

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2024

Работа выполнена на кафедре «Пожарная и промышленная безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»).

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хафизов Фаниль Шамильевич
- Официальные оппоненты: **Сидоров Александр Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» / кафедра «Безопасность жизнедеятельности», заведующий кафедрой
- Головина Екатерина Валерьевна**
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Уральский институт ГПС МЧС России» / научно-исследовательский отдел, заместитель начальника
- Ведущая организация: ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (г. Балашиха)

Защита состоится «18» апреля 2024 года в 16-00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.428.06 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Павлова Зухра Хасановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, P. H. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика диссертационной работы, обоснована её актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор, посвященный вопросам обеспечения пожарной безопасности технологических процессов в нефтегазовой отрасли при неисправностях кабельных линий 6-35 кВ. Проведен анализ основных угроз, влекущие за собой опасные ситуации на нефтегазовых предприятиях, где пожары составляют 59 % от общего числа. Сделана обработка статистических данных по аварийности электрооборудования за период времени с 2008 по 2019 гг., где кабельные линии 6-35 кВ (далее КЛ) имеют первое место по повреждениям и отказам (Рисунок 1).

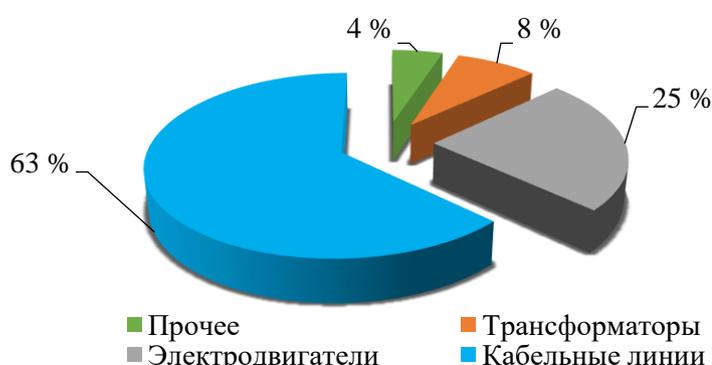


Рисунок 1 – Аварийность электрооборудования за период с 2008 по 2019 гг.

Проведен обзор нормативно-технической документации, которая на данный момент регламентирует только один метод контроля за КЛ 6-35 кВ – это испытание повышенным выпрямленным напряжением. Но оно не обеспечивает дальнейшую безаварийную работу, так как в большинстве случаев наоборот влечёт за собой пробой. На Рисунке 2 представлены данные по пробоям согласно данным службы эксплуатации силовых КЛ.

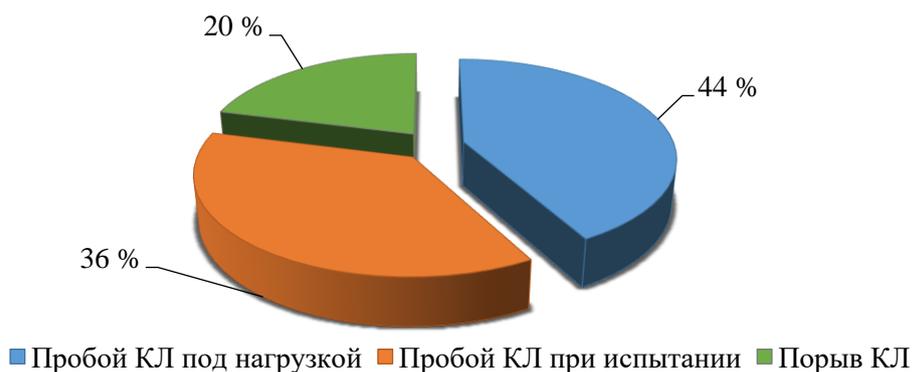


Рисунок 2 – Статистические данные пробоев кабельных линий 6-35 кВ

Рассмотрены предлагаемые на сегодняшний день альтернативные методы и средства обеспечения безопасной эксплуатации КЛ за счет оценки технического их состояния. Установлено, что главным минусом данных методов является неумение обнаружить перемены характеристик и дефектов на их первоначальных стадиях. В связи с этим актуальной задачей считается создание новейшего метода оценки текущего технического состояния КЛ 6-35 кВ, учитывающего все без исключения характеристики объекта, а также условия и сроки эксплуатации. Таким образом переход на сервис по фактическому состоянию КЛ за счет метода диагностики является одним из радикальных путей решения.

Во **второй главе** разработаны ключевые этапы с целью изучения КЛ 6-35 кВ, продемонстрированные на Рисунке 3. 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.

Для оценки технического состояния, а, следовательно, с целью дальнейшей безопасной эксплуатации КЛ рассмотрены методы следующей идентификации или распознавания: метрический метод (количественная оценка, где мера близости – это расстояние между точками, изображающими состояние объекта в пространстве признаков); динамический (оценка в виде определения передаточной функции, которая определяется связью между входными и выходными сигналами объекта); метод искусственных нейронных сетей (ИНС) (базируется на применении таких элементов, многофункциональные способности которых аналогичны большинству

простых функций биологического нейрона). Именно использование ИНС в целях диагностики обретает значительный интерес. ИНС дают возможность уменьшить аппарат по определению образов без всевозможных изменений точности либо достоверности результатов. Одним из значимых превосходств применения данных сетей считается возможность их обучения, что дает возможность расширить базу данных и увеличить подлинность итогов.

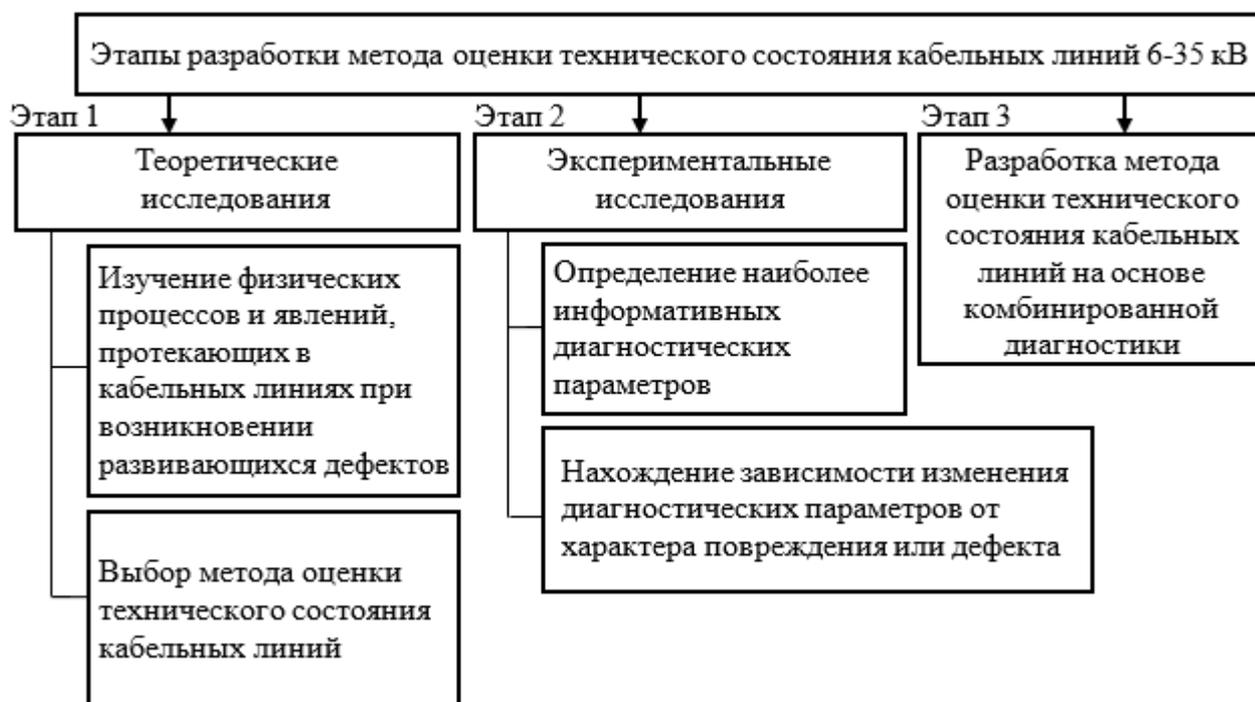


Рисунок 3 – Ключевые этапы для проведения исследований КЛ

Таким образом для оценки технического состояния КЛ 6 – 35 кВ может быть использована совокупность способов и методов, которые в свое время измеряют разнообразные параметры и снимают различные характеристики. Но эти сведения должны давать точное определение текущего состояния. Логично предположить, что полученных во время исследований параметров и характеристик 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 состояние КЛ 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.

В **третьей главе** с целью определения информативных диагностических параметров, взаимосвязанных с уровнем поврежденности КЛ и муфт разработана экспериментальная установка (Рисунок 4), и проведены исследования, в качестве объектов исследования отобраны применяемые на промышленных предприятиях, согласно ПУЭ (пункт 7.3.93), ГОСТ Р 58342-2019 (пункт 10.2) и каталогу, типы кабелей и муфт, такие как ААШв-6, ААБл-10 и СС-90 (110) соответственно. Эти кабели используются сейчас, а многие из них проложены ещё с советских времен.

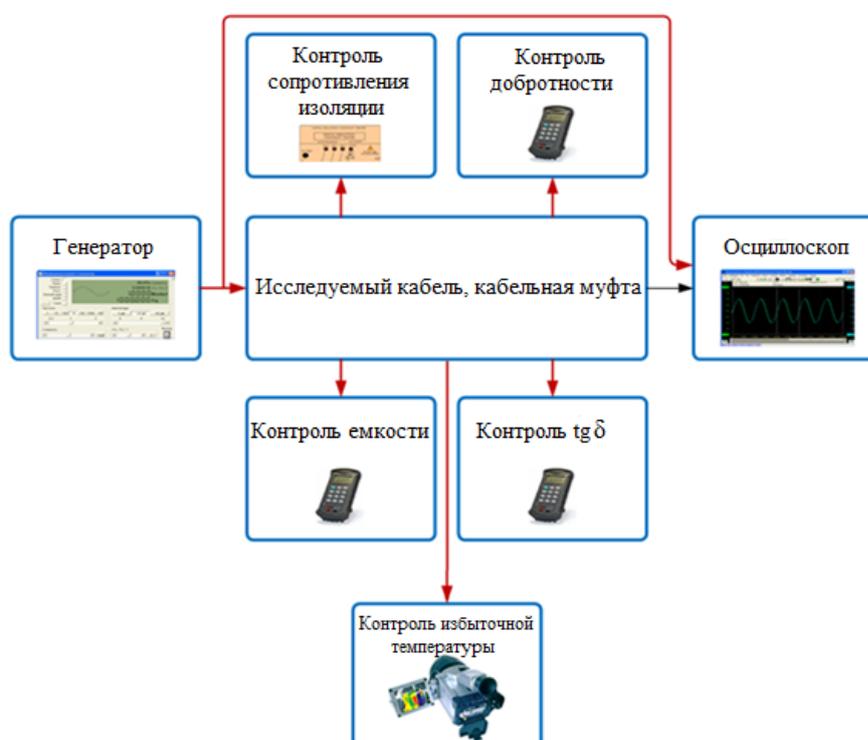


Рисунок 4 – Структурная схема установки для экспериментов

Во время проведения исследования был разработан метод комбинированной диагностики, основанный на измерении и регистрации электрических параметров и характеристик (C , $\text{tg}\delta$, Q , R), измерении параметров теплового состояния (ΔT) и применении системы «черного ящика» (S (I_m), S (R_e)). Различные технические состояния исследуемых КЛ имитировались путем преждевременного проведения

испытаний в соответствии с ГОСТ 18410-73. На разработанный способ получен патент РФ на изобретение № 2729173.

Результаты исследований подтвердили, что в процессе развития дефектов происходят изменения диагностических параметров. И определены их значения, которые отвечают критическому состоянию КЛ. Также отмечено, что для каждого случая процессы старения либо деградации, а также виды повреждения происходят по-разному и это подчеркивает, что рассматривать диагностические параметры нужно в совокупности. На Рисунке 5 представлен пример лепестковой диаграммы, отражающей взаимосвязь зарегистрированных диагностических параметров с техническим состоянием КЛ.

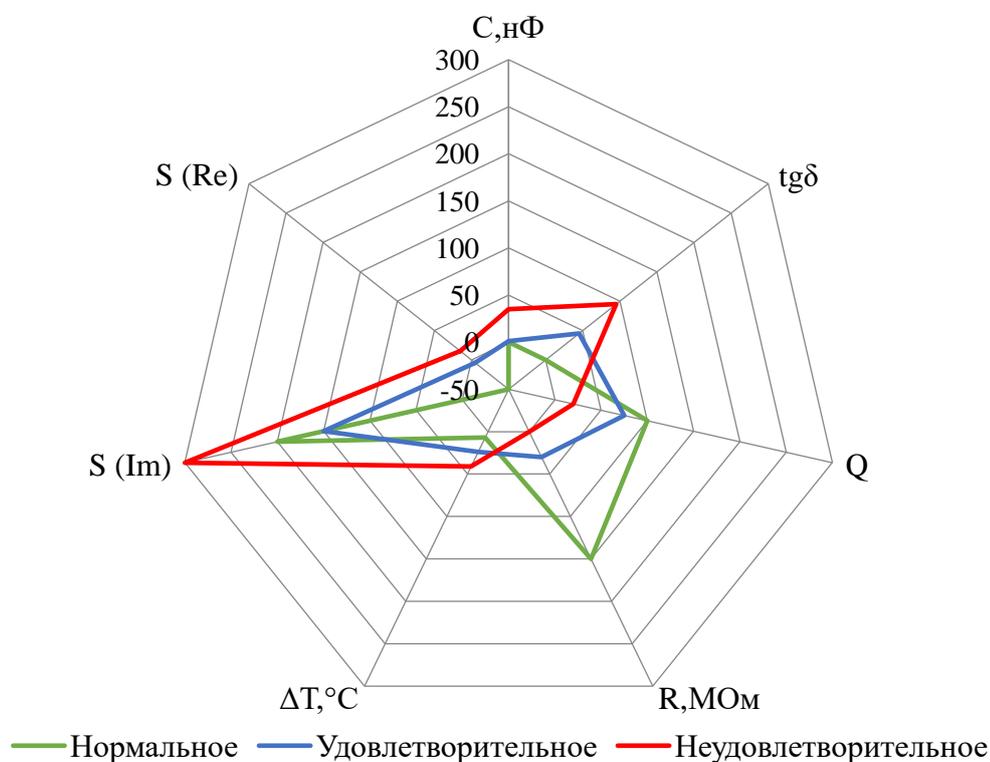


Рисунок 5 – Лепестковая диаграмма для оценки состояний кабелей ААШв

В части пожарной безопасности кабельных линий проведены исследования на нераспространение горения в соответствии с требованиями ГОСТ ИЕС 60332-3-22-2011. В условиях воздействия на них пламенем в результате получен параметр нераспространения горения K_B , что дает возможность проводить проверку на соответствие заявленного изготовителем стандарта либо ТУ на конкретный тип и

марку кабеля. Также соответствие кабелей требованиям пожарной безопасности определяется по ГОСТ 31565-2012 (Рисунок 6).

Показатель K_B предлагается принимать во внимание непременно вследствие того, что кабель – это непростая конструкция, имеющая несколько частей, которые содержат в себе источники тепла также зажигания, например, во время аварийных ситуаций, подобных как короткое замыкание, источником может стать жидкий металл, который расплавился.



Рисунок 6 – Воздействие пламени на кабель ААШв во время испытаний

Непосредственно по этой причине из каждой партии кабелей желательно отбирать образцы с целью проведения испытаний и определения показателя нераспространения горения, а ни в коем случае не просто учитывать материал, из которого он выполнен.

Четвертая глава посвящена разработке интегральных диагностических параметров с целью оценки состояния КЛ, а также формированию интегрального критерия безопасности I_{Σ} . Во время исследований были получены диагностические параметры, из которых поэтапно и формируется I_{Σ} (Рисунок 7).

Далее представлены этапы формирования каждого интегрального параметра и критерия через ИНС, а именно через слой Кохонена.



Рисунок 7 – Формирование интегрального критерия безопасности

Вследствие исследования КЛ 6-35 кВ как некие «черные ящики» был выведен интегральный диагностический параметр $D_{W(p)}$ (формула 1), который находится в зависимости от передаточной функции и её корней. $D_{W(p)}$ позволяет анализировать процессы, протекающие внутри КЛ, которые оказывают большое влияние на их техническое состояние в общем.

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

где w_{j0} – предельный порог;

m – входы для параллельных компонентов;

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

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 2.

$$D_n = f \left(w_{j0} + \sum_{i=1}^m (w_C \cdot C_i + w_{tg\delta} \cdot tg\delta_i + w_Q \cdot Q_i + w_R \cdot R_i) \right), \quad (2)$$

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

А интегральный диагностический параметр, который характеризует тепловое состояние КЛ, рассчитывается по формуле 3.

$$D_{t^{\circ}C} = f(\Delta T) = f \left(w_{j0} + \sum (w_T \cdot k_{\Delta T}) \right), \quad (3)$$

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

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.

$$I = \delta_{W(p)} \cdot D_{W(p)} + \delta_n \cdot D_n + \delta_{t^{\circ}C} \cdot D_{t^{\circ}C}, \quad (4)$$

где $\delta_{W(p)}$, δ_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.

С целью более 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, и также показатель нераспространения горения, рассмотренный в третьей главе данной диссертации. Эти показатели выступают как уточняющие параметры, которые хорошо определяют примененный материал для кабеля и его конструкцию.

Составим математическую модель, которая благодаря ИНС и формирует I_{Σ} – интегральный критерий безопасности для КЛ 6-35 кВ (формула 5).

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m (\delta^j \cdot I_i + q^j \cdot K_{Bi} + g^j \cdot r_i), \quad (5)$$

где r_i – коэффициент срока эксплуатации;

δ^j – коэффициент («вес»), определяющий важность критерия I для j-го вида 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») δ^j , q^j , g^j устанавливаются в процессе экспертного оценивания. А r_i определяется ИНС.

Опираясь на известную шкалу экспертной оценки для оборудования и машин критерий I_{Σ} был поделен на следующие уровни, представленные на Рисунке 8. Согласно ГОСТ 27.002-2015 установлено, что 100 % уровень, отвечает состоянию исследуемой КЛ, когда дальнейшее их использование не разрешено.

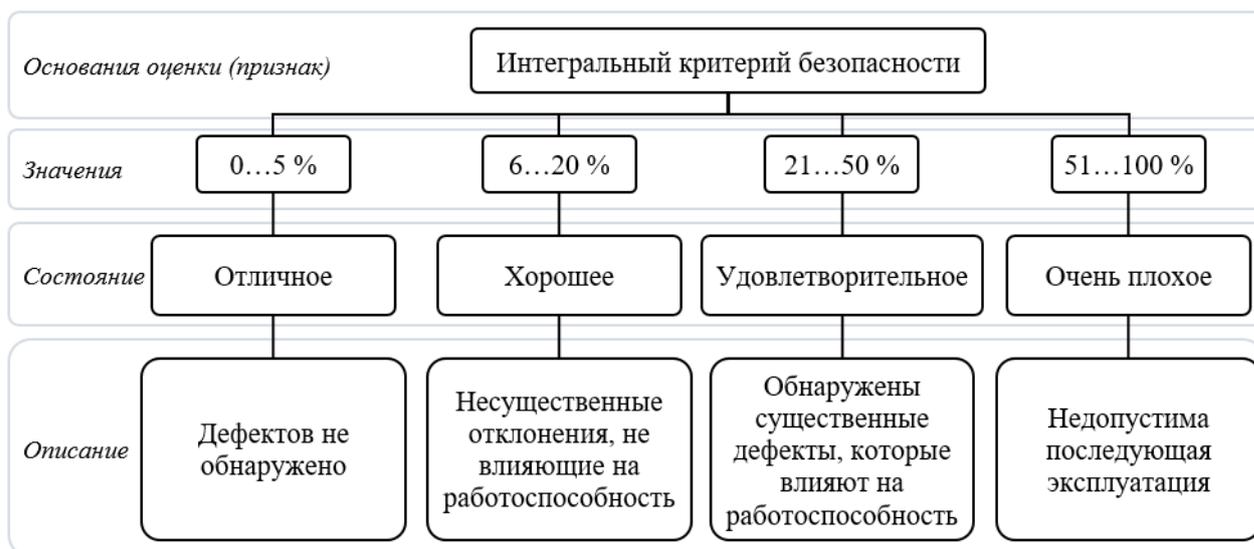


Рисунок 8 – Значения I_{Σ} , которым соответствует техническое состояние КЛ

Для реализации разработанного метода составлены алгоритмы и на основе их разработан программно-аппаратный комплекс (Рисунки 9-11).



Рисунок 9 – Структурная схема комплекса для установления состояния КЛ

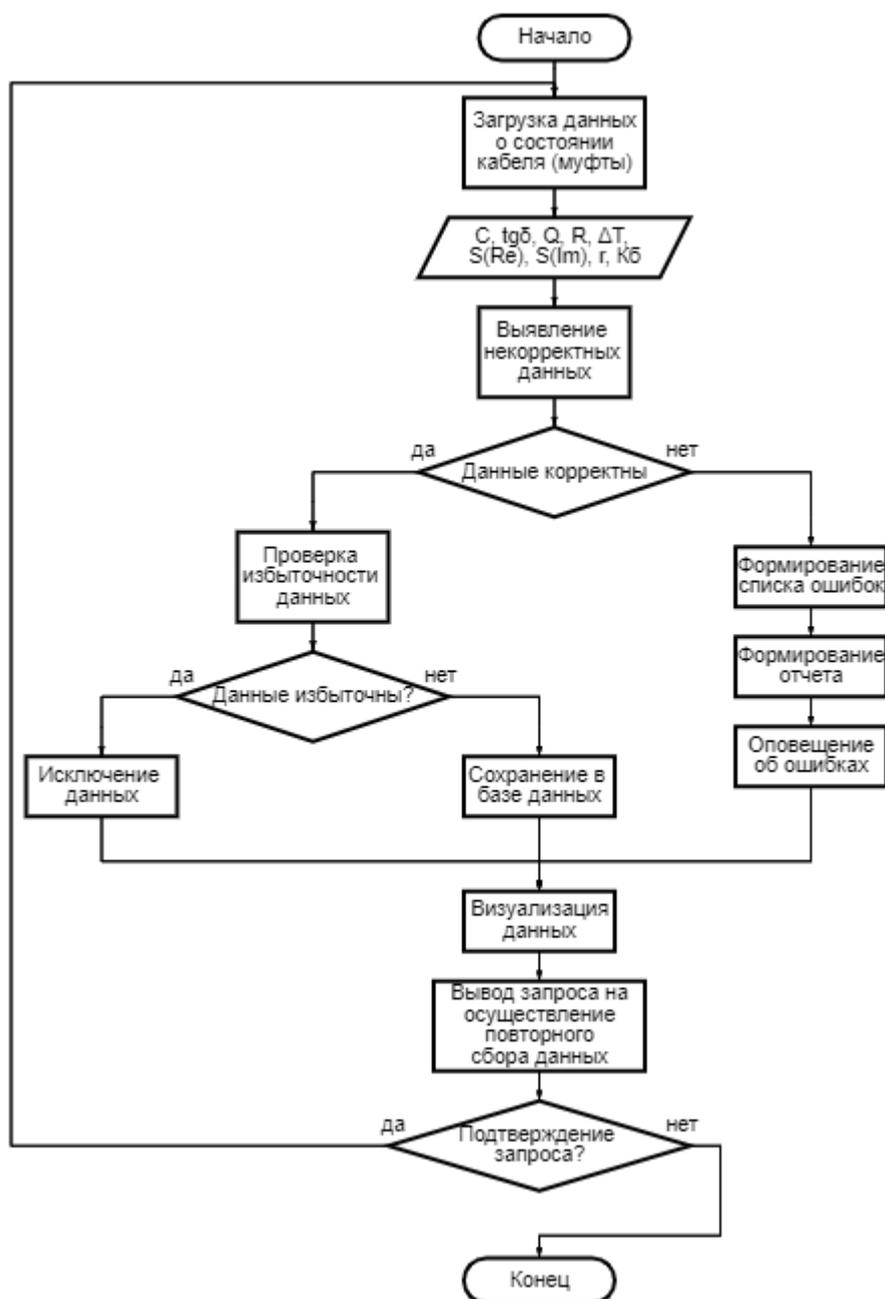


Рисунок 10 – Алгоритм первичной обработки данных

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

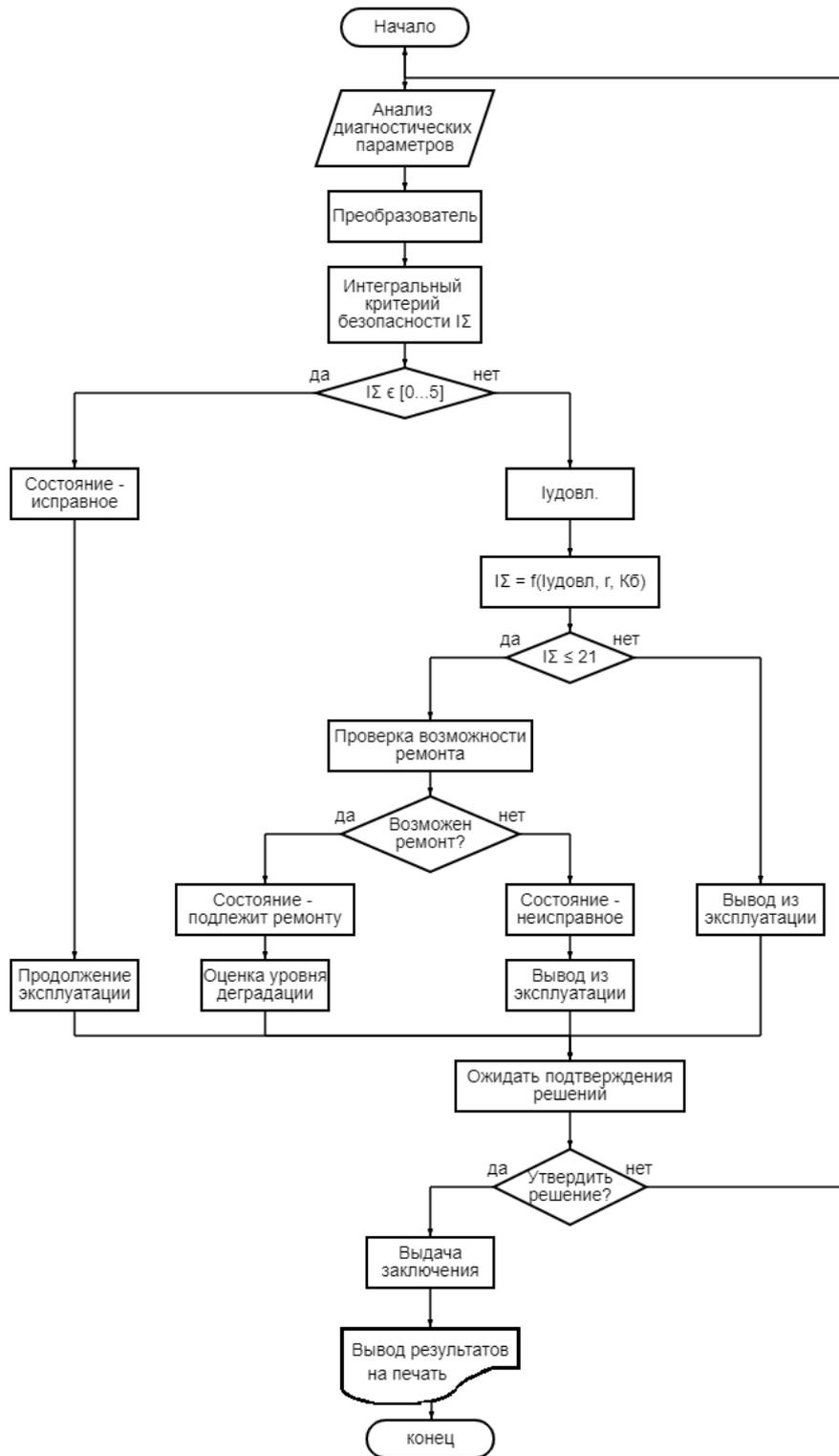


Рисунок 11 – Алгоритм принятия решения о дальнейшей эксплуатации КЛ

Для практического применения данного метода созданы рекомендации, в них указано что дополнительно можно применять для того, чтобы упростить непростые математические вычисления, и что в будущем необходимо формирование базы

данных для наиболее точной оценки. Если в совершенстве снимать все требуемые параметры на одном и том же образце кабеля через равные промежутки времени в течении его эксплуатации, то в дальнейшем может стать допустимо применение I_{Σ} с целью ранжирования КЛ по их текущему техническому состоянию, что позволит разработать управленческие решения для увеличения энергобезопасности.

Чтобы показать и экономическую эффективность от разработанного способа выполнен анализ того, на какой стадии развития располагается на данный момент нефтегазовая отрасль и интенсивность инвестирования в диагностирование КЛ 6-35 кВ. Данный анализ показал, что «привлекательность» находится на среднем уровне, что соответствует графику на Рисунке 12. Это означает, что экономические вложения считаются целесообразными, а внедрение разработанного метода позволит уменьшить расходы на замену кабелей при их отказах в результате преждевременной оценки состояния и сведет уровень перебраковки к 0.



Рисунок 12 – Анализ уровня «привлекательности» предложенного метода в нефтегазовой отрасли

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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_{Σ} для КЛ 6-35 кВ, формируемая с помощью искусственной нейронной сети. Значения I_{Σ} 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_{Σ} 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.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 19 научных трудах, в том числе:

- в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ по специальности:

1 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.

2 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

3 Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Техничко-экономическая эффективность внедрения диагностики кабелей на предприятиях нефтегазовой отрасли / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019 - №5. – С. 48-57. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2019/ogbus_5_2019_p48-57.pdf

4 Новикова Фрейре Шавиер, Ж. да К. Пути снижения числа пожаров, связанных с

аварийными режимами работы кабельных линий, на производственных объектах / Ж. да К. Новикова Фрейре Шавиер, Ф. Ш. Хафизов // Безопасность жизнедеятельности. – Москва: Изд-во ООО «Новые технологии», 2023. - № 12 (276). – С. 49-53.

- статьи в изданиях, индексируемых Scopus:

5 Khafizov, F. SH. Methodological approaches to the development of an integral criterion for assessing the condition of 6 kV power cables at the industrial enterprises / F. SH. Khavizov, ZH. Da K. Novikova Freyre Shavier // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. – 2020, 2020(10). – P. 71 – 76 (*входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ по специальности; DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-71-76*).

- в прочих изданиях:

6 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.

7 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.

8 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 (РИНЦ). – Уфа, 2019 – С. 140-142.

- патент:

9 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.