварихин, Д. А. Оценка технического состояния и прогнозирование ресурса безопасной эксплуатации кабельных линий 6-10 кВ магистральных перекачивающих станций / Д. А. Заварихин, М. Г. Баширов, М. А. Миндолин // Проблема сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2009. № 2. – С. 83 - 88.

106. ГОСТ 2990-78. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004548> (дата обращения: 12.12.2020).

107. Росс Эшби, У. Введение в кибернетику / У. Росс Эшби. – Едиториал УРСС, Ленанд, 2015. – 434 с.

108. Bracewell R. The Fourier Transform and Its Applications McGraw-Hills, 1986, 474 p. ISBN 0-07-007-015-6.

109. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Моделирование электрических схем в программе MULTISIM. / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер // Наука. Технология. Производство – 2013. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2013. – С. 78 - 79.

110. Белоус, И. А. Теория сигналов: учеб. пособие / И. А. Белоус, Ю. А. Левашов. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2017. – 101 с.

111. Абовский, Н. П. Управляемые конструкции и системы: конспект лекций [Электронный ресурс] / Н. П. Абовский, А. В. Максимов, Н. И. Марчук и др. –

Версия 2.0 – Электрон. дан. (9 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – Режим доступа: [http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/u\\_lecture.pdf](http://isi.sfu-kras.ru/sites/is.institute.sfu-kras.ru/files/u_lecture.pdf).

112. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Разработка диагностических параметров для оценки технического состояния машинных агрегатов нефтегазовой отрасли. / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, И. С. Миронова, С. В. Маликов, А. В. Путенихина // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества». Сборник трудов. часть 3 – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. – С. 84 - 85.

113. ГОСТ 12182.6-80. Кабели, провода и шнуры. Метод проверки стойкости к раздавливанию. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012188> (дата обращения: 12.12.2020).

114. Анিকেенко, В. М. Изучение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей / В. М. Анিকেенко, В. Ф. Графов, М. Н. Трескина // Тр. Томск. политехн. ин-т. – 1974. – Т. 282. – С. 40 - 43.

115. ГОСТ 12179-76. Кабели и провода. Метод определения тангенса угла диэлектрических потерь. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004487> (дата обращения 12.12.2020).

116. ГОСТ 3345-76. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004610> (дата обращения 12.12.2020).

117. Хафизов, Ф. Ш. Методические подходы к разработке интегрального критерия для оценки состояния силовых кабелей 6 кВ на промышленных предприятиях / Ф. Ш. Хафизов, Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 71 - 76. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-71-76.

118. Кирюшин, О. В. Пакет ТАУ, версия 2.0 для Windows [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ahtp.rusoil.net/tauwin.htm>.

119. Репин, П. Г. Электромагнитно-акустический метод контроля напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла

технологического оборудования / П. Г. Репин, А. В. Самородов, В. Л. Талаев, Э. М. Баширова, И. Г. Хуснутдинова // Нефтепереработка и нефтехимия [Электронный ресурс]. – 2018. – № 10. – С. 38 - 44. – Режим доступа: [www.npnh.ru](http://www.npnh.ru) (дата обращения: 12.12.2020).

120. Аязян, Г. К. Расчет автоматических систем с типовыми законами регулирования: учебное пособие / Г. К. Аязян. Уфа: УГНТУ, 1989. – 136 с.

121. Наумов, А. Е. Автоматизированная система прогнозирования остаточного ресурса контактных соединений электрических сетей в условиях ограниченного объема диагностической информации: автореф. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Наумов Александр Евгеньевич. – Тверь, 2009. – 18 с.

122. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Оценка технического состояния нефтегазового оборудования на основе интегральных критериев / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, И. С. Миронова, А. В. Маликов, А. А. Акшенцева, Р. Р. Максюттов // Наука и образование в жизни современного общества. Международная научно-практическая конференция, часть 3. – Тамбов, 2015. – С. 81 - 83.

123. Усманов, Д. Р. Обработка сигналов электромагнитно-акустического преобразователя по оценке степени напряженно-деформированного состояния металлов методом моментов / Д. Р. Усманов, И. Г. Хуснутдинова, Э. М. Баширова // Наука. Технология. Производство – 2017. Прикладная наука как инструмент развития нефтехимических производств: матер. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной дню Химика и 40-летию кафедры химико-технологических процессов Филиала УГНТУ в г. Салавате / редкол.: Н. Г. Евдокимова и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. – С. 387 - 389.

124. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Разработка метода количественной оценки технического состояния кабельных линий 6 кВ / Ж. да К. Новикова Ф. Ш., М. Г. Баширов, И. В. Прахов // Технические науки. Журнал Современные наукоемкие технологии. – Москва. Издательские Дом «Академия Естествознания», 2015 – С. 63 - 67.

125. Рощин, А. В. Основы теории автоматического управления: учебное

пособие / А. В. Рошин. – М.: МГУПИ, 2007. – 100 с.

126. Поляков, К. Ю. Основы теории автоматического управления: учебное пособие / К. Ю. Поляков. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2012. – 234 с.

127. Петрухин, В. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В. В. Петрухин – М.: Инфра-Инженерия, 2010 – 176 с.

128. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200136419/> (дата обращения 13.12.2020).

129. Прахов, И. В. Интегральные критерии для диагностики кабельных линий 6 кВ. / И. В. Прахов, Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер // Секция: Современные методы и средства диагностики электроэнергетического и электротехнического оборудования, средств и систем автоматики. Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Технология. Производство – 2016», посвященной 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате. – Салават, 2016. – С. 195 - 198.

130. ГОСТ 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения 13.12.2020).

131. ГОСТ ИЕС 60332-1-1-2011. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Ч. 1-1. Испытание на нераспространение горения одиночного вертикально расположенного изолированного провода или кабеля. Испытательное оборудование. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200098868> (дата обращения 13.12.2020).

132. ГОСТ МЭК 60332-1-2-2011 Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Ч. 1-2. Испытание на нераспространение горения одиночного вертикально расположенного изолированного провода или кабеля. Проведение испытания при воздействии пламенем газовой горелки мощностью 1 кВт с предварительным смешением газов. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200098669/> (дата обращения 13.12.2020).

133. Смелков, Г. И. Пожарная безопасность электропроводок / Г. И. Смелков – М.: КАБЕЛЬ, 2009. – 328 с.

134. Bay O.F., Bayir R. Kohonen network based fault diagnosis and condition monitoring of pre-engaged starter motors// International journal of automotive technology. – 2005. – Vol. 6. – № 4. – P. 341 - 350.

135. Boiko A., Shendryk V. System Integration and Security of Information Systems // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 104. P. 35 - 42.

136. Редько, В. Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В. Г. Редько. – М.: Ленанд, 2015. – 224 с.

137. Ростик, Г. В. О тепловизионном контроле электрических машин и электрооборудования / Г. В. Ростик // Энергетик. – 2002. – № 8. – С. 61.

138. Давиденко, И. В. Формирование и использование пространств диагностических признаков в экспертной системе оценки технического состояния энергооборудования / И. В. Давиденко // ЕЕССЕС 2003: Труды международной конференции «Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы 2003» – Екатеринбург, 2003. – 416 с.

139. Давиденко, И. В. Структура базы знаний экспертно-диагностической системы оценки технического состояния энергооборудования/ И. В. Давиденко // Вестник ГОУ ВПО УГТУ - УПИ. Проектирование и анализ радиотехнических и информационных систем: Серия радиотехническая. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 167 с.

140. Зажигаев, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – М.: Атомиздат., 1978. – 232 с.

141. Переездчиков, И. В. Методология анализа опасностей промышленных систем «человек-машина-среда» на базе теории четких и нечетких множеств / И. В. Переездчиков // Образование через науку. Тезисы докладов Международной конференции. – 2005. – С. 509 - 510.

142. Ясько, Н. Р. Оценка энергобезопасности и энергоэффективности оборудования на основе интегральных критериев / Н. Р. Ясько, И. С. Миронова // Наука. Технология. Производство: тезисы докладов межвузовской научно-

технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд. УГНТУ, 2012. – С. 87 - 89.

143. Миронова, И. С. Разработка системы «улучшенного управления» техническим состоянием электрооборудования и промышленной безопасностью предприятий нефтегазовой отрасли / И. С. Миронова, А. М. Хафизов, Д. Г. Чурагулов // Фёдоровские чтения – 2014. – М.: Издательство МЭИ, 2014. – С. 37-39.

144. Прахов, И. В. Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки технического состояния кабельных линий 6 кВ. Секция: «Эксплуатация и техническое диагностирование электрооборудования» / И. В. Прахов, Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. Межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – Уфа. Издательство: УГНТУ, 2016 – С. 569 - 572.

145. P.A. Rahman and G. D'K. Novikova Freyre Shavier, Analysis of mean time to data loss of fault-tolerant disk arrays RAID-6 based on specialized Markov chain, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 327, 022086 Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/2/022086/pdf> (дата обращения: 13.12.2020).

146. P.A. Rahman and G. D'K. Novikova Freyre Shavier, Reliability model of disk arrays RAID-5 with data striping, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, Vol. 327, 022087 Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/2/022087/pdf> (дата обращения: 13.12.2020).

147. Албахари, Б. С# 7.0. Справочник. Полное описание языка (С# 7.0 in a Nutshell) / Б. Албахари, Дж. Албахари (переводчик Артеменко Ю. Н.). – Вильямс, 2018. – 1024.

148. Мюллер, Дж. Пол С# для чайников / Дж. Пол Мюллер, Б. Семпф, Ч. Сфера (переводчик Красиков И. В.). – Диалектика, 2019. – 608.

149. Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Применение комбинированной диагностики в задачах обеспечения промышленной безопасности в нефтегазовой отрасли / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, Ф. Ш. Хафизов, И. Ф. Хафизов //

Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли: материалы II Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2019 – С. 140 - 142.

150. Гончаренко, Г. М. Испытательные установки и измерительные устройства в лабораториях высокого напряжения / Г. М. Гончаренко, Е. М. Жаков. – М.: Физика, 1966. – 227 с.

151. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения 13.12.2020).

152. Тартаковский, Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учебн. для вузов / Д. Ф. Тартаковский. – М.: Высш. шк., 2002. – 205 с.

153. ГОСТ Р МЭК 62502-2014. Менеджмент риска. Анализ дерева событий. [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200114221> (дата обращения 13.12.2020).

154. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств». Серия 09. Выпуск 37. – 2-е изд., доп. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 126 с.

155. Анисимов Н. К. Организация, планирование и управление в хозяйстве сигнализации и связи / Н. К. Анисимов, А. И. Брейдо // М.: Транспорт – 1979, 247 с.

156. Thomson, W.T. Current signature analysis to detect induction motor faults / W.T. Thomson, M. Fenger // IEEE Industry Application Magazine. – 2001. – July/August.

157. Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К. Техничко-экономическая эффективность внедрения диагностики кабелей на предприятиях нефтегазовой отрасли / Ж. да К. Новикова Ф. Ш. // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019 - №5. – С. 48 - 57. - URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5\\_2019/ogbus\\_5\\_2019\\_p48-57.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2019/ogbus_5_2019_p48-57.pdf)

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(обязательное)

**Результаты экспериментальных исследований**

Таблица А.1 – Экспериментальные данные для кабеля ААШв

Исправный кабель		Деформированный кабель	
t	y(t)	t	y(t)
0	1600	0	8600
2	1602	2	8602
4	1604	4	8604
6	1606	6	8606
8	1608	8	8608
10	1610	10	8610
12	1612	12	8612
14	1614	14	8614
16	1616	16	8616
18	1618	18	8618
20	1620	20	8620
22	1622	22	8622
24	1624	24	8624
26	1626	26	8626
28	1628	28	8628
30	1630	30	8630
32	1632	32	8632
34	1634	34	8634
36	1636	36	8636
38	1638	38	8638
40	1640	40	8640
42	1642	42	8642
44	1644	44	8644
46	1646	46	8646
48	1648	48	8648
50	1650	50	8650

продолжение Таблицы А.1

52	1652	52	8652
54	1654	54	8654
56	1656	56	8656
58	1658	58	8658
60	1660	60	8660
62	1662	62	8662
64	1664	64	8664
66	1666	66	8666
68	1668	68	8668
70	1670	70	8670
72	1672	72	8672
74	1674	74	8674
76	1676	76	8676
78	1678	78	8678
80	1680	80	8680
82	1682	82	8682
84	1684	84	8684
86	1686	86	8686
88	1688	88	8688
90	1690	90	8690
92	1692	92	8692
94	1694	94	8694
96	1696	96	8696
98	1698	98	8698
100	1700	100	8700
102	1702	102	8702
104	1704	104	8704
106	1706	106	8706

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

(обязательное)

**Патент****РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ****ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2729173

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет" (RU)*

Авторы: *Новикова Фрейре Шавиер Жессиане да Консейсау (RU), Хафизов Фаниль Шамильевич (RU), Хафизов Ильдар Фанилевич (RU)*

Заявка № 2019138632

Приоритет изобретения 28 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 августа 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 ноября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

(рекомендуемое)

**Акты и справки о внедрении**

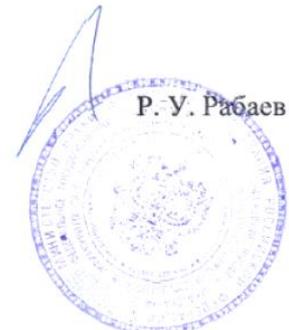
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ <b>«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО "УГНТУ")</b>	
ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450064. Тел.: (347) 242-03-70, <a href="http://www.nisoiil.net">http://www.nisoiil.net</a> , E-mail <a href="mailto:info@nisoiil.net">info@nisoiil.net</a> ИНН 0277006179, ОГРН 1020203079016, ОКПО 02069450, КПП 027701001	
13.03.2013 № 90-18/25 На № _____ от _____	В диссертационный совет 24.2.428.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» 450064, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

**СПРАВКА**

о внедрении результатов диссертационной работы  
соискателя степени кандидата технических наук  
**Новиковой Фрейре Шавиер Жессиане да Консейсау**  
по теме «Обеспечение безопасности кабельных линий 6-35 кВ с использованием  
комбинированной диагностики»,  
специальность 2.10.1. – «Пожарная безопасность» (технические науки)

Разработанные при личном участии аспиранта очной формы обучения Уфимского государственного нефтяного технического университета Новиковой Фрейре Шавиер Жессиане да Консейсау математическая модель формирования интегрального критерия безопасности и алгоритм со структурной схемой программно-аппаратного комплекса для реализации комбинированного метода диагностики с целью обеспечения безопасной эксплуатации кабельных линий напряжением 6-35 кВ с помощью оценки их технического состояния используются в учебном процессе ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Уфе при проведении лабораторных занятий для студентов, обучающихся по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» с целью формирования базы знаний по обеспечению пожарной безопасности на промышленных предприятиях.

Проректор по научной и  
инновационной работе УГНТУ  
к.т.н., доцент





**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«САЛАВТНЕФТЕМАШ»**  
(АО «Салаватнефтемаш»)

ул. Молодогвардейцев, д. 26, г. Салават,  
Республика Башкортостан,  
Российская Федерация, 453256,  
тел: (3476) 37-75-50, факс (3476) 37-75-32  
ОКПО 05754941, ОГРН 1020201994482,  
ИНН/КПП: 0266017771/026601001  
[www.snm.ru](http://www.snm.ru), e-mail: [snm@snm.ru](mailto:snm@snm.ru)

09.02.2023 № \_\_\_\_\_

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

В диссертационный совет 24.2.428.06  
при Федеральном государственном  
бюджетном образовательном учреждении  
высшего образования  
«Уфимский государственный нефтяной  
технический университет»  
450064, Россия, Республика Башкортостан,  
г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

### СПРАВКА

Разработанный при личном участии аспиранта очной формы обучения Уфимского государственного нефтяного технического университета Новиковой Фрейре Шавиер Жессиане да Консейсау комбинированный метод диагностики технического состояния кабельных линий напряжением 6-35 кВ, основанный на применении интегрального критерия безопасности, планируется использовать в исследованиях по совершенствованию методов, направленных на обеспечение пожарной и промышленной безопасности нефтегазового оборудования.

Главный инженер



И. Ю. Крутиков



Сертифицировано  
Русским Регистром



Общество с ограниченной ответственностью  
«Акрил Салават»  
(ООО «Акрил Салават»)  
ул. Молодогвардейцев, д. 30, г. Салават,  
Республика Башкортостан,  
Российская Федерация, 453256,  
тел: (3476) 39-15-32  
ОКПО 12711752, ОГРН 1120280051990,  
ИНН/КПП: 0266040210/026601001

**По месту требования**

10.02.2023г. № \_\_\_\_\_  
На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

Разработанная при участии аспиранта кафедры «Пожарная и промышленная безопасность» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» Новиковой Фрейре Шавиер Жессиане да Консейсау математическая модель формирования интегрального критерия безопасности для кабельных линий напряжением 6-35 кВ с помощью комбинированного метода диагностики принята к рассмотрению для практического применения с целью обеспечения безопасной эксплуатации данных типов кабелей на объектах промышленных предприятий.

Главный энергетик – начальник отдела

 Д.В. Подрядов

