

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Электротехнический факультет

Кафедра электроснабжения

В.Г. Басманов

**Современные методы диагностики объектов
электроэнергетики**

Учебное пособие

Киров

2013

УДК 621.311.004.18(07)

Б199

Рекомендовано к изданию методическим советом
электротехнического факультета ФГБОУ ВПО
«ВятГУ»

Допущено редакционно-издательской комиссией методического совета ФГБОУ ВПО «ВятГУ» в качестве учебного пособия для магистров направление подготовки 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника», «Системы электроснабжения и управление ими».

Рецензенты:

кандидат технических наук, кафедра электрических станций
Н.Н. Якимчук;

зам. начальника отделения по техническим вопросам, гл. инженер ПО «Северные электрические сети» филиала «Кировэнерго» ОАО «МРСК Центра и Приволжья»
С.А. Пономарев

Басманов В.Г.

Б199 Современные методы диагностики объектов электроэнергетики:
учебное пособие / В.Г. Басманов. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013.
– 136 с.

В учебном пособии рассматриваются современные методы диагностики объектов электроэнергетики. Учебное пособие рекомендуется при изучении дисциплины
«Современные методы диагностики объектов электроэнергетики»

Авторская редакция

© Басманов В.Г., 2013.

© ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2013

1. Общие вопросы технической диагностики

Техническая диагностика - отрасль научно-технических знаний, сущность которой составляют теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы.

Дефект – любое несоответствие свойств объекта заданным, требуемым или ожидаемым его свойствам.

Основное назначение технической диагностики - повышение надежности объектов на этапе их эксплуатации, а также в предотвращении производственного брака на этапе изготовления объектов и их частей.

Повышение надежности обеспечивается улучшением таких показателей:

- коэффициент готовности;
- коэффициент технического использования;
- время восстановления работоспособного состояния;
- ресурс или срок службы и наработка до отказа или наработка на отказ для резервированных объектов с восстановлением.

Кроме того, диагностическое обеспечение позволяет получать высокие значения достоверности правильного функционирования объектов. Предотвращение производственного брака достигается правильной организацией диагностирования на операциях входного контроля комплектующих изделий и материалов, а также контроля технологических процессов изготовления объектов, включая выходной контроль последних.

Обнаружение и поиск дефектов являются процессами *определения технического состояния* объекта и объединяются общим термином (*диагностирование*»; *диагноз* есть результат диагностирования).

Задачами диагностирования являются:

- проверка исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта;
- поиск дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования.

Постановка этих задач предполагает:

- - прямое или косвенное задание класса возможных (рассматриваемых, заданных, наиболее вероятных) дефектов;
- - наличие формализованных методов построения алгоритмов диагностирования, реализация которых обеспечивает обнаружение дефектов из заданного класса с требуемой полнотой или поиск последних с требуемой глубиной.

Диагностирование технического состояния любого объекта осуществляется теми или иными *средствами диагностирования*.

Средства могут быть:

- аппаратными;
- программными; в
- качестве средств диагностирования может также выступать человек-оператор, контролёр, наладчик.

Средства и объект диагностирования, взаимодействующие между собой, образуют *систему диагностирования*.

Различают системы *тестового* и *функционального диагностирования*.

В системах тестового диагностирования на объект подаются специально организуемые *тестовые воздействия*.

В системах функционального диагностирования, которые работают в процессе применения объекта по назначению, подача тестовых воздействий, как правило, исключается; на объект поступают только *рабочие воздействия*, предусмотренные его алгоритмом функционирования.

В системах обоих видов средства диагностирования воспринимают и анализируют *ответы объекта* на входные (тестовые или рабочие) воздействия и выдают результат диагностирования, т.е. ставят диагноз: объект исправен или неисправен, работоспособен или неработоспособен, функционирует правильно или неправильно, имеет такой-то дефект или в объекте повреждена такая-то его составная часть и т.п. Системы тестового диагностирования необходимы для проверки исправности и работоспособности, а также поиска дефектов,

нарушающих исправность или работоспособность объекта. Системы функционального диагностирования необходимы для проверки правильности функционирования и для поиска дефектов, нарушающих правильное функционирование объекта.

Система диагностирования в процессе определения технического состояния объекта реализует некоторый алгоритм (тестового или функционального) диагностирования.

Алгоритм диагностирования состоит из совокупности элементарных проверок объекта и правил, устанавливающих последовательность реализации элементарных проверок, и правил анализа результатов этих проверок.

Эффективность процессов диагностирования зависит от качества алгоритмов диагностирования и качества средств диагностирования.

Средства диагностирования могут быть:

- аппаратными или программными;
- внешними или встроенными;
- ручными, автоматизированными или автоматическими;
- специализированными или универсальными.

Выбор или разработка средств тестового диагностирования должны осуществляться с учетом следующих факторов:

- наличия серийного выпуска требуемых средств;
- наличия подходящих средств на заводе-изготовителе объекта;
- массовости выпуска объекта и его сложности;
- требуемой производительности средств и т.п.

Средства функционального диагностирования являются встроенными, поэтому разрабатываются и создаются одновременно с объектом.

Задачи определения технического состояния объектов:

- задача диагностирования (техническая диагностика);
- задача прогнозирования (техническая прогностика);
- задача генеза (техническая генетика).

Задача технической генетики возникает, например, при расследовании аварий и их причин, когда техническое состояние объекта в рассматриваемое время отличается от состояния, в котором он был в прошлом, в результате появления первопричины, вызвавшей аварию. Эти задачи решаются путем определения возможных или вероятных предысторий, ведущих в настоящее состояние объекта.

К задачам технической прогностики относятся, например, задачи, связанные с определением срока службы объекта или с названием периодичности его профилактических проверок и ремонтов. Решение задач прогнозирования важно для организации технического обслуживания объектов по состоянию.

Тестовое и функциональное диагностирование

Классы объектов в технической диагностике:

- дискретные;
- аналоговые.

Для дискретных объектов задачей технической диагностики является построение тестов.

В качестве диагностических моделей аналоговых объектов используются логические модели, графы причинно-следственных связей. Эти модели могут быть использованы при организации диагностирования на принципах допускового контроля параметров объектов.

Параметры диагностирования

Для определения работоспособности изделия, поиска дефектов и прогнозирования состояния оборудования необходимо измерять диагностические параметры.

К основным измеряемым диагностическим параметрам относятся параметры назначения и надежности объекта, находящиеся в функциональной зависимости от измеряемых физических величин.

Измерение физических параметров является основой различных методов и средств диагностирования объектов.

Для исследования технического состояния объекта применяются все известные виды электромагнитного излучения (акустические, звуковые, вибрационные методы исследования, корпускулярные излучения и электростатические поля).

Для диагностирования объектов используют широкую номенклатуру испытательной техники (приборы для определения твердости и упругости констант материалов, приборы для исследования воздействия климатических факторов, машины для испытания материалов на растяжение и сжатие, изгиб, удар, срез, кручение и т.д.)

Для технического диагностирования оборудования используются часто следующие виды измерений:

- электрометрия;
- измерение вибрации;
- измерение шума;
- измерение механических свойств;
- измерение состава вещества;
- измерение давления, температуры, влажности и т.д.

2.Измерение электрических и магнитных величин

2.1. Общие положения

Основные методы измерения электрических величин:

- непосредственная оценка;
- сравнение (дифференциальное, нулевое, замещение, противопоставление, совпадение).

Средства измерения электрических величин делятся на:

- аналоговые;
- цифровые.

Методы, применяемые при измерении параметров линейных элементов:

- вольтметра-амперметра;
- метод непосредственной оценки;

мостовой метод.

Методы фиксации изменения параметров магнитного поля в преобразователях:

- в виде изменения параметров электрической цепи преобразователя (гальваномагнитные);
- в виде ЭДС электромагнитной индукции, наводимой в измерительной обмотке (индукционные);
- в виде изменения параметров магнитной цепи преобразователя (магнитомодуляционные);
- комбинация первых трех способов (комбинированные).

Методы фиксации изменения параметров магнитного поля в преобразователях:

- в виде изменения параметров электрической цепи преобразователя (гальваномагнитные – преобразователи Холла, магниторезистивные, магнитодиодные и т.д.);

- в виде ЭДС электромагнитной индукции, наводимой в измерительной обмотке (индукционные пассивные преобразователи и вихретоковые преобразователи без сердечника или с сердечником);
- в виде изменения параметров магнитной цепи преобразователя (магнитомодуляционные – работа основана на фиксации изменения параметров магнитной цепи преобразователя, в т.ч. от изменения структуры, механических свойств, геометрических параметров и т.д.);
- комбинация первых трех способов (комбинированные).

2.2 Измерение температуры

Методы измерения температуры делятся на:

- контактные;
- бесконтактные.

Контактные измерения выполняются с помощью жидкостных и манометрических термометров, термопар, термометров сопротивления, термоиндикаторов.

Действие термоиндикаторов основано на изменении агрегатного состояния, яркости цвета свечения некоторых веществ при нагреве.

Преимущества: возможность запоминания распределения температур в процессе испытаний, простота и наглядность, экономичность.

Жидкокристаллические термоиндикаторы представляют собой органические соединения, обладающие свойствами жидкости (текучесть) и твердого кристаллического тела (анизотропия, двойное лучепреломление).

При изменении температуры жидкий кристалл меняет свой цвет.

Плавающие термоиндикаторы делятся на:

- плавкие покрытия;
- термосвидетели.

Покрyтия выпускаются в виде:

- термокарандашей (мелков);

- термолаков;
- термотаблеток (термопорошков).
- Изготавливаются на основе воска, стеарина, парафина или соединений серы, цинка, свинца (для высоких температур).

- На поверхности изделия термокарандашом наносят риску, которая плавится при достижении заданной температуры. Действие термолаков аналогично.

- Термосвидетели представляют собой нанизанные на тугоплавкую проволоку пластинки из металлов, плавящихся при различных температурах.

Бесконтактные методы термометрии

Действие пирометров основано на фотоэлектрической, визуальной и фотографической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорционально их температуре.

Пирометры состоят из:

- фотодетектора;
- объектива для фокусировки излучения на фотодетектор;
- светофильтров;
- блока электронной обработки сигнала.

Тепловизоры применяются для визуализации изображений слабо нагретых тел и оценки их температуры в отдельных точках методами сканирующей пирометрии, т.е. путем последовательного просмотра (сканирования) объекта узкоканальной оптической системой с ИК-приемником и формирования видимого изображения с помощью систем, аналогичных телевизионным.

2.3. Влагометрия

Влажность материала объектов техники и окружающей среды является одним из важных диагностических показателей.

Влажность – физико-химическая количественная характеристика содержания воды как активного структурного компонента материалов, масел и других исследуемых объектов (ИО), которые могут находиться в различных фазовых состояниях и при различной степени диспергирования.

Основными методами измерения влажности являются: химические, физические и физико-химические методы.

Методы делятся на:

- прямые, в основе лежит разделение на влагу и «полностью обезвоженный» (сухой) остаток;
- косвенные, когда влажность ИО определяется по изменению параметра того или иного физического свойства, функционально связанного с влажностью.

Электрофизические методы – основаны на зависимости свойств ИО – удельной электрической проводимости, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и др. – от количества влаги в них.

Наиболее распространенными являются методы:

- кондуктометрический;
- диэлектрический;
- емкостной;
- полной проводимости.

При использовании кондуктометрического метода оценка влажности осуществляется по результатам изменения электрического сопротивления (объемного или поверхностного) или проводимости ИО на постоянном токе или токе промышленной частоты

Диэлектрический метод производит оценку влагосодержания по диэлектрической проницаемости и тангенсу угла диэлектрических потерь влажных материалов в широком диапазоне частот – от звуковых до СВЧ.

Перспективными схемами являются схемы емкостных влагометров (резонансные, дифференциальные, с модуляцией параметров измерительного

контура, на базе мостов с тесной индуктивной связью, двух- и многочастотные).

СВЧ – методы отличаются высокой чувствительностью и точностью.

Модификации этих методов:

- волноводный;
- резонаторный;
- метод измерений в свободном пространстве.

В качестве информационного параметра используется:

- амплитуда;
- фаза или угол поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной плоской электромагнитной волны .

Оптические приборы для измерения влажности - инфракрасные фотометрические влагометры, в основе действия которых используется измерение избирательного поглощения влагой инфракрасного излучения определенной длины волны или отраженного поверхностью ИО, либо проходящего через вещество излучения.

2.4. Измерение параметров вибрации

Диагностирование состояния и оценки степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации – один из наиболее эффективных методов повышения надежности оборудования.

Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типа исследуемого оборудования, амплитудного и частотного диапазонов измеряемых колебаний.

Методы измерения параметров вибрации:

- кинематический;
- динамический.

Кинематический метод основан на измерении координат точек объекта относительно вибрационной неподвижной системы координат. Измерительные

преобразователи, основанные на этом методе измерения, называются преобразователями относительной вибрации.

Динамический метод основан на измерении параметров вибрации относительно искусственной неподвижной системы отсчета, в большинстве случаев инерционного элемента, связанного с объектом через упругий подвес. Такие приборы называют преобразователями абсолютной вибрации, сейсмическими системами.

Измерительные преобразователи вибрации основаны на различных физических принципах преобразования механических колебаний в электрический сигнал и делятся на:

- преобразователи абсолютной вибрации (генераторные, индукционные, на основе эффекта Холла, параметрические, резистивные, пьезорезистивные, индуктивные, трансформаторные, магнитоупругие, емкостные, электронно-механические, вибрационно-частотные и др.);

- бесконтактные измерители относительной вибрации (магнитные, радиоволновые, электромагнитные, акустические, радиационные, оптические). В них реализуется кинематический метод измерения параметров относительной вибрации, используя оптические, радиоволновые и другие электромагнитные поля.

Преобразователи абсолютной вибрации в электрический сигнал делятся на два класса:

- генераторные, преобразующие энергию механических колебаний в электрическую;

- параметрические, преобразующие механические колебания в изменение параметров электрических цепей, например, индуктивности, емкости, активного сопротивления, частоты или сдвига фаз и т.д.

Для вибродиагностики машин и механизмов используются пьезоэлектрические и электродинамические преобразователи, относящиеся к генераторным, а также индуктивные, вихретоковые и емкостные, относящиеся к параметрическим.

К преимуществам электродинамических вибродатчиков относятся:

- широкий амплитудный диапазон;
- низкое выходное сопротивление;
- возможность передачи сигналов по длинной линии связи.

2.5. Измерение шума

- Акустический шум представляет собой случайный процесс. В простейшем случае измеряют полный уровень звукового давления акустического шума.

- Для измерения акустического шума используются микрофоны (конденсаторной, пьезоэлектрической, электродинамических систем).

- С помощью микрофонов методом свободного звукового поля измеряют шумы электрических машин и трансформаторов. Для этого микрофон располагается в контрольной точке поля или в точках поля, равномерно распределенных на измерительной поверхности.

- Контроль звукового поля проводится путем измерения зависимости звукового давления от расстояния до акустического центра источника и сравнения измеренной зависимости с теоретической.

2.6. Основные диагностические параметры электротехнического оборудования

Диагностическими параметрами электротехнического оборудования являются:

- электрические параметры: отклонения токов и напряжений от номинальных значений (по амплитуде, частоте, фазе), появление всякого рода искажений и потерь;

- параметры тепловых процессов, сопровождающих электромагнитные процессы при нарушениях нормальных режимов и старении

конструкционных материалов (температуры в пазах ротора, стержнях статора, щеточно-контактного аппарата, температуры охлаждающих и изолирующих сред и др.);

- параметры химических процессов, проходящих в охлаждающих и изолирующих средах (наличие примесей в воде, масле, газа и влаги в трансформаторном масле и изоляции);

- световые эффекты, вызванные электромагнитными эффектами (свечение высоковольтных устройств);

- шумовые параметры (вибрация и др.), сопровождающие функционирование электротехнических устройств (генераторов, двигателей, трансформаторов).

Для диагностирования высоковольтного оборудования рекомендуются бесконтактные дистанционные методы измерения (тепловизионные, оптические и т.д.).

Хроматографический анализ растворенных газов является экономически выгодным и наиболее эффективным способом предупреждения повреждений маслонаполненного электрооборудования.

3. Методы диагностики электротехнического оборудования

3.1 Тепловые методы диагностики

Основной характеристикой температурного поля, являющейся индикатором дефектности, служит величина локального температурного перепада.

Координаты места перепада, топология температурного поля и его величина в градусах являются функцией большого количества факторов.

Факторы делятся на внешние и внутренние.

Внутренние зависят от теплофизических свойств контролируемого объекта и дефекта, а также их геометрическими параметрами. Эти факторы влияют и на временные параметры процесса теплопередачи (процесса развития температурного перепада).

Внешними факторами являются характеристики процесса теплообмена на поверхности объекта контроля и мощность источника нагрева.

Для измерения температуры применяются контактные и бесконтактные методы.

Контактное измерение температуры осуществляется с помощью жидкостных и манометрических термометров, термопар, термометров сопротивления, термоиндикаторов.

Бесконтактные методы теплового контроля основаны на использовании инфракрасного излучения (спектр длин волн 0,76-1000 мкм), испускаемого всеми нагретыми телами.

Спектр, мощность и пространственные характеристики инфракрасного излучения зависят от температуры тела и его излучательной способности, обусловленной, в основном, его материалом и микроструктурными характеристиками излучающей поверхности. При повышении температуры мощность излучения быстро растет, а ее максимум сдвигается в область более коротких длин волн.

По характеру получения информации различают пирометры для локального измерения температуры в данной точке объекта и пирометры для анализа температурных полей - тепловизоры.

По принципу действия различают яркостные, цветные и радиационные пирометры.

Принцип действия яркостных пирометров основан на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры, описываемой законами Планка и Вина.

Действие цветковых пирометров основано на сравнении интенсивности излучения объекта в двух спектральных диапазонах. Логарифм их отношения обратно пропорционален цветковой температуре объекта.

Действие Радиационных пирометров основано на использовании закона Стефана-Больцмана, выражающего зависимость излучаемой телом энергии от его температуры.

В настоящее время наблюдается интенсивное применение тепловидения по всему циклу производства и распределения электроэнергии от электростанций до потребителей электроэнергии.

В основе тепловидения лежит возможность получения видимого изображения объектов по их тепловому (инфракрасному) излучению, что позволяет оценить распределение тепловых полей и, как следствие этого, определить температуру любой точки на поверхности объекта.

Основным элементом тепловизионной системы является компактная тепловизионная камера, позволяющая выполнять снимки объекта в инфракрасном диапазоне. Современные тепловизионные камеры имеют высокую разрешающую способность и имеют возможность выявлять разницу температур на поверхности с точностью до 0,05 °С.

Высокая мобильность и бесконтактный принцип работы позволяют применять камеру для обследования любых объектов, в том числе и с воздуха, например, с борта вертолета. Кроме того, в состав тепловизионной системы входят персональный компьютер и программное обеспечение, предназначенные для обработки полученных камерой снимков и создания баз данных по результатам обследований.

Тепловизионный метод обладает огромным потенциалом для диагностики и оценки состояния энергетического оборудования. Он выявляет дефекты на ранней стадии их развития, что позволяет планировать объемы и сроки ремонта оборудования по его фактическому состоянию. Особая ценность тепловидения в том, что диагностика осуществляется без вывода оборудования из работы. Метод стал нормативным и включен в шестое издание РД 34.45 -

51.300 - 97 - «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Это положило начало массовому применению метода во всех энергосистемах.

Тепловизионный метод с успехом применяют при контроле систем охлаждения, состояния активной стали, подшипников, обмоток, систем возбуждения и щеточно-контактного аппарата крупных электрических машин. На силовых трансформаторах тепловидение позволяет выявлять очаги возникновения полей рассеяния, нарушения в работе охлаждения, дефекты маслонеполненных вводов и токоведущих частей. При обследовании коммутационных аппаратов инфракрасной диагностике подлежат токосъемные и дугогасительные устройства, аппаратные зажимы и вводы. Контролю подлежат также измерительные трансформаторы, вентильные разрядники, ограничители перенапряжения, воздушные линии электропередач, опорная и подвесная изоляции

Достоинства этого метода:

- позволяет получать такую информацию об объектах обследования, которую получить другими методами невозможно или технически настолько сложно, что теряется экономическая целесообразность работы;
- тепловидение дает возможность проведения обследования большого количества объектов в кратчайшие сроки и с минимальными затратами;
- обследования проводятся без вывода из эксплуатации объекта диагностики и при его номинальных параметрах работы;
- широкий спектр объектов для применения метода позволяет эффективно использовать тепловизионную систему как в целях энерго- и ресурсосбережения, так и для повышения надежности и эффективности работы инженерных систем, снижения аварийности, повышения уровня безопасности оборудования, снижения затрат на его эксплуатацию.

Для использования всех возможностей тепловизионного метода диагностики необходимо наличие нескольких условий:

- наличие современного тепловизора - удобного в применении, дающего высокоинформативную тепловизионную картину;
- наличие хорошо подготовленных специалистов по инфракрасной компьютерной термографии, владеющих знаниями в области теплофизики, знающих устройство и принципы работы электроэнергетического оборудования;
- наличие методической базы и программного обеспечения, позволяющих достоверно оценивать состояния оборудования.

3.2. Вибродиагностика

Любое электрооборудование, имеющее вращающиеся или перемещающиеся части, создает механические колебания.

Использование механических колебаний, как показатель состояния оборудования, является признанным методом технической диагностики и называется вибродиагностикой.

Современная вибродиагностика включает в себя не только простое определение общего уровня механических колебаний, но и анализ спектров вибрации, формы волны колебаний, фазовых углов колебаний, спектров огибающей высокочастотной вибрации и т.д.

Применение современных методов вибродиагностики позволяет получить предупреждение о неисправности или поломке на ранней стадии развития дефекта.

Анализ развития во времени частотных составляющих спектра вибрации позволяет определить момент, когда неисправность достигнет критического уровня, и принять меры для предотвращения простоя или аварии.

Изменение характерного (базового) спектра вибрации используется не только как предупреждение о приближающемся выходе из строя, но и для определения имеющейся неисправности.

Определение типа неисправности или дефектной части оборудования до того, как оно будет выведено из работы, дает ценную информацию для правильной подготовки и проведения ремонта. Используя современное вибродиагностическое оборудование, можно выявить зарождающиеся неисправности подшипников скольжения и качения, дефекты зубозацепления и ременных передач, дефекты электродвигателей электрического характера, изгиб вала, ослабление механических связей, дефекты различных элементов оборудования (лопаток, крыльчаток, ножей) и т.п.

Стоит отдельно выделить такие направления вибродиагностики как балансировка роторов в рабочем положении и центровка валов. Эти неисправности являются наиболее часто встречающимися на практике. Разработанные методики позволяют точно определить наличие небаланса, расцентровки и устранить их.

Вибрационный мониторинг. Его объектами являются прежде всего машины и оборудование - источники вибрации. Отличительной особенностью таких объектов можно считать наличие в них колебательных сил, возникающих, например, при движении отдельных узлов или потоков жидкости (газа), при действии переменных электромагнитных полей. Только в редких случаях объектами мониторинга может быть оборудование, не являющееся источником колебательных сил и вибрации, но по которому распространяется вибрация от другого источника.

Назначением вибрационного мониторинга является обнаружение изменений вибрационного состояния контролируемого объекта в процессе эксплуатации, причинами которых во многих случаях являются дефекты.

Мониторинг машин и оборудования проводится, прежде всего, по низкочастотной и среднечастотной вибрации, которая хорошо распространяется от места формирования до точек ее контроля. Число таких точек может быть сведено к минимуму, до одной-двух на каждый объект мониторинга, имеющий общий корпус, а измерения вибрации могут проводиться без изменения режима работы объекта. В системе мониторинга,

если она не включена в систему быстродействующей аварийной защиты, может использоваться аппаратура с одним каналом измерения вибрации, к которому последовательно подключаются все используемые датчики вибрации.

Вибрационная диагностика. Ее объектами являются те же машины и оборудование, которые охватываются системами вибрационного мониторинга. В отличие от мониторинга назначением вибрационной диагностики в процессе эксплуатации оборудования является обнаружение изменений и прогноз развития не вибрационного, а технического состояния причем каждого из его элементов, для которого существует реальная вероятность отказа в период между ремонтами.

Для этого измеряется не только низкочастотная и среднечастотная, но и высокочастотная вибрация, а также используются более сложные, чем при мониторинге, методы анализа вибрации, позволяющие получать полный объем диагностической информации.

Вибрация измеряется на каждом диагностируемом узле или, по крайней мере, в точках перехода высокочастотной вибрации от диагностируемого к другим узлам объекта, доступным для измерения вибрации. Используемая аппаратура также может иметь только один канал измерения и анализа вибрации.

Балансировка роторов. В процессе эксплуатации машин их вибрация на частоте вращения ротора может расти и для ее снижения приходится балансировать ротор непосредственно на месте эксплуатации каждой машины. Объектами балансировки на месте эксплуатации, как правило, являются машины, в которых есть доступ к плоскостям балансировки, т.е. к местам, в которых на вращающихся частях можно закреплять балансировочные массы.

Основным назначением балансировки является уравнивание ротора и, тем самым, снижение низкочастотной вибрации машины. Но вибрация на частоте вращения ротора далеко не всегда определяется центробежными силами, поэтому добиться значительных и стабильных результатов в большинстве случаев удастся лишь с помощью средств, определяющих

причины роста вибрации в каждом случае, т.е. решающих и диагностические задачи. Балансировка на месте эксплуатации машины проводится по вибрации и с помощью тех же приборов, что и вибрационная диагностика.

Вибрационный модальный анализ. Используется этот вид анализа для определения таких механических свойств объектов, как частоты резонансов, формы колебаний и других.

Назначением модального анализа может быть как отработка новых конструкций машин и оборудования, так и выходной контроль серийно выпускаемых изделий, и, прежде всего, по значениям резонансных частот либо объекта в целом, либо отдельных его узлов.

В качестве источника вибрации непрерывного действия используются специальные машины - вибраторы, в качестве источников импульсной вибрации - молотки с встроенными устройствами измерения ударных импульсов.

Основные методы мониторинга и диагностики. Основным методом вибрационного мониторинга - наблюдение за изменением энергетических параметров вибрации машины и, прежде всего, мощности (уровня) отдельных компонент вибрации. Особенности любого подхода к решению задач мониторинга определяются тремя главными факторами. Первый - выбор точек измерения вибрации, второй - количества разделяемых компонент и третий - интервалов между измерениями.

Эффективность мониторинга зависит от количества компонент вибрации, доступных для измерения. Чтобы увеличить их число, в машинах с вращающимися узлами производится узкополосный спектральный анализ вибрации, наиболее эффективный для анализа периодических компонент сигнала. В качестве примера на рисунке 1 приведены спектры вибрации машины без дефектов и после появления дефектов, сопровождающихся ростом уровня (мощности) многих составляющих спектра вибрации.

Мониторинг вибрационного состояния машины в этом случае заключается в сравнении уровня отдельных составляющих с указанными на

рис. 2 порогами и анализ изменений уровня отдельных составляющих за время эксплуатации.

В практической диагностике машин по вибрации существует два основных подхода к решению диагностических задач.

В первом случае диагностика выполняется только после обнаружения изменений вибрационного состояния машины средствами мониторинга, и ее задачей является интерпретация этих изменений. Однако мониторинг проводится, как правило, по низкочастотной и среднечастотной вибрации, реагирующей на появление, в основном, только развитых дефектов. Именно они приводят к заметным изменениям энергетических параметров вибрации, превышающим их естественные флуктуации при смене режимов работы машины.

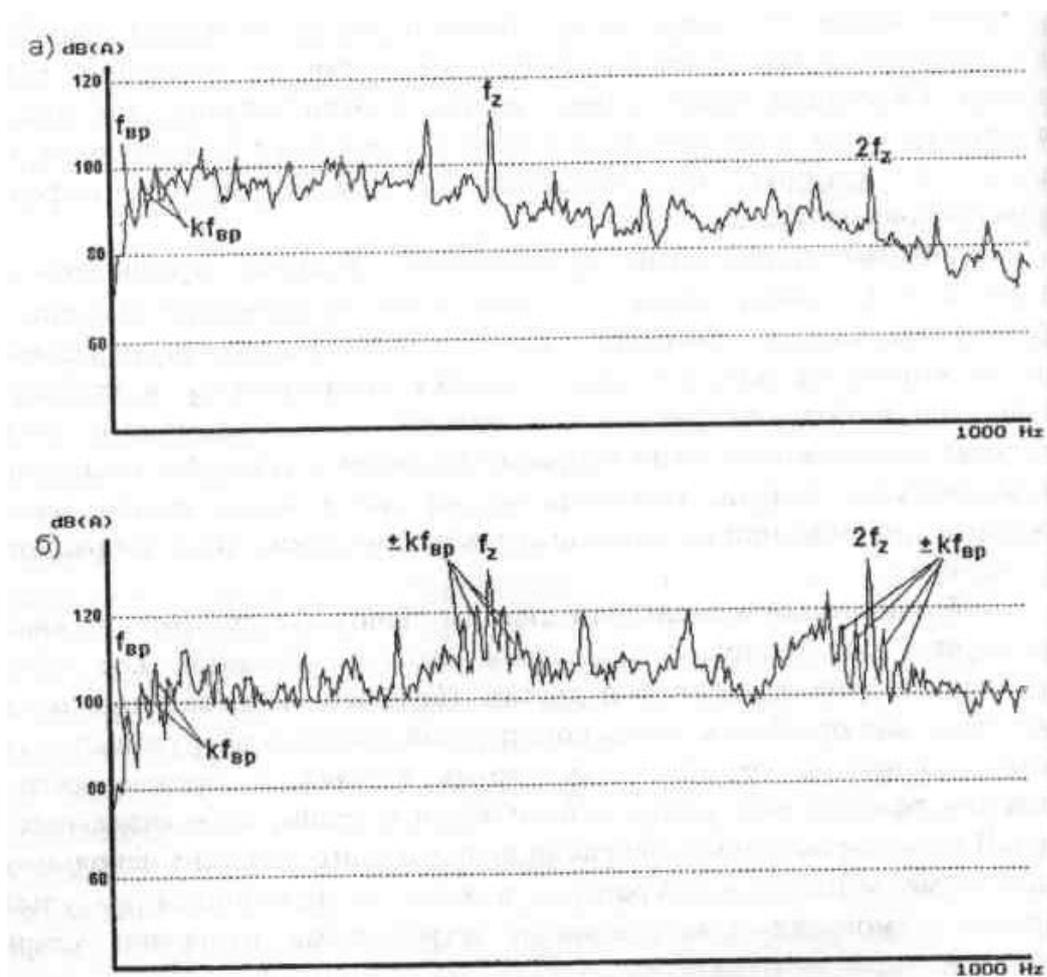


Рисунок 1 – Спектры вибрации подшипникового узла:
а) бездефектная машина; б) машина с дефектом;
 $f_{вр}$ – частота вращения ротора; f_z – зубцовая частота.

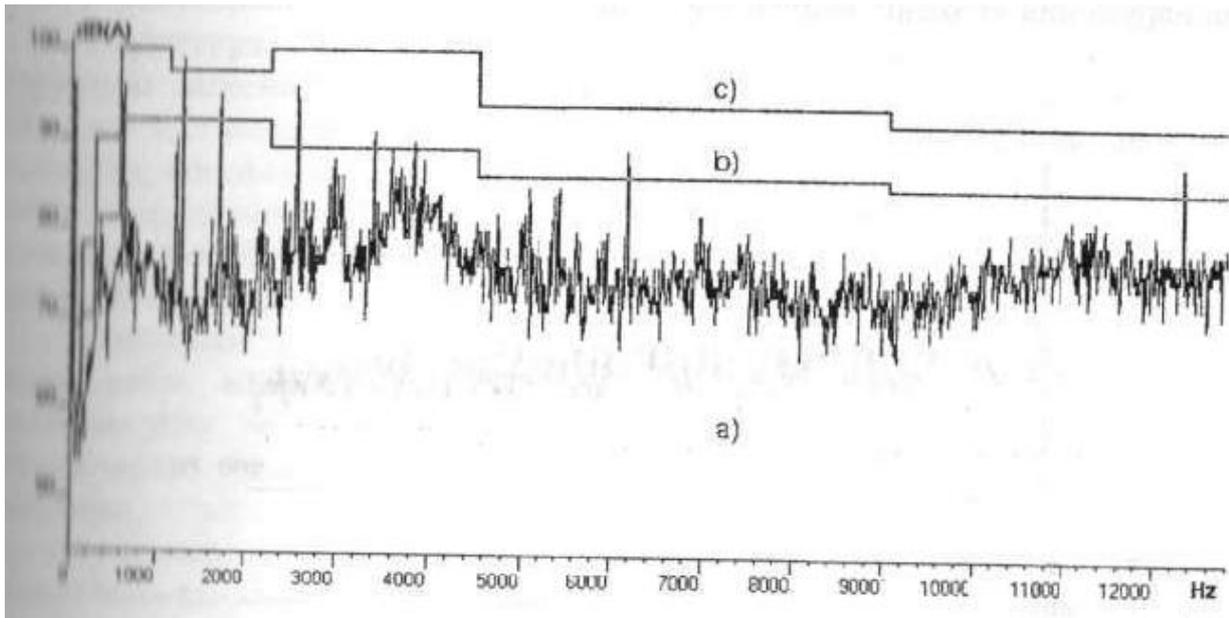


Рисунок 2 – Мониторинг вибрационного состояния машины:
 а) порог слабого сигнала вибрации; б) порог среднего сигнала вибрации; в) порог сильного сигнала вибрации.

Второй подход заключается в использовании тех методов и средств диагностики, которые обнаруживают основные виды дефектов на этапе их зарождения еще до того, как произойдут существенные энергетические изменения в сигнале вибрации машины в целом. Обнаружение дефектов на этапе зарождения дает возможность наблюдать за их развитием и своевременно планировать работы по ремонту и обслуживанию машины.

Для обнаружения зарождающихся дефектов во вращающихся узлах используются естественные диагностические признаки, определяемые путем спектрального анализа самого сигнала вибрации или колебаний мощности его компонент (спектральный анализ огибающей). Так, основным признаком дефектов в подшипниках является изменение свойств сил трения и возбуждаемой ими высокочастотной вибрации. Эти изменения, заключающиеся либо в появлении микроударов, либо в периодическом изменении коэффициента трения при контакте дефектных участков поверхностей трения, легко обнаруживаются при спектральном анализе

огигающей высокочастотных составляющих вибрации корпуса подшипникового узла, возбуждаемых силами трения (рис. 3).

Силы трения в подшипниках и пульсации давления в потоках жидкости или газа существенным образом изменяют свои свойства при появлении многих, но не всех дефектов в узлах роторных машин. Так, ряд дефектов в электрических машинах изменяет параметры электромагнитного поля в зазоре, и на ротор машины начинают действовать дополнительные электромагнитные силы и пульсирующие моменты, т.к. в бездефектных машинах пульсирующих моментов нет, именно они и возбуждаемая ими вибрация наиболее эффективно используются для обнаружения зарождающихся дефектов.

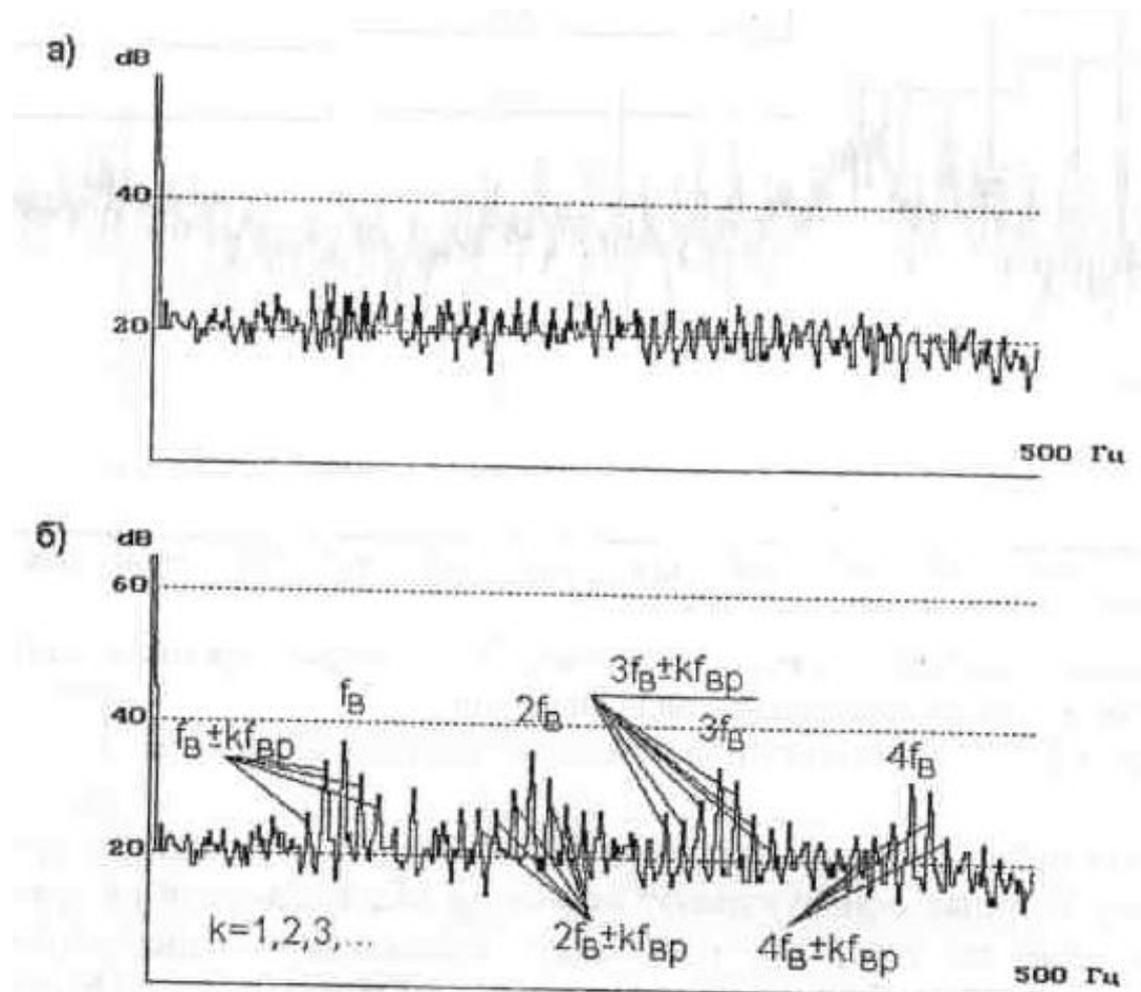


Рисунок 3 – Спектр огибающей вибрации подшипника:
а) без дефектов; б) подшипник с раковиной на внутреннем кольце;
 $f_{вр}$ – частота вращения внутреннего кольца подшипника;
 f_B – частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу подшипника.

Спектральный анализ вибрации электрических машин на низких и средних частотах, измеряемый в разных направлениях, дает возможность идентифицировать практически все дефекты электромагнитной системы электрических машин, кроме старения изоляции, так как до момента пробоя изоляции электромагнитное поле и вибрация машины не изменяются.

Еще одно свойство вибрации используется для обнаружения дефектов роторов, особенно высокооборотных машин, которое связано с изменением величины и структуры центробежных сил. В зависимости от вида дефекта растет низкочастотная вибрация и определенным образом изменяется ее спектральный состав, что и используется для его идентификации.

Таким образом, по сигналу вибрации могут быть обнаружены практически все виды зарождающихся дефектов во вращающемся оборудовании без привлечения для диагностики других видов физических процессов. А это означает, что для перехода на обслуживание и ремонт этого оборудования по фактическому состоянию могут использоваться стационарные и переносные системы вибрационной диагностики, не требующие встраивания измерительных датчиков в оборудование и его узлы.

Структура систем вибрационного мониторинга и диагностики.

Структура переносной системы глубокой диагностики вращающегося оборудования содержит датчик вибрации, устройство для анализа сигнала вибрации, компьютер и программное обеспечение для диагностики узлов этого оборудования. Для машин, частота вращения которых в момент измерения вибрации точно неизвестна, кроме датчика вибрации используется еще и датчик оборотов ротора.

Основным требованием, предъявляемым к датчику вибрации, является возможность измерения как высокочастотных, так и низкочастотных составляющих вибросигнала. Устройство для анализа вибрации должно обеспечивать узкополосный спектральный анализ как самого сигнала вибрации, так и огибающей его высокочастотных составляющих, предварительно выделенных из сигнала полосовым фильтром. Устройство

может быть выполнено либо в виде отдельного прибора, либо в виде плат для персонального компьютера.

Системы глубокой диагностики машин по вибрации могут выпускаться для предремонтной дефектации машин, для их выходного контроля после изготовления или ремонта, для их выходного контроля после изготовления или ремонта, для наблюдения за состоянием машин или их узлов в процессе эксплуатации. Отличаются они лишь особенностями программного обеспечения. Так, машины после ремонта и монтажа на месте эксплуатации не имеют достаточной приработки, поэтому для их диагностики в большей степени используется низкочастотная и среднечастотная вибрация, а эталон бездефектной машины (узла) автоматически строится по множеству одинаковых машин. При предремонтной дефектации в полной мере используются и диагностические признаки дефектов, содержащиеся в высокочастотной вибрации, а эталон также строится по множеству машин. В процессе эксплуатации, в отличие от предремонтной дефектации, эталоны строятся по первым трем измерениям, а после последующих измерений автоматически адаптируются.

Система глубокой диагностики вращающегося оборудования при отсутствии системы мониторинга легко может взять на себя ее функции. Необходимо только дополнительно использовать программное обеспечение для мониторинга, назначением которого является планирование измерений, хранение результатов измерений в базе данных, сравнение их с пороговыми значениями, устанавливаемыми автоматически или вручную пользователем, и наблюдение за развитием изменений, происходящих в сигнале вибрации или в его отдельных спектральных составляющих.

Рассматриваемая система глубокой диагностики может быть расширена и до стационарной системы мониторинга и диагностики. Для этого необходимо дополнить систему группой датчиков вибрации и электронным управляемым коммутатором (между датчиками и устройством анализа сигнала вибрации), программой автоматического управления системой, обеспечивающей

планирование и автоматическое управление измерениями, и выходным устройством сигнализации (рис. 4).

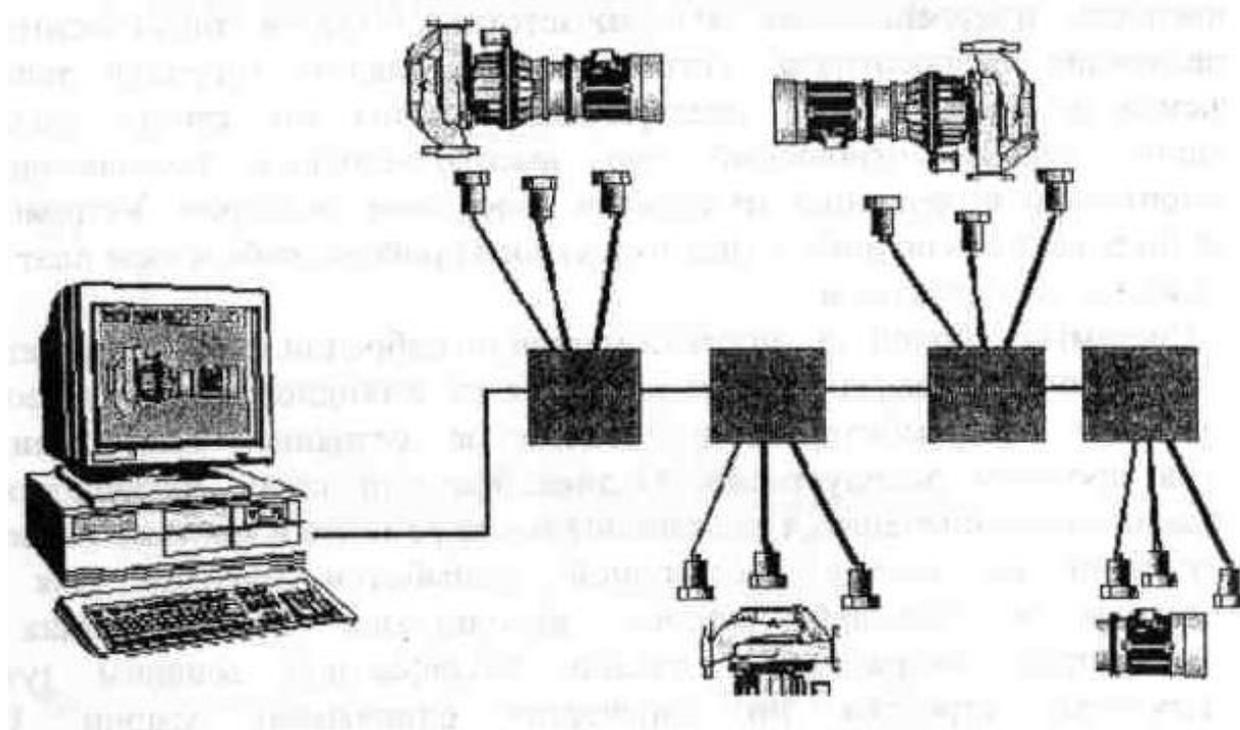


Рисунок 4 – Структура стационарной системы глубокой диагностики и мониторинга вращающегося оборудования

Новое поколение систем мониторинга и глубокой диагностики вращающегося оборудования по вибрации дает возможность в кратчайшее время перейти на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию электрических двигателей как основного, так и вспомогательного технологического оборудования. Для этого не требуется на все оборудование устанавливать дорогостоящие стационарные системы непрерывного мониторинга, достаточно использовать переносные системы мониторинга и глубокой диагностики, позволяющие обнаруживать практически все виды дефектов на стадии зарождения за много месяцев до аварии, и своевременно планировать сроки и объемы ремонта.

3.3 Физико-химические методы

Основу оперативных методов диагностики электрооборудования составляют физико-химические методы.

Энергетическое воздействие на изоляцию электрических устройств приводит к изменениям на молекулярном уровне вне зависимости от типа изоляции, завершающимся химическими реакциями с образованием новых химических соединений. Энергетическому воздействию подвержены все элементы изоляции. Применительно к жидкой углеводородной изоляции, каковой являются минеральные масла, и к другим органическим жидкостям, эти виды воздействия инициируют химические процессы разрыва связей С-Н, С-С, в результате чего протекают радикальные реакции, которые с участием кислорода и воды, всегда присутствующих в изоляции, и при повышенной температуре приводят к широкой гамме новых химических соединений: от легких газов - водорода, окислов углерода и легких углеводородов - до сложных кислородсодержащих и высокомолекулярных соединений - спиртов, органических кислот, их солей (мыл), восков.

Электрическое воздействие на целлюлозу, являющуюся неотъемлемой частью масляной изоляции (масло-барьерная, бумажно-масляная), также ведет к образованию воды и окислов углерода. Мощные электрические разряды приводят к образованию углерода и воды, тепловое воздействие на бумагу инициирует процессы дегидратации, приводящие к образованию воды и соединений фуранового ряда. Полимерная изоляция под действием разрядов и факторов естественного старения разрушается с разрывом полимерных связей. Воздействие электрических разрядов на газообразную изоляцию приводит к образованию химически активных веществ, в свою очередь влияющих на твердую изоляцию из композиционных или керамических материалов.

Таким образом, физико-химический диагностический контроль основан на объективной реальности: вследствие каких-либо энергетических воздействий в изоляции электрических аппаратов протекают химические процессы деградации изоляции, по конечным продуктам которой можно судить о количественной характеристике энергетического воздействия и степени разрушения изоляции. Образование новых химических соединений является идеологической основой физико-химической диагностики, а определение

количества вновь образованных характерных компонентов и скорости их образования лежит в основе определения состояния изоляции и глубины энергетических воздействий на нее.

Методы физико-химического диагностического контроля имеют свои преимущества и недостатки. Среди преимуществ - независимость физико-химических определений от электрических показателей, т.е. последние не создают помех для измерения.

В настоящее время известно более 50 физико-химических методов диагностического контроля, из которых для решения задач диагностирования электротехнического оборудования нашли применение следующие методы.

- Вольтамперия - электрохимический метод количественного и качественного анализа и исследования веществ, основанный на определении зависимости между силой тока в цепи электролитической ячейки и напряжением поляризации E при электролизе раствора или расплава изучаемого вещества.

- Электрохимический метод - анализ физико-химических свойств ионных систем, а также явлений, возникающих на границе двух фаз с участием заряженных частиц (ионов и электронов).

- Инфракрасная спектроскопия - исследует колебательные и вращательные переходы в молекулах, используя спектры испускания, поглощения и отражения.

- Фотометрия - измерение экстинкций при установленных длинах волн для определения концентраций растворов.

- Нефелометрия - измерение рассеяния света мутными растворами и суспензиями.

- Масс-спектрометрический метод — основан на свойстве ионов газов, ускоренных электрическим полем, отклоняться и двигаться в однородном магнитном поле по различным траекториям, зависящим от массового числа ионов.

- Атомно-эмиссионная спектроскопия - измерение параметра линейчатого спектра возбужденных атомов для определения природы и количества определенных элементов.
- Спектрофотометрия - осуществляющая фотометрирование через сравнение измеряемого потока излучения с эталонным.
- Кондуктометрический метод - совокупность электрохимических методов исследования и анализа вещества, основанных на измерении электрической проводимости электролитов
- Атомно-абсорбционная спектроскопия — метод элементного анализа и исследования по атомным спектрам поглощения.
- Ионнообменная и жидкостная хроматография - основаны на разделительной способности разделяемых ионов в растворе к ионному обмену с ионитом (неподвижная фаза).
- Газовая хроматография — основана на различии скоростей движения концентраций зон исследуемых компонентов, которые перемещаются в потоке подвижной фазы (элюента) вдоль слоя неподвижной.
- Жидкостная хроматография - хроматография, в которой подвижной фазой служит жидкость. В зависимости от агрегатного состояния неподвижной фазы, различают распределительную (или жидко-жидкофазную) и адсорбционную (жидко-твердофазную).
- Тонкослойная хроматография - основана на различии скоростей перемещения компонентов анализируемой смеси в плоском тонком слое сорбента при движении по нему растворителя (элюента).

В каждом конкретном случае из компонентов химико-аналитических признаков формируются химико-аналитические коды определяемых веществ, позволяющих селективно и с требуемой точностью произвести химический анализ.

Таковыми компонентами являются: индексы хроматографического удерживания, интенсивности пиков спектров, градуировочные коэффициенты детекторов и другие, включая двойные и тройные соотношения компонентов.

Эти коды поддаются математической формализации, что позволяет создать компьютерные программы надежной идентификации определяемых веществ.

Хроматографический анализ растворенных газов является общепризнанным в мировой практике, экономически выгодным и наиболее эффективным способом предупреждения повреждений маслonaполненного электрооборудования.

Контроль растворенных газов является обязательной частью большинства программ обслуживания по состоянию.

4. Методы диагностики электротехнического оборудования

4.1. Метод частичных разрядов

Одним из методов диагностики, которые обеспечивают контроль текущего состояния электрооборудования на месте его установки под рабочим напряжением в процессе нормальной эксплуатации, является метод контроля состояния высоковольтной изоляции оборудования по характеристикам частичных разрядов (ЧР).

Этот метод позволяет выявлять дефекты изоляции на самых ранних стадиях их возникновения, отслеживать их развитие, оценивать текущее состояние изоляции и возможность дальнейшей эксплуатации оборудования.

Серьезные дефекты изоляции обычно обнаруживаются на стадии приемосдаточных высоковольтных испытаний и испытаний на месте монтажа.

Если оборудование прошло эти испытания, то не обнаруженные (или не проявившиеся) при их проведении дефекты изоляции (которые практически всегда имеются), не приводят к полному пробое изоляции в нормальных рабочих условиях.

Однако при дальнейшей эксплуатации оборудования, эти дефекты развиваются и растут. Их рост обусловлен появлением сравнительно

небольших электрических разрядов в зоне повышенной напряженности поля вблизи дефекта, которые называют частичными разрядами.

Под действием ЧР начинается разрушение изоляции, размер дефектной области и интенсивность разрядов увеличиваются. По мере развития дефекта энерговыделение в его зоне растет, и разрушение изоляции ускоряется за счет термических процессов.

Увеличение дефектной области приводит к росту напряженности поля в оставшейся части изоляционного промежутка и, когда дефектная зона достигает достаточно больших размеров, становится возможным сквозной пробой изоляции. Как правило, при отсутствии экстремальных воздействий (типа перенапряжений), процесс развития дефекта от зародышевой стадии до полного пробоя длится от нескольких месяцев до нескольких лет.

Таким образом, появление частичных разрядов свидетельствует о наличии дефекта изоляции, причем ЧР достигают обнаружимого уровня уже на самой ранней стадии развития дефекта.

Измерение ЧР может проводиться в процессе нормальной работы оборудования без вывода его из эксплуатации.

Возникновение электрического разряда вызывает сигналы трех типов: электрического, электромагнитного и акустического.

Первые два типа сигналов различаются несколько условно, т.к. электрический сигнал всегда сопровождается электромагнитным, и различие между ними скорее относится к методам регистрации - электрический сигнал измеряется в проводах, а электромагнитный сигнал регистрируется с помощью антенны. Соответственно, для регистрации ЧР можно использовать электрические (подключаемые к входным или выходным шинам оборудования или шинам его заземления через конденсатор связи или трансформатор тока), электромагнитные (радиоприемники с антенной наружной или внутренней установки) и акустические (внутренние или наружные) датчики.

Наиболее чувствительными к сигналам ЧР являются электрические датчики, подключенные к высоковольтной шине контролируемого

оборудования через конденсатор связи. Однако конденсатор связи имеет большие габариты и вес и практически не может использоваться при полевых работах. Поэтому электрические датчики обычно подключаются к ПИНам или измерительным выводам высоковольтных вводов (емкость которых используется как конденсатор связи) или к высокочастотным трансформаторам тока, надетым на провода заземления элементов высоковольтного оборудования, имеющих емкостную связь с высоковольтной шиной.

Обычно электрические датчики способны дать лишь очень грубую локализацию источника сигналов ЧР, основанную только на сравнении интенсивностей сигналов в различных точках оборудования. Локализация источника путем анализа временных задержек электрических сигналов требует весьма дорогостоящего оборудования и дает результаты только в распределенных системах с коаксиальной структурой, таких как элегазовые КРУ. Поэтому для локализации дефекта обычно используют акустические датчики, которые имеют значительно меньшую чувствительность, но благодаря сравнительно низкой скорости распространения акустических сигналов, позволяют провести довольно точную локализацию источника сигналов внутри объекта.

При этом измеряется задержка момента прихода акустического импульса относительно электрического сигнала в нескольких точках оборудования и на основании этого вычисляется ориентировочное положение источника с учетом конструкции конкретного объекта.

Акустические датчики практически не подвержены внешним помехам на силовом оборудовании подстанций (исключая двигатели и генераторы).

Электромагнитные датчики регистрируют электромагнитные сигналы ЧР с помощью антенны. Этот метод является одним из самых первых и наиболее удобных методов регистрации ЧР, т.к. обеспечивает дистанционные измерения без подключения к объекту.

В последние годы происходит переход к использованию диапазона частот от нескольких сотен мегагерц до нескольких гигагерц. В этом диапазоне частот

уровень помех значительно ниже и можно использовать антенны с высокой степенью направленности, обеспечивающие локализацию источника сигналов с точностью до нескольких десятков сантиметров.

Эти датчики наиболее чувствительны к дефектам в наружных частях оборудования (таких как вводы и изоляторы), сигналы от дефектов расположенных внутри металлического бака сильно ослабляются.

Наибольшие трудности при измерении электрических сигналов ЧР в условиях эксплуатации вызывает отделение сигналов ЧР, возникающих в высоковольтной изоляции контролируемого оборудования от внешних и внутренних помех различного происхождения. Источниками импульсных сигналов (помех), регистрируемых на вводах и заземляющих цепях высоковольтного оборудования, являются:

- различного рода преобразователи (частоты до 1 МГц);
- переключение контактов РПН и выключателей соседних линий и т.д. (частоты до 10 МГц);
- корона на подводящих проводах и окружающем оборудовании (частоты примерно до 400 МГц);
- дефектные изоляторы соседних порталов, особенно на линиях 750 кВ (во всех диапазонах);
- дефектные изоляторы шин 10 кВ (особенно штыревых на старых подстанциях) (во всех диапазонах);
- сигналы ВЧ связи (частоты до 500 кГц) и многие другие.

Внутренними источниками помех являются искровые разряды в дефектных элементах магнитопровода и паразитных вторичных контурах (во всех диапазонах).

Интенсивность мешающих сигналов при полевом контроле оборудования весьма высока. Подавление помех производится на нескольких стадиях, начиная с выбора частотного диапазона регистрирующей аппаратуры, измерения и вычитания фона, анализа амплитудно-фазовых диаграмм (АФД) сигналов и их временных зависимостей и заканчивая

сопоставлением сигналов различных каналов (электрических, акустических и электромагнитных).

В первую очередь помехи подавляются правильным выбором частотного диапазона, в котором отношение сигнал/помеха является максимальным. Частотный диапазон определяется исходя из соображений максимального подавления помех при достаточно хорошей регистрации сигналов ЧР от дефектов изоляции. При выборе частотного диапазона следует учитывать и ослабление сигналов ЧР при их прохождении от точки возникновения до точки подключения аппаратуры.

Вторая стадия подавления помех - подавление фона внешних сигналов. Это может осуществляться двумя методами:

- путем измерения фона при отсутствии напряжения на контролируемом объекте с последующим его вычитанием из результатов измерений;
- путем блокирования регистрации сигналов ЧР при совпадении их с антенного датчика, регистрирующего внешние сигналы помех.

Третья стадия - анализ АФД сигналов и их временных параметров. Это позволяет отсеять сигналы короны, имеющие очень характерную форму и легко распознаваемые по АФД. Конечно, сигналы короны могут маскировать сигналы ЧР от дефектов изоляции с той же амплитудой и фазой, однако диапазон фазовых углов, в которых наблюдаются сигналы короны, невелик, и вероятность полного совпадения АФД сигналов от дефекта и короны мала. Сигналы от искровых разрядов в элементах магнитопровода тоже имеют весьма характерную АФД, однако амплитуда и интенсивность этих сигналов могут быть велики, и на их фоне выделить сигналы ЧР от дефектов высоковольтной изоляции довольно трудно. Но, хотя дефекты магнитопровода и не относятся к изоляции, их обнаружение тоже является одной из задач диагностики. Кроме того, сильная вибрация магнитопровода приводит к довольно характерной зависимости АФД этих сигналов от времени, которая позволяет идентифицировать дефекты такого типа.

Последней стадией разделения сигналов ЧР в высоковольтной изоляции и помех является сравнение сигналов электрического канала с сигналами акустического и электромагнитного каналов регистрации.

Как правило, источник ЧР расположен в толще изоляции, и поместить туда измерительный прибор невозможно. Аппаратуру для регистрации можно подключить только к наружным частям контролируемого оборудования (исключая случаи встроенных датчиков). Сигнал при прохождении через внутренние элементы оборудования ослабевает, и форма его искажается. Степень ослабления сигнала и искажения его формы зависит от типа источника сигналов (дефекта), места его образования (которое исходно неизвестно), конструкции оборудования, используемого диапазона частот, способа подключения и т.д. Поэтому точно оценить исходную величину частичных разрядов и степень их опасности на основании измерения только величины сигнала в точке подключения аппаратуры (а только это и измеряют практически все существующие на сегодня измерители ЧР) практически невозможно.

Для определения величины ЧР в точке возникновения необходимо определить место расположения и тип дефекта. Только тогда, зная конструкцию контролируемого объекта, можно оценить ослабление сигналов при прохождении их до точки подключения измерительной аппаратуры.

Определение типа источников сигналов.

После отделения мешающих сигналов можно определить тип источника этих сигналов по их амплитудно-фазовой характеристике и ее зависимости от времени.

Локализация местоположения источника сигналов ЧР, проведенная ориентировочно путем сравнения электрических и электромагнитных сигналов в различных точках оборудования, и более точно - по задержке акустических сигналов, очень помогает при анализе данных.

Идентификация дефектов осуществляется исходя из полуэмпирических данных и накопленного опыта. На уровне сегодняшних знаний идентификация

типа источника ЧР по данным, полученным в реальных условиях эксплуатации, является достаточно трудоемкой задачей и требует большого опыта и высокой квалификации. Несмотря на существующие данные об АФД дефектов различного типа, при анализе требуется хорошее знание конструкции и параметров конкретного оборудования, условий проведения измерения и т.д. Кроме того, очень существенным является комплексное использование всех данных, полученных другими диагностическими средствами (измерение сопротивления и $\tan \delta$ изоляции, хроматографии газов в масле, тепловизионного контроля и т.д.), и предыстория контролируемого объекта (срока службы, нагрузки, наличие КЗ и т.д.).

Определение степени опасности источника ЧР.

Естественно, что при диагностике состояния изоляции оборудования в основном интересует только один вопрос - сколько оно еще проработает? Определить время, через которое частичные разряды перерастут в полный пробой изоляции в реальных условиях эксплуатации практически невозможно даже без учета экстремальных воздействий (грозовые и коммутационные перенапряжения и т.д.).

Поведение ЧР в процессе развития дефекта статистически весьма неоднородно. По существующим данным, амплитуды сигналов ЧР непосредственно перед пробоем даже уменьшаются, хотя интенсивность их, как правило, растет. Поэтому на сегодня не существует сколько-нибудь точных методов оценки времени, оставшегося до полного пробоя изоляции. Наличие экстремальных воздействий еще более усугубляет ситуацию.

Однократное измерение сигналов ЧР не позволяет дать надежную оценку степени опасности дефекта и времени безаварийной работы оборудования.

Периодическое измерение характеристик сигналов ЧР позволяет оценить скорость развития дефекта.

Скорость изменения характеристик ЧР резко возрастает в предпробойной стадии, что служит достаточно хорошим указателем на достижение дефектом этой стадии развития. Именно высокая скорость изменения характеристик

сигналов ЧР служит достаточно надежным указателем на близость полного пробоя.

Для определения степени развития дефекта система измерения сигналов ЧР должна обеспечивать запись амплитудно-фазовых характеристик сигналов ЧР с хорошей статистикой (500 - 5000 периодов сети).

Наиболее удобным является накопление данных за каждые 10-15 минут в течение периода от нескольких часов до нескольких суток.

Необходима также достаточно точная локализация источника ЧР для оценки ослабления сигналов и, соответственно, величины ЧР в точке возникновения.

При наличии этих данных (в совокупности с данными хроматографии и др.) можно определить вероятную стадию развития дефекта - начальную, среднюю и конечную (предпробойную).

Такое деление несколько условно, однако позволяет предложить некоторые действия. Например, если дефект находится в начальной стадии, оборудование можно оставить в работе и поставить на периодический контроль по газам в масле, $\text{tg}\delta$ изоляции и т.д. На средней стадии при повышенном содержании газов в масле можно рекомендовать плановый вывод в ремонт или продолжение эксплуатации с учащенным контролем параметров изоляции и их тренда. Если это конечная стадия, скорость нарастания газов велика и идет нагрев изоляции (на этой стадии тепловизионный контроль уже может дать результаты), тогда следует немедленно выводить оборудование из работы.

4.2. Оптические методы

Оптические методы диагностики основаны на анализе взаимодействия оптического излучения (ОИ) с объектом контроля (ОК).

Информационными Параметрами ОИ являются пространственно-временные распределения его амплитуды, частоты, фазы, поляризации и степени когерентности.

Для получения диагностической информации используют изменение этих параметров при взаимодействии ОИ с ОК в соответствии с явлениями интерференции, дифракции, поляризации, преломления, отражения, поглощения, рассеяния, дисперсии света, также изменение характеристик самого ОК под действием света в результате эффектов фотопроводимости, фотохромизма, люминесценции, электрооптических, механооптических (фотоупругость), магнитооптических, акустооптических и других явлений.

Основными информационными параметрами объектов оптического контроля являются их спектральные и интегральные фотометрические характеристики, которые в общем случае зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны.

Использование оптического излучения как носителя информации перспективно.

Электромагнитное поле по природе многомерно, что позволяет вести многоканальную (многомерную) обработку информации одним устройством с большой скоростью, определяемой скоростью света в данной среде.

При работе с приборами визуального контроля важно правильно использовать свойства зрения оператора.

Зрение (видение) является сложным динамическим нелинейным процессом, включающим сканирующие, конвергенционные (фокусирующие) и адаптационные (изменение диаметра зрачка) движения глаз и обработку зрительной информации в центральной нервной системе человека.

В практической работе оператор решает зрительную задачу, состоящую из следующих элементов: обнаружение из фона, различение в деталях и распознавание конкретного объекта как обобщенного образа. В ряде случаев необходимо измерение изображения объекта или другие операции, связанные с его обработкой.

Вероятность успешного решения зрительных задач зависит от контраста объекта, его углового размера, яркости фона и времени наблюдения.

В составе оптических приборов контроля наиболее перспективно применение лазерных источников.

Применение лазеров позволяет существенно расширить границы традиционных методов диагностики и создать принципиально новые методы оптической диагностики, например, топографические, акустооптические и др., основанные на использовании основных свойств лазерного излучения - монохроматичности, когерентности и направленности.

Для контроля геометрии объектов широко применяются оптико-электронные приборы, которые принято делить на фотокомпенсационные, фотоследящие и фотоимпульсные.

В отдельную группу выделяют телевизионные, лазерные и растровые системы.

Основной частью оптической системы этих приборов является объектив для получения изображения контролируемого изделия. В ряде случаев используют волоконно-оптические световоды.

В качестве сканаторов в современных приборах применяют в основном фотодиодные или ПЗС-линейки и двумерные матрицы с дискретной структурой светочувствительного слоя и электронной схемой развертки.

Для контроля деформаций, изменений зазоров и амплитуд вибраций используются лазерные волоконно-оптические интерферометры, позволяющие регистрировать перемещения порядка 0,01 мкм.

Приборы для контроля внутренних поверхностей и обнаружения дефектов в скрытых местах называют эндоскопами и бороскопами.

Принцип действия эндоскопов заключается в осмотре объекта с помощью специальной оптической системы, позволяющей передавать изображение на значительное расстояние (до нескольких метров).

При этом отношение длины эндоскопа к поперечному сечению $\gg 1$.

Существуют линзовые, волоконно-оптические и комбинированные эндоскопы.

4.3. Неразрушающий контроль конструкционных материалов и изделий

Дефекты конструкционных материалов и изделий разделяют на допустимые и недопустимые в зависимости от их потенциальной опасности.

К недопустимым дефектам относят те, которые подлежат обязательному обнаружению и незамедлительному устранению или исправлению.

Многообразие дефектов можно проиллюстрировать примером возможных нарушений сплошности металла, которые являются следствием несовершенства его структуры и возникают на разных стадиях технологического процесса.

К дефектам тонкой структуры относятся дислокации - особые зоны искажений атомной решетки. Субмикроскопические трещины (размером в несколько микрон) образуются в процессе обработки детали и резко снижают ее прочность.

Наиболее грубыми дефектами металла являются макроскопические дефекты.

Дефекты металла различают по размерам и расположению, также по природе и происхождению.

Они могут образоваться в процессе плавки и литья (раковины, поры, зоны рыхлоты, включения, ликвационные зоны, горячие трещины, неслитины и т.д.), обработки давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, пресс-утяживания, рванины, закаты, плены, флокены и т.д.), термической и химико-термической обработки (зоны грубозернистой структуры, перегрева, пережога, термические трещины, несоответствие толщины закаленного, цементованного, азотированного и других слоев, несоответствие толщины слоя гальванического покрытия и т.д.), обработки резанием (шлифовочные трещины, прижоги), сварки, пайки, склеивания (непровар, трещины, непропай, непрочлей), хранения и эксплуатации (коррозия, усталостные трещины, ползучесть и т.д.).

4.3.1. Дефектоскопия

Дефектоскопия- совокупность методов и средств неразрушающего контроля, предназначенных для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности и неоднородности в материалах.

Основными методами дефектоскопии являются:

магнитный, электрический, вихретоковый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный, акустический и метод проникающих веществ.

Наилучшим образом задачи контроля качества решаются при комплексном использовании различных методов дефектоскопии.

Магнитная дефектоскопия. Основана на исследовании искажения магнитного поля, возникающего в местах расположения дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов. Индикатором может служить магнитный порошок (магнитопорошковый метод), магнитная лента (магнитографический метод), феррозонд, индукционная катушка, датчик Холла, магниторезистор и др.

Чувствительность метода магнитной дефектоскопии зависит от магнитных характеристик материалов, применяемых индикаторов, преобразователей, режимов намагничивания и др.

Методом магнитной дефектоскопии можно обнаружить макродефекты - трещины, раковины, непровары, расслоения на глубине до 10 мм с минимальным размером более 0,1 мм.

Электрическая дефектоскопия основана на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля. Наиболее распространен электроемкостный метод, определяющий дефекты диэлектрических материалов по изменению емкости при введении объекта в электрическое поле конденсатора.

Термоэлектрический метод основан, на измерении электродвижущей силы (термо-ЭДС), возникающей в замкнутой цепи при нагреве места контакта двух разнородных материалов. Если один из этих материалов принять за эталон, то при заданной разности температур горячего и холодного контактов

величина и знак термо-ЭДС будут определять неоднородность и химический состав второго материала.

Электростатический метод основан на использовании электростатического поля, в которое помещают изделие. Для обнаружения поверхностных трещин изделия из неэлектропроводящих материалов (фарфор, стекло, пластмассы) опыляют тонким порошком мела из пульверизатора с эбонитовым наконечником (порошковый метод). При этом частицы мела получают положительный заряд. В результате неоднородности электростатического поля частицы мела скапливаются у краев трещин.

Электропотенциальный метод применяют для определения глубины трещин по искажению электрического поля при обтекании дефекта током. Диапазон измеряемой глубины трещин токопроводящих материалов 0,5 - 100 мм и более.

Электроискровой метод основан на возникновении электрического разряда в месте нарушения сплошности.

Применяют для контроля качества неэлектропроводящих защитных покрытий (лакокрасочные, эмалиевые и другие изоляционные покрытия) на трубах и различных деталях из металла. Максимальная толщина контроля покрытия 10 мм.

Вихретоковая дефектоскопия основана на анализе изменения в месте расположения дефекта поля вихревых токов, наводимых в электропроводящем объекте электромагнитным полем преобразователя. Вихретоковую дефектоскопию применяют для обнаружения поверхностных дефектов - трещин, раковин, волосовин - глубиной более 0,1 мм на металлических изделиях (трубах, прутках, листах и др.), а также для обнаружения более грубых подповерхностных дефектов, расположенных на глубине до 8 - 10 мм.

Тепловая дефектоскопия основана на регистрации температурных полей объекта контроля.

В качестве приемников излучения используют фотосопротивления, фотодиоды, фототриоды, фотоумножители, электронно-оптические

преобразователи (ЭОП), болометры, термоиндикаторы, термопары, пирометры и др.

Объект контроля может подвергаться воздействию внешнего источника тепловой энергии - плазмотрона, лампы накаливания, лазера (активный метод), при этом осуществляется измерение прошедшего через объект или отраженного от него теплового излучения.

Наиболее распространены пассивные тепловые методы без использования внешнего источника нагрева, такие как тепловизионный метод получения и анализа изображения температурного поля дефекта с помощью сканирования поверхности объекта узким оптическим лучом, метод термокрасок, цвет которых зависит от температуры поверхности изделия и др.

Тепловую дефектоскопию применяют для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов (трещин, расслоений, пор и др.) изделий из теплопроводных материалов.

Оптическая дефектоскопия основана на анализе взаимодействия оптического излучения (длина волны 0,4 - 0,76 мкм) и объекта контроля.

Наиболее простым является визуальный метод обнаружения поверхностных дефектов или дефектов внутри прозрачных для оптического диапазона волн материалов.

Для получения увеличенного изображения дефекта используют проекторы и микроскопы.

Для контроля шероховатости поверхности применяют интерферометры, в том числе голографические, сравнивающие световые волны при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхностей.

Для обнаружения поверхностных дефектов (царапин, трещин коррозионных пятен, выбоин и других размером более 0,01 мм) в труднодоступных местах применяют эндоскопы.

Радиационная дефектоскопия основана на регистрации и анализе ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом.

Широко используют рентгеновское, гамма-, нейтронное излучение, альфа- и бета-излучения.

Радиационная дефектоскопия обеспечивает выявление дефектов (раковин, пор, расслоений, непроваров, инородных включений и др.) с чувствительностью (отношение протяженности дефекта в направлении просвечивания к толщине стенки детали) 1 - 5 %.

Широко применяют для контроля качества сварных швов.

Ультразвуковые методы контроля основаны на возбуждении в объекте контроля высокочастотных упругих волн и анализе волн, рассеянных дефектом. Параметры рассеянного поля зависят от размеров дефекта и длины волны ультразвука.

Применяют для контроля объектов из металла и диэлектриков, для контроля качества сварных швов, полуфабрикатов и готовой продукции.

Для регистрации колебаний используют пьезоэлектрические, а также электромагнитно-акустические и магнитострикционные преобразователи.

Основные методы акустической дефектоскопии - эхо-метод, теневой, резонансный, велосимметрический, импедансный, свободных колебаний, акустико-эмиссионный.

Для повышения информативности контроля необходимо увеличить число анализируемых параметров рассеянного поля, в частности применять методы восстановления образа дефекта по параметрам рассеянного поля. Эти методы называют голографическими.

Широко начинает применяться спектральный метод, сущность которого заключается в том, что объект с дефектами озвучивают ультразвуковыми колебаниями не одной частоты, а в широкой полосе частот. Затем принимают рассеянные дефектом колебания и анализируют не только амплитуду одной частоты, а сразу несколько амплитуд на нескольких частотах. Анализируя огибающую спектра, можно в значительной мере увеличить количество информации о дефекте по сравнению с обычным многочастотным методом.

Дефектоскопия проникающими веществами основана на проникновении веществ в полости дефектов объекта контроля.

Для выявления поверхностных дефектов применяют капиллярную дефектоскопию. Искусственное повышение контрастности достигается вследствие нанесения материалов, заполняющих дефекты под действием капиллярных сил.

Эффект обнаружения дефектов усиливается с помощью люминесцирующего в ультрафиолетовом излучении (УФ) вещества (люминесцентный метод) или контрастирующего цветного вещества (цветной метод).

Капиллярную дефектоскопию широко применяют для обнаружения мельчайших поверхностных дефектов глубиной более 10 мкм и шириной раскрытия более 1 мкм на деталях из металлов, пластмасс, керамики и композиционных материалов различных машин, механизмов и устройств.

Дефектоскопия течеисканием основана на проникновении газообразных и жидких веществ через сквозные дефекты с целью установления степени герметичности изделий, которая определяется потоком газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером пятна и пр. Различают газовые, газожидкостные и жидкостные методы контроля герметичности.

Метод акустической эмиссии (АЭ). Метод основан на улавливании звуковых сигналов, излучающих при пластической деформации твердых сред. Для проверки энергетического оборудования, в частности трубопроводов, поверхностей нагрева, корпусов машин, этот метод выгодно отличается от известных: не требует специальной подготовки поверхности и дает интегральную информацию. Установив один или несколько датчиков акустической эмиссии неподвижно на поверхности объекта, можно не проводить сканирование и получить информацию о дефектах, к которым затруднен доступ.

Метод АЭ обладает высокой чувствительностью к развивающимся дефектам, превосходящей другие методы, например, обнаруживает приращение трещины порядка долей миллиметра.

Для этого метода геометрические размеры и ориентация дефекта не имеет существенного значения; он имеет также меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой материалов.

Недостаток этого метода - необходимость специальным образом нагружать объект контроля (путем гидроиспытаний, подачи пара, механическими устройствами).

Номенклатура средств дефектоскопии достигает нескольких сотен типов приборов.

Наибольшее применение для выявления дефектов, расположенных на поверхности изделий, получили вихретоковые дефектоскопы с накладными и проходными преобразователями, магнитные и капиллярные дефектоскопы, оптические эндоскопы и бороскопы.

Для обнаружения дефектов внутри металла наиболее часто используют (акустические эхо-импульсные дефектоскопы и радиографическую технику).

4.3.2. Интроскопия.

Методы и средства интроскопии (внутривидения) основаны на визуализации электромагнитных и акустических полей при взаимодействии их (прохождении, отражении, рассеянии и т.п.) с материалом и конструкцией объекта диагностирования. Наиболее часто используется визуализация рентгеновского изображения.

Принципиальная схема рентгеновизуальной диагностической установки основана на прохождении рентгеновского излучения через диагностируемый объект и преобразовании излучения на входном экране в световой; электронный или потенциальный рельеф, соответствующий рентгеновскому изображению объекта.

Полученный рельеф можно воспринимать или непосредственно, если он световой, или через систему электронно-оптического усиления и преобразования, которая преобразует этот рельеф в усиленное изображение на выходном экране. Самым простым методом рентгеновской интроскопии является флюороскопия, при которой прошедшее через изделие излучение проецируется на флюороскопический экран.

Рентгеновская вычислительная томография - новое направление в рентгенодиагностической технике.

Вычислительная томография основана на послойном поперечном сканировании объекта коллимированным рентгеновским пучком, измерении излучения за объектом детекторами с линейной характеристикой, синтезе полутонового изображения по совокупности измеренных данных и построении этого изображения с помощью ЭВМ на экране электронно-лучевого индикатора.

Фундаментальным отличием является то, что томографическое изображение не связано непосредственно с принятым излучением, а является результатом точных измерений и вычислений, использующих данные, относящиеся только к выбранному слою.

Высокая точность измерений и вычислений позволяет при анализе изображений различать вещества или ткани, весьма мало отличающиеся друг от друга по плотности. Объем информации по плотности, содержащейся в томограмме, при прочих равных условиях примерно в 100 раз больше, чем в обычной рентгенограмме.

Ультразвуковая интроскопия. В системах формирования изображений используется сильно сфокусированный ультразвук, который, подобно рентгеновским лучам, позволяет сформировать изображение внутренней структуры объекта контроля. Для этого проводится сканирование объекта контроля одним или несколькими преобразователями, что позволяет получать данные из нескольких точек. Изменения амплитуды и положения эхосигналов отражают изменения структуры материала, из которого выполнен объект

контроля. Используя специальное преобразование этой информации в графический вид, можно формировать очень подробные изображения.

Томографический метод обладает высокой достоверностью выявления дефектов, но в то же время и высокой стоимостью. Его целесообразно применять для уточнения результатов диагноза отдельных ответственных узлов и блоков энергоустановок. Одной из проблем является разработка сканеров для контроля объектов со сложным профилем.

4.3.3. Методы определения состава и структуры материала.

Рентгеновские методы. По аппаратурно-методическим признакам рентгеновские методы определения состава и структуры материала можно классифицировать как рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализ.

Физическая сущность рентгеноспектрального анализа состоит в том, что при поглощении первичного рентгеновского излучения в исследуемом образце энергия поглощенного излучения переходит в энергию ионизации вещества. Каждый химический элемент имеет спектр излучения, характерный только для него, а само излучение называется характеристическим, по спектру которого можно определить элементный или атомный состав вещества, а по интенсивности - концентрацию атомов данного элемента.

Метод рентгеноструктурного анализа применяется для исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивности рентгеновского излучения, рассеянного на анализируемом образце.

Методы рентгеноструктурного анализа позволяют определить дефекты кристаллического строения вещества. Сущностью рентгеноструктурного анализа является дифракция, возникающая при взаимодействии первичного рентгеновского излучения с электронами исследуемого объекта. Дифракционная картина зависит от длины волны рентгеновских лучей и строения вещества.

Особое место занимают дифрактомеры определения макронапряжений в крупногабаритных объектах по угловому смещению интерференционных максимумов, вызываемому изменениями периодов кристаллической решетки при деформации (напряжении) материала.

Ультразвуковые методы. Изменения физической структуры материала будут оказывать влияние на характеристики проходящих через него ультразвуковых волн.

Для ультразвукового анализа свойств материалов обычно используются значения таких параметров, как скорость ультразвука, степень его ослабления или рассеивания, а также частотная составляющая ультразвуковых эхосигналов.

Измерения значений этих параметров позволяют анализировать или измерять характеристики таких свойств материалов, как модуль эластичности, плотность, структура гранул, ориентация кристаллов или степень полимеризации.

Магнитные методы. Корреляция между магнитными и физико-химическими свойствами материала служит основой для магнитного анализа качества и структуры ферромагнетиков. Такая корреляция возникает в тех случаях, когда физические и химические процессы образования и перестройки структуры и фазового состава металла одновременно формируют его магнитные свойства.

Если есть возможность определения влияния одного или нескольких факторов на размеры и форму петли гистерезиса и если этот фактор одновременно и однозначно влияет на другие физические (немагнитные) свойства материала, можно установить связь между ними и использовать магнитные свойства для контроля физических или химических свойств (параметров).

В настоящее время в промышленных условиях нашли широкое применение следующие магнитные приборы контроля механических свойств и структуры металлов:

- ферритометры - приборы для определения содержания ферритной фазы в сталях.

- коэрцитиметры - приборы для измерения коэрцитивной силы материала изделия.

- приборы для измерения остаточной индукции и магнитной проницаемости контролируемых изделий.

- измерители магнитных шумов - шумов Баркгаузена.

Вихретоковые методы основаны на наличии корреляционных связей между физико-химическими свойствами материала и сигналами вихретоковых преобразователей. Эти связи проявляются через электрофизические свойства материала - удельную электрическую проводимость и магнитные характеристики.

В настоящее время серийно выпускаются измерители удельной электрической проводимости, измерители магнитной проницаемости и вихретоковые структуроскопы.

Вихретоковые структуроскопы позволяют оценивать степень химической чистоты электропроводящих материалов, сортировать полуфабрикаты и изделия по маркам (химическому составу) материала, по твердости, прочности и т.д.

Структуроскопами можно выявлять неоднородные по структуре зоны, оценивать глубину и качество механической, термической и химико-термической обработки на разных стадиях технологического процесса.

С помощью структуроскопов можно определять и степень механических напряжений, выявлять зоны усталости, контролировать качество поверхностных слоев.

4.3.4. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле.

При рассмотрении задачи НК как информационного процесса и абстрагирования от используемых физических методов неразрушающего контроля, можно выделить следующие три характерные части этого процесса:

- получение первичной измерительной информации с помощью преобразователей и приведение ее в форму, удобную для дальнейшей обработки;

- обработка информации и представление результатов обработки в форме, пригодной для анализа и дальнейшей интерпретации;

- проведение анализа полученной информации и формирование решения о состоянии контролируемого объекта, возможности его нормального функционирования или прогнозирование его остаточного ресурса.

4.3.5. Индустриализация применения методов неразрушающего контроля

Совершенствование опыта в области системного анализа, развитие научно-методической базы и накопление статистической Информации позволили подойти к формулировке и обоснованию концепции «абсолютной надежности» ответственных систем, которая базируется на результатах использования вероятностных методов анализа безопасности и прочности, анализа критичности и оптимального резервирования, совершенствования и широкого применения методов НК, автоматизированных систем НК, количественного учета влияния НК на прочность и долговечность систем, компьютерном анализе и оценке результатов расчетов и измерений.

При проведении мониторинга, исследования систем (элементов) и применения методов НК с целью продления ресурса важными являются данные, получаемые в результате решения задач:

- прогнозирования вероятности безотказной работы (ВБР) элементов и систем. Прогнозирование может осуществляться отдельно по постепенным и внезапным отказам, с использованием моделей полиномиальной регрессии, моделей анализа цензурированных выборок;

- составления обобщенной структурной схемы надежности системы, ее узлов и элементов. Структурная схема надежности представляет собой такую совокупность функционально подобных основных и резервных элементов, отказ которых вызывает неустранимый отказ всей системы;

- формирования критериев предельного состояния для системы. Предельным состоянием элемента является его неустранимый отказ. Неустранимый отказ элемента, который вызывает отказ системы, означает переход системы в ее предельное состояние;

- прогнозирования остаточного ресурса узлов и системы в целом. Показатели остаточного ресурса определяются по эмпирической зависимости ВБР узла от наработки.

Остаточный ресурс системы может прогнозироваться двумя способами: по результирующей зависимости ВБР системы от наработки, рассчитываемой на основе аналогичных функциональных узлов, либо по остаточному ресурсу наиболее "слабого" в смысле долговечности узла.

В качестве количественных оценок показателей остаточного ресурса используются средний и гамма-процентный остаточные ресурсы.

Для эффективного решения задач прогнозирования ТС и остаточного ресурса систем, повышения их долговечности актуальными являются:

- совершенствование приборного контроля, повышение точности, применение передовых методов контроля технического состояния и методов НК;

- автоматизация сбора обработки и хранения эксплуатационной информации на базе универсальных измерительных аппаратно-программных комплексов, разработка и ведение базы данных мониторинга ТС систем, разработка форм эксплуатационных документов для сбора данных, необходимых для прогнозирования остаточного ресурса систем, формирование перечня критичных с точки зрения надежности элементов исследуемых систем для контроля;

- детальная проработка перечня контролируемых параметров, мест, методов и технологий измерений, приборов для контроля и их класс точности, периодичность контроля.

- В качестве базового средства измерения при мониторинге ТС необходимо использовать аппаратно-программные комплексы по сбору и

обработке измерительной информации на базе персональных компьютеров, которые дают высокую точность и оперативность измерений, предоставляют широкие возможности при обработке и хранению результатов, многофункциональность, высокую мобильность, относительно низкую стоимость (по сравнению с общей стоимостью заменяемых приборов). Результаты применения НК могут быть полезными при обосновании оптимальных объемов ремонтно-восстановительных работ, обеспечивающих заданное (или максимально возможное при выделенном количестве средств на ремонт) продление технического ресурса анализируемых систем.

5. Диагностические комплексы и мобильные диагностические лаборатории

Автоматизация процессов диагностирования.

Использование вычислительной техники обеспечивает возможность создания гибких автоматизированных систем диагностирования, которые выполняют как отработанные алгоритмы, так и перестраиваются на новые, находящиеся в стадии создания. При этом основой является микропроцессорная техника, которая служит для создания электронных моделей с целью более эффективного прогнозирования надежности оборудования. Наиболее перспективными являются распределенные автоматизированные системы диагностирования.

Рассмотрим систему диагностирования энергоблоков с использованием средств вычислительной техники (рис. 5). Система содержит датчики Д, преобразователи информации АЦП и ЦАП, исполнительное устройство ИУ, нормализаторы Н, коммутатор и ЭВМ. Датчики измеряют характеристики физико-химических процессов, обусловленных дефектами проверяемого объекта.

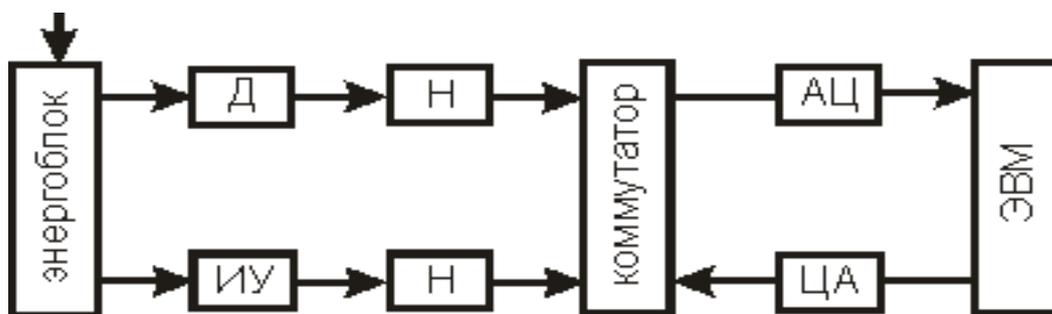


Рисунок 5 - Система диагностирования энергоблока

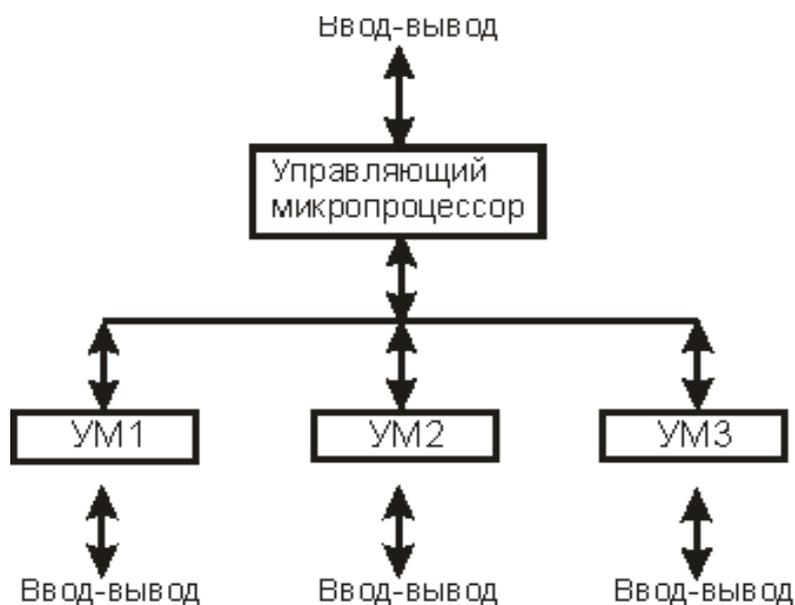


Рисунок 6 - Иерархическая система диагностирования

В современных системах диагностирования энергоблоков используют иерархические структуры: на первом уровне - местные системы диагностирования (МСД), на втором - центральные системы диагностирования (ЦСД). Системы диагностирования выполняют различные функции на различных уровнях иерархии, например на первом - обнаружение неисправностей, а на втором - их локализация. Распределение функций по уровням иерархии может быть смешанным.

В сложных системах диагностирования для передачи информации на значительные расстояния применяют специальные телекоммуникационные средства. Во всех системах иерархического типа имеется «инженерный пульт»,

на котором отображается сводная информация о состоянии технических устройств для своевременного принятия решения по их эксплуатации.

В иерархической системе диагностирования объектов с использованием микропроцессоров (рис. 6) отдельные участки объекта проверяются собственными управляющими микропроцессорами (УМ), а оценка результатов производится централизованно.

Для организации связи между микропроцессорами можно использовать независимые шины и общую шину. Если не требуется высокое быстродействие системы и система работает почти в автономном режиме, то вместо управляющего микропроцессора используют общую оперативную память, через которую осуществляется обмен информацией.

Мобильные диагностические лаборатории.

Мобильные лаборатории предназначены для диагностики состояния электрооборудования и линий электропередач, а также для проведения исследовательских, профилактических и ремонтных работ на объектах энергетики промышленных предприятий.

Мобильные лаборатории позволяют с максимальной эффективностью использовать высококвалифицированных специалистов, осуществляющих диагностирование электрооборудования и определение мест повреждения электрических сетей.

Существующая практика использования мобильных лабораторий показывает, что основными характеристиками, влияющими на эффективность работы, являются безопасность лаборатории, эргономичность, функциональность и надежность.

Безопасность лаборатории подразумевает под собой, в первую очередь, защищенность персонала от поражения электрическим током. Наличие визуальной и световой сигнализации, цепей блокировок, устройств аварийного отключения лаборатории существенно снижают вероятность поражения электрическим током.

Учитывая, что мобильные лаборатории работают по 300 дней в году в различных погодных условиях, можно сказать, что наличие систем отопления и кондиционирования отсека оператора относится к числу необходимых условий обеспечения безопасности и комфортных условий труда.

Эргономичность лаборатории, то есть простота и удобство управления всем оборудованием и измерительными системами лаборатории, также неразрывно связана с проблемой безопасности.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускается серии специализированных мобильных диагностических лабораторий МЕГА:

- МЕГА - 1: для диагностики трансформаторов, высоковольтных вводов и испытания оборудования распределительных устройств;

- МЕГА - 2: для испытания силовых кабелей и определения мест повреждений;

- МЕГА - 3: для диагностики высоковольтных выключателей и аккумуляторных батарей;

- МЕГА - 4: полный комплекс диагностики оборудования и кабельных линий;

- МЕГА - 5: для диагностики устройств релейной защиты и автоматики.

- МЕГА-8: передвижная дефектоскопическая лаборатория неразрушающего предназначена для проведения инспекционных, исследовательских, ремонтных и профилактических работ методами неразрушающего контроля на объектах в городских и трассовых условиях.

Мобильные лаборатории смонтированы на базе автомобилей повышенной проходимости: КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ-3308. Используются также цельнометаллические автомобили-фургоны: Газель 2705 с высокой крышей, Соболь 2752, Ford Transit VAN, БИС-1705, УАЗ-39629, УАЗ-3162, Volkswagen LT-35. Все эти лаборатории предназначены для эксплуатации при температуре наружного воздуха в диапазоне от - 40 до 40 °С.

МЕГА-1: Передвижная лаборатория для диагностики силовых трансформаторов предназначена для проведения полного комплекса диагностики трансформаторов, измерения диэлектрических характеристик изоляции трансформатора и высоковольтных вводов и измерения параметров масла.

Основные функции:

- измерение сопротивлений изоляции обмоток и вводов;
- измерение диэлектрических характеристик изоляции обмоток и вводов;
- измерение сопротивления обмоток постоянному току;
- измерение потерь холостого хода;
- измерение сопротивлений короткого замыкания;
- измерение коэффициента трансформации;
- испытание изоляции обмоток трансформатора повышенным напряжением 50 Гц;
- испытание оборудования распределительных устройств повышенным напряжением 50 Гц;
- определение пробивного напряжения трансформаторного масла;
- измерение диэлектрических характеристик трансформаторного масла;
- определение влагосодержания трансформаторного масла;
- анализ газов, растворенных в трансформаторном масле.

Для обработки результатов измерений используется персональный компьютер типа Notebook со специальным программным обеспечением, реализующим функции записи, обработки и хранения результатов испытаний и диагностики с предоставлением протоколов измерений и диагностической оценкой степени дефектности высоковольтного оборудования.

МЕГА-1 Transformer 150 передвижная лаборатория для диагностики силовых трансформаторов номинальным напряжением до 35 кВ и выше

Назначение. Электротехническая лаборатория МЕГА-1 предназначена для проведения диагностики силовых трансформаторов и распределительных устройств:

1. Испытание силовых трансформаторов, высоковольтного оборудования и аппаратов повышенным напряжением промышленной частоты до 100 кВ;
2. Измерение сопротивления изоляции, напряжением до 5000В;
3. Измерение параметров трансформаторов:
 - потери холостого хода;
 - потери короткого замыкания;
 - сопротивление короткого замыкания;
 - коэффициент трансформации;
 - измерение тангенса угла диэлектрических потерь.
4. Измерение сопротивления обмоток постоянному току;
5. Измерение сопротивления заземляющих устройств;
6. Неконтактное измерение температуры токоведущих частей;
7. Испытание трансформаторного масла на пробой;
8. Измерение тангенса диэлектрических потерь и удельного сопротивления трансформаторного масла;
9. Измерение влагосодержания в трансформаторном масле;
10. Хроматографический анализ трансформаторного масла.

Оборудование лаборатории МЕГА-1 условно подразделяется на основное (монтируемое) и дополнительное (не монтируемое) оборудование. Компоновка лаборатории МЕГА-1 позволяет обеспечивать наращивание и расширение функций лаборатории.

Лаборатория МЕГА-1 имеет автоматизированную систему управления процессами сборки цепей измерений, проведения испытаний и обработки результатов и обеспечивает:

- управление испытаниями повышенным напряжением;
- отображение на дисплее пульта управления информации о текущем состоянии системы с текстовыми пояснениями;
- составление отчётов и протоколов испытаний;
- хранение данных об испытаниях и измерениях;
- обмен информацией через USB порт с периферийными устройствами.

- определение места повреждения акустическим методом;
- определение места повреждения электромагнитным методом;
- определение места повреждения оболочки кабельной линии;
- определение трассы кабельной линии;
- определение глубины прокладки кабельной линии;
- определение искомого кабеля в пучке кабелей.

Для обработки результатов измерений используется персональный компьютер типа Notebook со специальным программным обеспечением, реализующим функции записи, обработки и хранения результатов испытаний и диагностики с предоставлением протоколов измерений и диагностической оценкой степени дефектности высоковольтного оборудования.

МЕГА-3: Передвижная лаборатория для диагностики высоковольтных выключателей и аккумуляторных батарей.

Передвижная электротехническая лаборатория МЕГА-3 предназначена для проведения диагностических работ и оценки остаточного ресурса высоковольтных выключателей и для тестирования аккумуляторных батарей.

Основные функции:

- измерение временных характеристик выключателей при различных уровнях напряжения на электромагнитах включения и отключения;
- оценка наличия вакуума в камерах вакуумных выключателей;
- измерение переходного сопротивления контактов выключателя;
- измерение сопротивления и испытание изоляции вторичных цепей выключателей;
- вибромониторинг процессов включения и отключения;
- диагностика состояния аккумуляторных батарей методом контрольного разряда с заданным профилем нагрузки;
- измерение напряжения, температуры и плотности электролита элементов аккумуляторной батареи как в процессе разряда/заряда, так и в режиме подзаряда батареи.

Для обработки результатов измерений используется персональный компьютер типа Notebook со специальным программным обеспечением.

МЕГА-4 TansStation 150 мобильный комплекс с полным оснащением для диагностики электротехнического оборудования и кабельных линий напряжением до 110 кВ и выше. Электротехническая лаборатория МЕГА-4 предназначена для проведения следующих работ:

1. Испытание высоковольтного оборудования повышенным напряжением 100 кВ промышленной частоты 50Гц.

2. Испытание силовых кабельных линий повышенным напряжением постоянного тока до 80 кВ.

3. Испытание силовых кабельных линий повышенным напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц до 57 кВ.

4. Оценка и локализация частичных разрядов (ЧР) в изоляции кабелей.

5. Проведение низковольтных измерений параметров силовых трансформаторов и измерение сопротивления постоянному току.

6. Измерение сопротивления изоляции, напряжением до 5000В.

7. Предварительное определение места повреждения кабеля с использованием следующих методов:

- метод рефлектометрии TDR, 160В;

- импульсно-дуговой ударный метод SIM, 32кВ;

- усовершенствованный импульсно-дуговой ударный метод SIM-MIM, 32кВ;

- метод развязки по току в ударном режиме SIM, 32кВ;

- метод затухающих колебаний, 80кВ.

8. Точное определение места повреждения кабельной линии с помощью ударного генератора и акустического прибора поиска мест повреждений.

9. Определение трассы кабельной линии.

10. Испытание изоляционных масел: определение электрической прочности масла, до 70кВ.

11. Измерение параметров трансформаторов:

- потери холостого хода;
- потери короткого замыкания;
- сопротивление короткого замыкания;
- коэффициент трансформации;
- измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции по «прямой» и «перевернутой» схемам.

Оборудование лаборатории МЕГА-4 условно подразделяется: на основное (монтируемое) и дополнительное (не монтируемое) оборудование.

Компоновка лаборатории МЕГА-4 позволяет обеспечивать наращивание и расширение функций лаборатории, применять современные методы диагностики – измерения тангенса диэлектрических потерь и частичных разрядов с локализацией источника ЧР.

Лаборатория МЕГА-4 имеет автоматизированную систему управления процессами сборки цепей измерений, проведения испытаний и обработки результатов и обеспечивает:

- управление испытаниями повышенным напряжением;
- выбор методов определения мест повреждения кабельных линий;
- управление процессами поиска мест повреждения кабельных линий;
- отображение на дисплее пульта управления информации о текущем состоянии системы с текстовыми пояснениями;
- составление отчётов и протоколов испытаний;
- хранение данных об испытаниях и измерениях;
- обмен информацией через USB порт с периферийными устройствами.

Фургон:



Рисунок – 7 Внешний вид лаборатории МЕГА-4

Лаборатория конструктивно разделена на два отсека: отсек оператора и аппаратный отсек. Лабораторное оборудование изготовлено из термостойкого материала. Встроенные системы жизнеобеспечения позволяют проводить работы в автономном режиме в любых природно-климатических условиях, в том числе в районах Севера. В лаборатории обеспечены комфортные условия перевозки и пребывания в полевых условиях бригады специалистов.

МЕГА-8: Передвижная дефектоскопическая лаборатория неразрушающего контроля.



Основные функции:

- радиографический контроль;
- ультразвуковой контроль;

- визуально-измерительный контроль;
- магнитопорошковый контроль;
- капиллярный контроль;
- тепловизионный контроль;
- контроль качества изоляции;
- термообработка сварных соединений;
- акустико-эмиссионный контроль.

Передвижная лаборатория диагностики силовых трансформаторов и распределительных устройств «Аврора-Т»

Передвижная лаборатория диагностики высоковольтных трансформаторов предназначена для проведения комплекса работ по испытанию и диагностике силовых трансформаторов согласно регламентирующего перечня испытаний силовых трансформаторов РД 34.45-51.300 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» при вводе их в работу и в процессе эксплуатации.

Функции лаборатории:

- измерение параметров изоляции оборудования;
- измерение сопротивления контактов оборудования и сопротивления обмоток трансформаторов;
- измерение потерь холостого хода силовых трансформаторов;
- измерение сопротивлений короткого замыкания силовых трансформаторов;
- проверка коэффициента трансформации трансформаторов;
- проверка группы соединения обмоток трансформаторов;
- испытание изоляции оборудования повышенным напряжением промышленной частоты;
- испытание изоляции оборудования повышенным выпрямленным напряжением.

Таблица 1 - Виды испытаний и технические характеристики лаборатории

Наименование параметра	Значение
Высоковольтные испытания повышенным напряжением	
Испытательное напряжение промышленной частоты, кВ	0...100
Испытательное выпрямленное напряжение, кВ	70
Установившийся ток к.з., А,	не менее 1,2
Минимальная емкость нагрузки, нФ	0,01
Макс. емкость нагрузки при U ном., нФ	1,9
Испытательная мощность, кВА:	
длительный режим	4,1
повторно-кратковременный режим	7,8
Макс. потребляемая мощность, кВА	4,4
Измерение сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции	
Измерительное напряжение, В	100, 1000, 2500, 5000
Диапазон измерений	100 кОм...10 тОм
Точность измерения сопротивления изоляции:	+/- 2 % от диапазона измерения +/- 3 цифры
Измерение тангенса угла потерь изоляции обмоток и выводов	
Испытательное напряжение, кВ	0-12
Испытательный ток (12кВ), мА	Макс.87(непрерывно)/ макс.167(кратковремен.)
Измерение омического сопротивления обмоток	
Испытательное напряжение DC, В	50
Испытательный ток, А	50
Диапазон измерения сопротивления, Ом	100 мкОм – 10 Ом

Продолжение таблицы 1

Наименование параметра	Значение
Измерение потерь трансформатора (параметры холостого хода и короткого замыкания)	
Диапазон измеряемого напряжения, U, AC, В	0,001 - 640
Диапазон измеряемого тока, А	0,0001 - 50
Диапазон измеряемой мощности	0,32 мВт – 32 кВт
Частота, Гц	40 - 400
Диапазон измерения тангенса угла диэлектрических потерь tg δ	0-100% (макс.разрешение
емкость, pF	1pF-1,1/uF (макс.разрешение

Базовая операционная система WIN98 и выше Базовая СУБД Excel 97 Интерфейс RS-232. Базовый автомобиль - УАЗ–390994, грузопассажирский фургон. Перегородка с раздвижным окном разделяет фургон на три отсека: высоковольтный, оператора и передний – кабину водителя. В нижней части обеих задних дверей прорезан лючок размером 200x100 мм для ввода кабеля. Лючок фиксируется в закрытом положении. Внутренние стенки рабочего отсека утеплены пенопластом и отделаны пластиковыми панелями. Пол отсека застелен фанерой и покрыт автомобильным линолеумом «Автолин». Смонтирован натяжной тканевый потолок и установлены плафоны освещения салона.

Состав лаборатории

Конструктивно лаборатория состоит из двух 19-дюймовых приборных стоек и системы подключения к объекту диагностики (модуль кабельных барабанов), в которых расположено измерительное и диагностическое оборудование:

1. Компьютер модуля управления системой измерений

2. Модуль измерения тангенса дельта (МИТД)
3. Модуль системы питания (МСП)
4. Модуль управления системой измерений (МУСИ)
5. Модуль измерения сопротивления обмоток (МИСО)
6. Модуль измерения потерь (МИП)
7. Модуль измерения повышенным напряжением (МИПН)
8. Модуль измерения сопротивления изоляции (МИСИ)

Уникальным элементом стойки №1 является специализированная рабочая станция iROBO Workstation iROBO-5000-8333 и специальное программное обеспечение, которые вместе образуют универсальный модуль управления всей системой измерений лаборатории.

Технические характеристики iROBO-5000-8333: 19" 8U рабочая станция, 15" TFT LCD VGA, сенсорный экран/4xPCI,1xPCI-Express x16, 4xPCI-Express x1/Intel Intel C2D E6750 2.66ГГц/1Гб DDR2 667/2xGb LAN/160Гб SATA HDD/DVD-RW/300Вт ATX/

Программное обеспечение. Программное обеспечение (ПО), обслуживающее универсальный модуль управления, регистрирует результаты измерений. Через интерфейс обмена данными в автоматическом режиме по окончании каждого замера результаты измерений переносятся в таблицы и представляются в наглядной форме.

ПО позволяет рассчитать отклонения между измеренными величинами, сравнить результаты измерений с паспортными данными и данными ранее проведенных испытаний. Рассчитанные величины отклонений, вышедшие за пределы норм установленных в настройках программного обеспечения, для удобства операторов выделяются красными рамками.

Безопасность - 5 ступеней защиты от поражения электрическим током:

- F-U (контроль напряжения на корпусе);
- F-Ω (контроль сопротивления заземления);
- концевые выключатели задних дверей;
- световая, звуковая сигнализация и рубильник видимого разрыва;

- аварийный выключатель.

Т.о. Данная высоковольтная лаборатория позволяет оперативно получать высоко достоверные результаты комплексного обследования силовых трансформаторов, что особенно важно для обеспечения их безаварийной работы, а также своевременной замены или ремонта.

6. Диагностика коммутационных аппаратов

6.1. Диагностика изоляции коммутационных аппаратов

6.1.1 Свойства изоляционных материалов.

Диэлектрические материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей коммутационных аппаратов. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции, как вакуум, элегаз, воздух, нефтяные и искусственные масла, твердые диэлектрики. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид и тип используемых электротехнических материалов.

Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала:

- механические - плотность и вес материала, прочность;
- теплофизические - теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть;
- электрофизические - диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность, триингостойкость (триинг - образование разветвленной микроструктуры в виде объемной сетки или микрокустов в теле диэлектрика, состоящей преимущественно из воды);
- физико-химические - химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д. Реальные диэлектрики отличаются от идеальных прежде всего наличием в

теле диэлектрика микропор, в особенности на поверхности раздела "электрод-диэлектрик". Они возникают в процессе изготовления электроизоляционной конструкции, хотя в ряде случаев могут образоваться и в процессе эксплуатации, например в результате вибрации или механических напряжений.

Наличие пор и связанное с ними возникновение ионизационных явлений, является одним из главных факторов ухудшения свойств электрической изоляции в процессе эксплуатации - старения диэлектриков.

Старение диэлектрика (постепенное его изменение, сопровождающееся ухудшением или полной потерей изоляционных свойств) вызывается процессами, связанными с химическими, тепловыми, механическими и электрическими воздействиями. Эти процессы действуют одновременно и являются взаимосвязанными.

К химическим процессам ухудшения органических изоляционных материалов относятся окисление и реакции с агрессивными компонентами окружающей среды, которым благоприятствует наличие влаги и повышенная температура.

При нагреве, вследствие внешних причин и диэлектрических потерь, износ материала сопровождается распадом вещества, появлением хрупкости, снижением электрической прочности.

К основным явлениям старения относятся также физические и химические изменения органических изоляционных материалов, вызванные процессами частичных разрядов.

Механические воздействия, вызывая нарушения целостности материала (разрывы, расслоения), снижают электрическую прочность изоляционной конструкции.

Все твердые диэлектрические материалы можно разделить на группы, используя разные принципы. Например, разделить на неорганические и органические материалы.

Неорганические диэлектрики: стекло, слюда, керамика, неорганические пленки (окислы, нитриды, фториды), металлофосфаты, электроизоляционный

бетон. Особенности неорганических диэлектриков - негорючи (как правило), свето-, озono- терmostойки, имеют сложную технологию изготовления.

Старение на переменном напряжении практически отсутствует, склонны к старению на постоянном напряжении.

Органические диэлектрики: полимеры, воски, лаки, резины, бумаги, лакоткани.

Особенности органических диэлектриков - горючи (в основном), малостойки к атмосферным и эксплуатационным воздействиям, имеют (в основном) простую технологию изготовления, как правило, более дешевы по сравнению с неорганическими диэлектриками.

Старение на постоянном напряжении практически отсутствует, на переменном напряжении стареют за счет частичных разрядов, дендритов и водных триингов.

Наиболее распространенный в энергетике жидкий диэлектрик - это трансформаторное масло.

Трансформаторное масло - очищенная фракция нефти, получаемая при перегонке, кипящая при температуре от 300 °С до 400 °С. В зависимости от происхождения, нефти обладают различными свойствами, и эти отличительные свойства исходного сырья отражаются на свойствах масла. Оно имеет сложный углеводородный состав со средним весом молекул 220 - 340 а.е.

Изоляционное масло является также и теплопроводящей и защитной средой. При старении масло окисляется, что приводит к образованию органических кислот, растворимых в масле или создающих осадки (шлам).

Увлажнение снижает его электрическую прочность.

Термические воздействия приводят к крекингу.

Старение масла снижает надежность изоляционной конструкции, так как повышенная кислотность способствует старению твердой изоляции, а осаждение шлама увеличивает диэлектрические потери и ухудшает отвод теплоты.

Влага из масла, переходя в твердый диэлектрик, усиливает в нем процессы разрушения.

Наличие в масле пузырьков газа способствует развитию частичных разрядов.

Конечным результатом воздействия перечисленных факторов на изоляционную конструкцию является изменение структуры диэлектриков, их свойств, появление внутренних дефектов и продуктов разложения.

Прямые методы определения интенсивности перечисленных процессов, пригодные для эксплуатационных условий, отсутствуют. Применяются косвенные методы контроля.

Для этого используются параметры изоляции, значения которых определяются процессами, происходящими в диэлектриках (поляризация, абсорбция, ионизация, проводимость и т.п.).

К таким параметрам относятся комплексная проводимость изоляции, диэлектрические потери, емкость, интенсивность частичных разрядов.

Для диагностирования используются также зависимости этих параметров от температуры, приложенного напряжения, времени и т.п.

Из газообразных диэлектриков наибольшее применение нашел элегаз - шестифтористая сера SF₆. Свое название он получил от сокращения "электрический газ".

Электрическая прочность при атмосферном давлении и зазоре 1 см составляет $E = 89$ кВ/см.

Молекулярная масса составляет 146, характерным является очень большой коэффициент теплового расширения и высокая плотность. Это важно для энергетических установок, в которых проводится охлаждение каких-либо частей устройства, т.к. при большом коэффициенте теплового расширения легко образуется конвективный поток, уносящий тепло.

Элегаз химически инертен, нетоксичен, негорюч, термостоек (до 800 °С, взрывобезопасен, слабо разлагается в разрядах, имеет низкую температура сжижения.

В отсутствие примесей элегаз совершенно безвреден для человека.

Однако продукты разложения элегаза в результате действия разрядов (например, в разряднике выключателя) токсичны и химически активны. Комплекс свойств элегаза обеспечил достаточно широкое использование элегазовой изоляции.

В устройствах элегаз обычно используется под давлением в несколько атмосфер для большей компактности энергоустановок, т.к. электрическая прочность увеличивается с ростом давления.

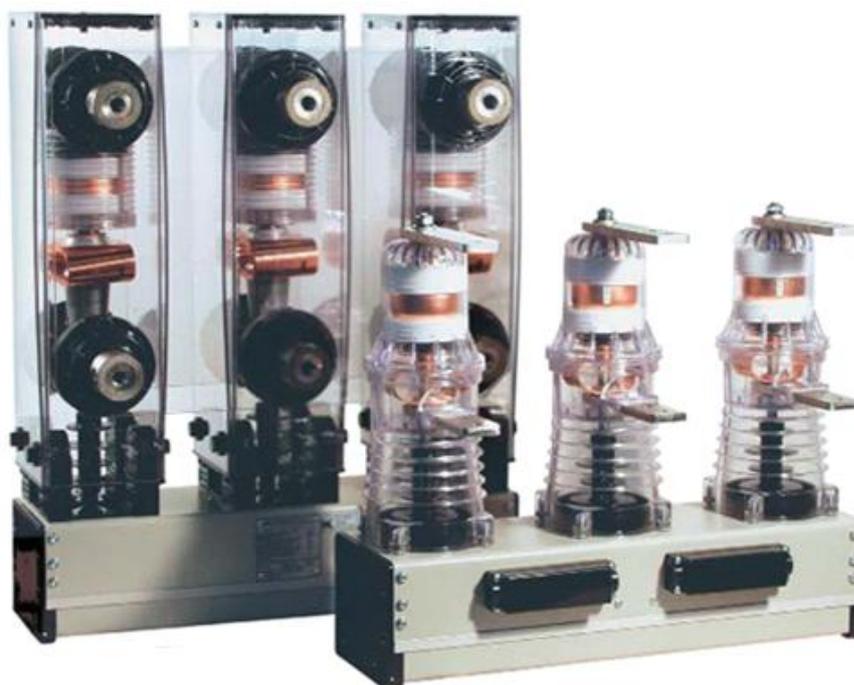


Рисунок – 8 Внешний вид вакуумного выключателя ВВ-Тел

В настоящее время на класс напряжения 6 - 10 кВ выпускаются, в основном, вакуумные выключатели (ВВ), широкое применение которых вызвано их умеренной стоимостью и высокими эксплуатационными качествами, прежде всего, большой коммутационной и механической износостойкостью, высокой надежностью и низкими эксплуатационными затратами.

Основные достоинства ВВ обусловлены дугогасительными свойствами вакуума, его высокой электрической прочностью (порядка 30 кВ/мм) и

принципом гашения дуги в вакууме, которые при контактном промежутке 6-8 мм обеспечивают соответствие выключателей 10 кВ требованиям ГОСТ 687.

Гашение дуги переменного тока осуществляется при разведении контактов в вакууме порядка 10 – 6 мм. рт. ст., так как электрическая прочность вакуумного промежутка достаточно высокая, отключение гарантировано происходит при зазорах более 1 мм, время горения дуги при этом минимальное.

6.1.2. Методы измерения диагностических параметров изоляционных материалов

Измерение диэлектрических потерь и емкости изоляции.

Применяют мостовой и неравновесно-компенсационный методы.

Диагностические параметры:

- при испытании отключенного оборудования - тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) и емкость изоляции;
- при контроле оборудования без вывода из работы - изменение комплексной проводимости, $\operatorname{tg} \delta$ и емкость изоляции.

Мостовой метод основан на сравнении параметров контролируемого объекта с параметрами элемента схемы, принятого в качестве образцового. При измерении $\operatorname{tg} \delta$ и емкости изоляции отключенного оборудования в качестве образцового используется конденсатор с пренебрежимо малыми диэлектрическими потерями.

При контроле оборудования под рабочим напряжением в ветви сравнения используется образцовый конденсатор, питаемый от ТН той системы шин, к которой подключен контролируемый объект.

Применяется также схема сравнения параметров двух аналогичных объектов, один из которых принимается в качестве образцового.

Ввиду наличия фазовых сдвигов в ветвях сравнения схем контроля под рабочим напряжением, измеренное значение $\operatorname{tg} \delta$ будет отличаться от действительного. Погрешность исключается тем, что в качестве диагностического параметра принимается изменение $\operatorname{tg} \delta$ во времени. В схеме

сравнения параметров двух объектов определяется разность $\Delta \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} (\delta_x - \delta_o) \approx \operatorname{tg} \delta_x - \operatorname{tg} \delta_o$.

При контроле отключенного объекта на месте его установки из результатов измерений необходимо исключить погрешность от токов влияний, вызванных рабочим напряжением на шинах и других объектах распределительного устройства. Для этого осуществляют два измерения, причем второе - при изменении на 180° фазы напряжения моста. Результат определяется по формулам

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta' R_3'' + \operatorname{tg} \delta'' R_3'}{R_3' + R_3''} = \frac{\operatorname{tg} \delta' C_x' + \operatorname{tg} \delta'' C_x''}{C_x' + C_x''};$$

$$C_x = (C_x' + C_x'')/2,$$

где $\operatorname{tg} \delta'$ и R_3' - результаты первого измерения;

$\operatorname{tg} \delta''$ и R_3'' - результаты второго измерения.

Неравновесно-компенсационный метод основан на измерении суммы трехфазной системы токов, протекающих через изоляцию трех фаз объекта контроля под действием рабочего напряжения. При равенстве токов фаз суммарный ток будет равен нулю. При увеличении комплексной проводимости изоляции одной из фаз увеличивается ток через нее и соответственно изменится суммарный ток. Ввиду малой вероятности одновременного и одинакового изменения диэлектрических характеристик всех трех фаз объекта метод обеспечивает возможность обнаружения изменения состояния изоляции любой из фаз. Относительное изменение тока $\gamma = \Delta I / I_0 = \Delta Y / Y_0$, где I_0 и Y_0 - соответственно ток через изоляцию и комплексная проводимость объекта без дефектов; ΔI и ΔY - изменения тока и проводимости, определяемые дефектами.

При раздельном измерении активной и реактивной составляющих вектора ΔI :

$$\gamma = \Delta I_a / I_0 \approx \Delta \operatorname{tg} \delta; \gamma_c = \Delta I_p / I_0 \approx \Delta C / C_0 \text{ (принято, что } \Delta \operatorname{tg} \delta < 1).$$

При измерении модуля тока ΔI

$$\gamma = \Delta I / I_0 \approx [(\Delta \operatorname{tg} \delta)^2 + (\Delta C / C_0)^2]^{1/2}.$$

Для эксплуатационных целей достаточно измерить модуль тока. При определении фазы объекта и характера дефекта применяется векторметр.

Уставка сигнализатора выбирается исходя из предельно допустимого значения контролируемого параметра.

Измерение сопротивления изоляции. Схема измерений состоит из последовательно соединенных контролируемого участка изоляции источника напряжения и прибора, измеряющего ток через изоляцию.

Диагностический параметр - сопротивление изоляции.

Измерительное устройство - мегаомметр, содержит источник напряжения постоянного тока U_0 и вольтметр V , на входе которого включен образцовый резистор R_0 .

Измеренное сопротивление $R_x = R_0((U/U_0) - 1) \approx R_0(U/U_0)$, так как обычно значением U_0 по сравнению с U можно пренебречь. Пределы измерения зависят от сопротивления резистора R_0 . Основным источником погрешности измерения является ток по поверхности изоляционной конструкции и через другие элементы, не подлежащие контролю. Для исключения поверхностных токов применяется экранирование - подача потенциала, равного потенциалу образцового резистора, на электрод, установленный по пути этих токов.

Возможности экранирования ограничиваются значением сопротивления R_3 части оборудования, находящейся между зажимами R_x и Э мегаомметра, который шунтирует образцовый резистор. Погрешность, вносимая этим сопротивлением $\Delta R_x / R_x = R_0 / R_3$.

Измерение абсорбционных характеристик. При приложении к изоляционной конструкции постоянного напряжения возникают кратковременный импульс тока заряда геометрической емкости, медленно затухающий ток заряда абсорбционной емкости и постоянный ток, определяемый проводимостью. Измерение в определенные моменты времени тока через изоляцию или накопленного заряда дает информацию о степени ее неоднородности. Измерение сопротивления изоляции определяется по результатам измерений мегаомметром через 15 и 60 с после подачи напряжения на объект.

Диагностический параметр - коэффициент абсорбции $K_a = R_{60}/R_{15}$.



Рисунок – 9 Прибор для измерения абсорбционных характеристик

Абсорбционная емкость изоляции определяется при циклах заряда и разряда объекта.

Диагностический параметр - отношение абсорбционной емкости к геометрической. Определяются значения $\Delta C / C_{50}$ и $(C_2 - C_{50}) / C_{50}$, где ΔC - абсорбционная емкость; C_{50} - геометрическая емкость (соответствует значению, измеренному при 50 Гц); C_2 - часть абсорбционной емкости (соответствует значению, измеренному при 2 Гц).

Дисперсия определяется путем заряда емкости объекта прямоугольным импульсом напряжения U_0 длительностью 3 мс и измерения U_B на нем через 300 мс, когда введенный заряд распределится между геометрической и абсорбционной емкостями изоляции. Диагностический параметр $D = U_B / (U_0 - U_B)$.

Измерение характеристик частичных разрядов (ЧР).

Измерение сигналов от частичных разрядов (ЧР) является одним из наиболее перспективных методов контроля состояния высоковольтной изоляции, который необходимо как можно шире внедрять в практику во всех высоковольтных лабораториях мира .

Измерение ЧР при испытаниях высоковольтного оборудования является основным методом контроля состояния изоляции. Однако для контроля

оборудования в условиях эксплуатации измерение ЧР пока применяется сравнительно редко.

Проблемы при измерении ЧР в реальных условиях эксплуатации связаны с различного рода помехами на работающих подстанциях. Наибольшее распространение получили электрические и акустические методы измерения ЧР.

Основной диагностический параметр при эксплуатационном контроле - кажущийся заряд частичного разряда.

Электрические методы обеспечивают определение значения контролируемого параметра.

Акустические методы используют для выявления наличия разрядов и локации их источника.

6.2. Контроль электроизоляционного масла

Физико-химические характеристики масла определяют работоспособность изоляционной конструкции и являются диагностическими параметрами.

Основные характеристики электроизоляционного масла и методы их определения:

- пробивное напряжение и $\text{tg } \delta$ (ГОСТ 6581);
- кислотное число (ГОСТ 5985);
- температура вспышки (ГОСТ 6356);
- содержание механических примесей (ГОСТ 6370);
- влагосодержание (ГОСТ 7822);
- газосодержание (извлечение газа в вакуумированном сосуде).

Процессы термического разложения изоляции и ее разрушения электрическими разрядами приводят к выделению газов, растворяющихся в масле.

Каждому виду дефекта соответствует характерный набор газов.

Диагностика изоляции по содержанию в масле газов заключается в определении типа дефекта (качественный контроль) и оценке степени его развития (количественный контроль).

Источниками информации являются состав растворенных газов, их концентрация и скорость ее изменения.

Анализ газов, растворенных в масле, может проводиться любым методом, обеспечивающим требуемую чувствительность. Наиболее широкое распространение получила газовая хроматография.

Особенностью контроля электрооборудования является необходимость предварительного извлечения газа из пробы масла. Отобранную пробу масла помещают в герметичный сосуд, вместимость которого превышает объем масла.

После того, как установится равновесная концентрация газов, из надмасляного пространства извлекается проба газа для анализа.

Ускорение газообмена обеспечивается повышением температуры до 60 — 100 °С и увеличением площади контакта между маслом и газовой средой в сосуде (барботаж через масло газа-носителя или воздуха из сосуда; предварительная вакуумировка объема сосуда).

Определение состава соединений металлов, находящихся в масле, может дать дополнительную информацию о характере дефекта.

Тепловизионная диагностика позволяет эффективно выявлять разложение бумажно-масляной изоляции обмоток высоковольтного оборудования.

6.3. Диагностика контактов и контактных соединений

Для оценки состояния контактов и контактных соединений масляных, элегазовых и вакуумных выключателей проводят стандартные испытания, в числе которых испытания, требующие применения специальных измерительных приборов и комплексов:

- измерение сопротивления постоянному току;

- измерение сопротивления токоведущего контура;
- измерение скоростных и временных характеристик;
- измерение хода подвижных частей, прижима контактов при включении, одновременности замыкания и размыкания контактов;
- тепловизионный контроль.

Тепловизоры позволяют сделать видимым тепловое излучение объектов, измерять температуру, записывать термограммы на компьютерные носители, что дает возможность производить анализ изображений и создавать отчеты контроля.

Для контроля контактных соединений широко используются измерители температуры в точке – пирометры, которые решают те же задачи, что и тепловизоры. Различие состоит в том, что работа с пирометром является более трудоемкой и продолжительней во времени.

Термографический контроль состояния контактных присоединений аппаратных зажимов, токосъемных устройств, соединений модулей, контактов дугогасительных камер выключателей позволяет выявить местоположение дефекта и оценить характер его развития. В большинстве конструкций воздушных выключателей дугогасительные контакты расположены в фарфоровых крышках, соединенных металлическим фланцем.

При нагреве контактов повышение температуры происходит на ближайших фланцах.

Характерными дефектами разъединителей являются дефекты контактной системы и опорно-стержневых изоляторов. Результаты термографических обследований показывают, что наиболее частыми причинами повышенного нагрева элементов контактной системы является окисление контактных поверхностей и ослабление сжимающих пружин. Дефекты такого рода обнаруживаются при обследовании практически всех объектов. Кроме того, частыми дефектами являются загрязнение и трещины в фарфоровых колонках опорно-стержневых изоляторов.

Избыточная температура на контактах – это основная масса неисправностей, обнаруживаемых при обследовании коммутационных аппаратов. Перегрев происходит из-за большого активного сопротивления контактного соединения.

Чаще всего выявляются дефекты на контакте губки-нож и разъединитель-шина у разъединителей и отделителей всех классов напряжений, на соединениях шин с токоведущими выводами вводов масляных выключателей и силовых трансформаторов, на соединениях с ВЧ-заградителями.

6.4. Технические средства диагностики коммутационных аппаратов

Промышленный микроомметр МИКО-1 предназначен для измерения переходного сопротивления контактов, в том числе контактов и контактных групп высоковольтных выключателей. Специально разработан для эксплуатации в условиях действия мощных помех промышленной частоты.

Прибор ПКСН-1 предназначен для контроля усилия нажатия в контактных группах коммутационных аппаратов.

Контроль усилия нажатия в ламельных контактах разъединителей 10 -750 кВ и ячеек КРУ 6-10 кВ осуществлялся до разработки этого прибора косвенным способом.



Рисунок 10 – Внешний вид прибора ПКСН-1

Основные параметры прибора:

- диапазон контролируемых усилий нажатия - 0... 100 кГс;
- основная относительная погрешность -1,5 %;
- дискретность контроля усилий нажатия - 0,1 кГс;
- вид представляемой информации о контролируемом усилии цифровой.

Прибор ПКСН-1 обеспечивает контроль силы нажатия в отдельной паре ламелей контактов врубного типа (контакт электрической цепи, образующийся введением плоской контакт-детали между двумя пружинящими контакт-детальями) отключенных разъединителей 10 - 750 кВ и ячеек КРУ 6 - 10 кВ.

Прибор ПКСН-1 состоит из контрольного щупа, блока измерения и соединительных кабелей. Контрольный щуп выполнен на основе тензорезисторного датчика. Блок измерения служит для обработки сигнала, поступающего с контрольного щупа, и цифровой индикации значения силы нормального контактного нажатия. Контроль и регулировку силы нажатия с помощью прибора может выполнять один человек.

Прибор выполнен переносным, пригодным к эксплуатации в условиях открытых распредустройств.

При проектировании прибора были предусмотрены меры по обеспечению его помехоустойчивости в условиях электромагнитных полей, присущих энергетическим объектам.

Прибор акустико-эмиссионной дефектоскопии опорно-стержневых изоляторов разъединителей 35 - 220 кВ ПАК-ЗМ предназначен для выявления опасных дефектов опорно-стержневых изоляторов и покрышек при монтаже и ремонтах, а также в эксплуатации на отключенных опорно-стержневых изоляторах, смонтированных в одноколонных разъединителях.

Метод акустической эмиссии позволяет выявлять в изоляторах усталостные повреждения.

Основные параметры прибора:

- период отсчета - 1с;
- максимальная сумма импульсов АЭ, регистрируемая на табло - 999.



Рисунок 11 – Внешний вид прибора ПАК-3М

Метод основан на регистрации акустических сигналов, генерируемых в материале с развивающейся трещиной, и определении по их параметрам количества и степени развития дефектов в изделии. Развитие опасной трещины, которая способна привести к излому изолятора, можно обнаружить с помощью эффекта Кайзера, который заключается в том, что при двукратном механическом нагружении, активность АЭ во втором цикле практически равна нулю в доброкачественном изделии и велика, если в нем имеется растущая трещина.

ПАК-3М - компактный, переносной двухканальный прибор индикаторного типа, позволяющий контролировать одновременно два изолятора полюсов разъединителя. Прибор улавливает сигналы АЭ, усиливает и обрабатывает их, и отображает на цифровом табло текущее значение активности АЭ. В результате проведения контроля прибор отображает АЭ характеристики изоляторов и индицирует результат контроля автоматически принимаемого решения о годности изоляторов к дальнейшей эксплуатации: "НОРМА" или "ДЕФЕКТ".

Контроль состояния опорно-стержневых изоляторов выполняется в следующей последовательности:

- заранее выбирается испытательная нагрузка, соответствующая 40% минимальной разрушающей нагрузки для данного типа изоляторов. При учете конкретных, менее напряженных условий эксплуатации изолятора, испытательная нагрузка может быть выбрана даже более малой.

- на верхних фланцах двух изоляторов полюса разъединителя укрепляют стяжное устройство прибора УКИ-1 (устройство контроля изоляторов), а на фарфоре изоляторов АЭ датчики прибора ПАК-3М.

- вращая ходовой винт стяжного устройства, действующее на изоляторы усилие, увеличивают до выбранного испытательного значения, выдерживают примерно 60 с, затем снижают нагрузку до испытательного значения. Достигнув его, активизируют прибор ПАК-3М, который при достигнутой постоянной испытательной нагрузке анализирует суммарную активность АЭ и принимает решение о годности изоляторов.

Прибор для контроля элегазовых выключателей GAS CHECK SF6

Предназначен для локализации места утечки в элегазовых выключателях и измерения объема утечки методом регистрации отрицательных ионов. Главное достоинство данного прибора - отсутствие радиоактивного источника и связанных с этим проблем регистрации, хранения и транспортировки. Прибор имеет блок памяти, а также выводит данные на печать. Датчик регистрации отрицательных ионов разработан специально для данного применения.



Рисунок 12 – Внешний вид прибора GAS CHECK SF6

Высокая чувствительность прибора не приводит к его поломке в случае больших утечек, перестройка с больших концентраций на маленькие происходит практически мгновенно, что обусловлено возможностью автоматически выключаться и включаться при указанных обстоятельствах.

Особенности прибора:

- Время отклика (нарастание и спад сигнала) 1 сек, обеспечивающие быстрое обнаружение утечки.
- Не требует длительного обучения.
- Активный экран.
- Управляется тремя клавишами.
- Возможность выбора единиц измерения: мл/сек, г/год и ppm.

Датчик регистрации отрицательных ионов разработан специально для данного применения. Используемая производителем технология «умного сенсора» позволяет автоматически распознавать датчик и его калибровку, а при его замене соответственно не требует дополнительного изменения параметров.

Прибор практически не нуждается в каком либо сервисе, что предотвращает потери времени. Высокая чувствительность прибора не приводит к его поломке в случае больших утечек, перестройка с больших концентраций на маленькие происходит практически мгновенно, что обусловлено возможностью «умного сенсора» автоматически выключаться и включаться при указанных обстоятельствах.

Таблица 2 - Технические характеристики

Принцип работы датчика	Регистрация отрицательных ионов
Чувствительность	10...7 мл/сек, 1 ppm, 0.2 г/год
Портативность	10 час автономной работы без перезарядки батарей
Режим ожидания	Выключается через 5 мин в случае неиспользования

Дисплей	Управление с экрана
Интерфейс принтера	Стандартный 9 штырьковый кабель, последовательный интерфейс
Габариты	интерфейс 340x350x170 мм
Вес прибора	10.4 кг
Вес датчика	563 г

Прибор контроля частичных разрядов в изоляции R - 400.

Измерительный прибор марки R - 400 является компактным устройством для периодического контроля состояния высоковольтной изоляции по частичным разрядам в условиях эксплуатации.

Он предназначен для регистрации ЧР при помощи емкостных, индуктивных или трансформаторных датчиков.

Конструктивно прибор рассчитан на использование в условиях полевых измерений.



Рисунок 13 – Внешний вид прибора R-400

Для регистрации частичных разрядов в приборе R-400 применяются высокочастотные трансформаторные датчики частичных разрядов, измеряющие импульсы, наведенные в цепях заземления оборудования. По этой причине R-400 имеет универсальное назначение и может быть применен для контроля технического состояния различного оборудования, например:

- Высоковольтной изоляции обмоток и вводов силовых трансформаторов.

- Для контроля изоляции высоковольтных измерительных трансформаторов тока.

- Для контроля изоляции обмоток статоров генераторов и электродвигателей.

- Для оценки технического состояния изоляции высоковольтных кабельных линий.

Для контроля дефектов в изоляции элегазовых выключателей и подстанций.

В качестве первичных датчиков в приборе R-400 используются высокочастотные импульсные трансформаторы «RFCT-5». Они позволяют регистрировать импульсы частичных разрядов в диапазоне частот $1,0 \div 15,0$ МГц. К входу прибора R-400 могут быть подключены и любые другие датчики частичных разрядов нашего производства, а также датчики производства других фирм, рассчитанные на работу с нагрузкой 50 Ом.

Вся зарегистрированная прибором информация об уровне и распределении частичных разрядов может быть просмотрена пользователем на месте на жидкокристаллическом экране и при необходимости сохранена в памяти прибора.

Измеритель параметров изоляции Вектор — 2.0 М представляет собой мост переменного тока, осуществляющий синхронное измерение электрических сигналов. Измеритель параметров изоляции предназначен для использования при контроле изоляционных характеристик электрооборудования под рабочим напряжением.

Прибор предназначен для измерения:

- емкости и тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции (вводов, изоляторов, трансформаторов, конденсаторов и др. объектов) а так же жидких диэлектриков с использованием внешней меры

емкости. Применяется как в лабораторных, так и в полевых условиях в соответствии с ГОСТ 25242-93;

- частоты;
- действующих значений первых гармоник переменных сигналов промышленной частоты (токов и напряжений);
- угла фазового сдвига между входными сигналами;
- разности тангенсов углов диэлектрических потерь и отношения емкостей высоковольтной изоляции под рабочим напряжением (контроль диэлектрических параметров по методу сравнения).



Рисунок 14 - Измеритель параметров изоляции Вектор — 2.0 М

Вектор-2.0 М оснащен встроенным вычислительным устройством, производящим математическую обработку результатов измерений. Благодаря этому прибор может использоваться для проведения следующих видов электромагнитных испытаний силовых трансформаторов согласно ГОСТ 3484.1-88:

- проверка коэффициента трансформации по методу двух вольтметров с автоматическим вычислением отношения напряжений на первичной и вторичной обмотках;
- проверки группы соединения обмоток с помощью фазометра с автоматическим определением группы соединения;

– измерения потерь короткого замыкания и потерь холостого хода с автоматическим вычислением активной, реактивной и полной мощности в режимах короткого замыкания и холостого хода испытываемого трансформатора;

– измерения сопротивления нулевой последовательности с автоматическим вычислением полного сопротивления, а также активной и реактивной составляющих.

Тепловизор testo 875-2i - универсальная измерительная камера с возможностью записи информации и последующей обработки ее на персональном компьютере. Обеспечивает мониторинг и обнаружение дефектов оборудования в энергетике. Основные технические характеристики тепловизора:

- дисплей - ж/к дисплей 3.5", 320 x 240 пикселей;
- температурный диапазон: - 20 до +100 °С, 0 +280 °С (переключаемый);
- погрешность: ± 2 °С $\pm 2\%$ от изм. значения;
- рабочая температура: -15 ... +40 °С;
- габариты - 153 x 108 x 262 мм.



Рисунок 15 – Внешний вид тепловизора testo 875-2i

Размер детектора 160 x 120 пикселей: благодаря разрешению в 19 200 температурных точек, объекты измерений будут представлены на снимках в очень хорошем качестве - четко и детализовано.

Технология SuperResolution (до 320 x 240 пикселей): технология SuperResolution повышает качество снимков на один класс, т.е. разрешение тепловых снимков увеличивается в 4 раза.

Температурная чувствительность < 80 мК: благодаря превосходной температурной чувствительности в < 80 мК на тепловых снимках будут отчетливо видны даже самые незначительные перепады температур.

Встроенная цифровая камера: сохранение реальных снимков параллельно с соответствующими термограммами.

Автоматическое распознавание горячей/холодной точек - функция автоматического распознавания горячей/холодной точек позволяет визуализировать критические температуры непосредственно на снимке.

Режим измерения "Солнечная энергия": данный режим позволяет ввести в тепловизор значение интенсивности солнечного излучения для каждого отдельного замера. Введенные данные сохраняются с соответствующими термограммами.

Специальный режим измерения для локализации участков, подверженных риску образования плесени: путем ручного ввода параметров окружающей среды - температуры и влажности воздуха, а также поверхностной температуры - тепловизор рассчитывает значение влажности для каждой точки измерения и визуализирует полученные данные посредством термограммы.

7. Диагностика кабельных линий

7.1. Методы диагностики кабельных линий

Кабельные линии непосредственно после их сооружения и в процессе эксплуатации подвергаются разнообразным испытаниям, с помощью которых выявляются ослабленные места или дефекты в изоляции и защитных оболочках

кабелей, соединительной и концевой арматуры и других элементах кабельных линий.

Причины возникновения таких ослабленных мест различны. Они могут возникать при изготовлении кабеля и арматуры на заводе из-за конструктивных недостатков кабеля и арматуры, при небрежной прокладке кабельных линий, при некачественном выполнении монтажных работ. Ослабленные места выявляются в процессе эксплуатации КЛ, так как со временем наблюдается старение изоляции кабелей и коррозия их металлических оболочек.

Кабельные линии, проложенные в земляной траншее, несмотря на дополнительную защиту в виде покрытия кирпичом и систематическое наблюдение за состоянием трассы, подвержены внешним механическим повреждениям, которые могут возникать при прокладке и ремонте других подземных сооружений, проходящих по трассе КЛ. За исключением прямых механических повреждений, ослабленные места и дефекты КЛ имеют скрытый характер.

Своевременно не выявленные испытаниями, они могут с той или иной скоростью развиваться под воздействием рабочего напряжения. При этом возможно полное разрушение элементов КЛ в ослабленном месте с переходом линии в режим короткого замыкания, что влечет нарушение электроснабжения потребителей.

Полный перечень испытаний КЛ в зависимости от напряжения и назначения регламентируется "Нормами испытания электрооборудования".

Для испытания кабельных линий повышенным напряжением применяют выпрямленное напряжение от передвижных испытательных установок.

Параметры испытательных установок зависят от тока утечки и изоляции КЛ, в то время как при использовании повышенного переменного напряжения параметры установок определяются емкостью линий, которая для КЛ значительна. При этом выпрямленное напряжение, по сравнению с таким же по величине переменным напряжением, оказывает малое воздействие на неповрежденную изоляцию кабельных линий.

Испытание выпрямленным напряжением выявляет не все ослабленные места изоляции КЛ.

В частности, *не выявляются*: электрическое старение изоляции; осушение изоляции из-за перемещения или стекания пропиточного состава; высыхания изоляции из-за тяжелого теплового режима работы кабельных линий.

Испытания повышенным напряжением являются разрушающими, так как при приложении испытательного напряжения изоляция КЛ в месте дефекта доводится до полного разрушения (пробоя). После пробоя необходим ремонт линии в том или ином объеме. Для линий напряжением до 1 кВ вместо испытания повышенным напряжением допускается проверка их мегомметром напряжением 2500 В.

При испытаниях повышенным напряжением необходимо учитывать характер изменения токов утечки, которые для КЛ с удовлетворительной изоляцией, как правило, довольно стабильны. Для кабелей с бумажной изоляцией напряжением до 10 кВ ток утечки находится в пределах 300 мкА, для кабелей 35 кВ около 800 мкА. При этом абсолютное значение тока утечки не является браковочным показателем.

До и после испытания линии повышенным напряжением производится измерение сопротивления изоляции линии с помощью мегаомметра. При этом сопротивление изоляции КЛ до 1 кВ должно быть не ниже 0,5 МОм. Для линий других напряжений сопротивление изоляции не нормируется.

Проверка мегаомметром позволяет также выявить серьезные повреждения КЛ, в частности, заземление и обрыв жил, замыкания между жилами и т.п.

Профилактические испытания (ПИ) делятся на плановые и внеплановые.

Профилактические испытания кабельных линий 6-35 кВ должны производиться не реже одного раза в три года. Линии, имеющие по опыту эксплуатации недостаточно удовлетворительное состояние изоляции или работающие в неблагоприятных условиях (частные земляные раскопки на

трассе линий, активная коррозия и т.п.), рекомендуется подвергать более частым испытаниям.

Внеочередные испытания назначаются после производства земляных работ на трассе, ее перекладки или капитального ремонта, при наличии осадки или размыва фунта на трассе и т.п.

Профилактические испытания КЛ могут производиться **двумя методами**:

- с выводом из работы линий и их всесторонним отключением на время проведения испытания;

- без вывода из работы линий с наложением испытательного напряжения на участок сети, находящейся под рабочим напряжением и под нагрузкой нормального режима (испытания "под нагрузкой").

После пробоя КЛ по причине отказа или в результате испытания, за исключением прямых механических повреждений, возникает необходимость в определении места повреждения линии.

В настоящее время имеются совершенные методы, с помощью которых место повреждения, как правило, устанавливается с достаточной точностью и в ограниченное время.

Каждый метод имеет свою область использования, которая определяется характером повреждения КЛ и, в том числе, переходным сопротивлением, возникающим в месте повреждения.

В связи с этим перед определением места повреждения необходимо определить характер повреждения, а также произвести, при необходимости, прожигание кабеля с целью снижения переходного сопротивления в месте повреждения его изоляции до требуемого уровня.

Повреждения КЛ имеют различный характер:

- повреждение изоляции с замыканием одной жилы на землю;
- повреждение изоляции с замыканием двух или трех жил на землю, двух или трех жил между собой в одном или в разных местах;
- обрыв одной, двух или трех жил с заземлением и без заземления жил;
- заплывающий пробой изоляции;

- сложные повреждения, содержащие указанные виды повреждений.

Наиболее распространенный случай - это повреждение между жилой и оболочкой кабеля, т.е. однофазные повреждения, особенно для кабелей с жилами в самостоятельных оболочках.

Все измерения на КЛ производятся с их полным отключением и выполнением необходимых мер техники безопасности.

Как правило, определение характера повреждения производится с помощью мегаомметра на 2500 В, которым измеряется сопротивление изоляции каждой жилы по отношению к земле и сопротивление изоляции между жилами.

Целостность жил проверяется с обоих концов линии путем поочередной установки закоротки на концах линии.

При определении характера сложного повреждения используются измерители неоднородностей кабельных линий, а при необходимости характер уточняется с помощью поочередного испытания выпрямленным напряжением изоляции каждой жилы по отношению к оболочке и между жилами.

В соответствии с установившейся практикой, место повреждения определяют в два приема: сначала определяют зоны повреждения кабельной линии, затем уточняется место повреждения в пределах зоны.

На первом этапе определение места повреждения производится с конца линии, на втором этапе — непосредственно на трассе линии.

В связи с этим методы соответственно разделяются на *дистанционные* (относительные) и *топографические* (абсолютные).

К дистанционным методам относятся: импульсный, колебательного разряда и мостовой, а к топографическим — индукционный, акустический и метод накладной рамки.

При *импульсном методе* в КЛ посылается так называемый зондирующий электрический импульс и измеряется время между моментом посылки зондирующего импульса и моментом прихода импульса, отраженного от места повреждения. При этом учитывается, что скорость распространения

электромагнитных колебаний в КЛ с бумажной изоляцией находится в пределах 160 м/мкс .

Прибор присоединяется к одному концу линии (схема присоединения выбирается в зависимости от характера повреждения).

Импульсный метод может быть применен в КЛ любых конструкций при однофазных и многофазных повреждениях устойчивого характера и при сложных повреждениях.

Метод колебательного разряда базируется на измерении периода (полупериода) собственных электрических колебаний, которые возникают в КЛ в момент ее пробоя, т.е. при разряде электрической дуги в месте повреждения.

Для определения места повреждения по данному методу линию необходимо доводить до пробоя в момент измерений, что достигается подачей на линию повышенного напряжения (ниже испытательного).

Метод предназначен для определения места повреждения кабельных линии при наличии «заплывающего» пробоя или в тех случаях, когда в месте повреждения отмечаются электрические разряды.

«Заплывающий» пробой характеризуется следующими друг за другом пробоями с разными промежутками времени под воздействием повышенного напряжения.

При снижении напряжения пробои прекращаются. В некоторых случаях поврежденная линия начинает выдерживать более высокое напряжение, вплоть до испытательного, т.е. изоляция линии временно восстанавливается. Это наблюдается преимущественно в муфтах.

В процессе определения места повреждения напряжение установки поднимается до пробивного, в момент пробоя прибор производит измерение.

При определении места однофазного повреждения целые жилы КЛ должны быть изолированы.

При повреждении между жилами напряжение испытательной установки подается на одну жилу, а две других заземляются через сопротивление более 1000 Ом .

Мостовой метод предусматривает использование измерительных мостов постоянного или переменного тока.

Для измерения расстояния до мест повреждения собирается мостовая схема из регулируемых резисторов измерительного моста, поврежденной и здоровой жил, соединенных накоротко с противоположного конца линии.

При определении места повреждения путем изменения R_1 и R_2 добиваются равновесия моста. Расстояние до места повреждения определяется как $l_x = 2LR_1/(R_1 + R_2)$

где L - длина линии; R_1 и R_2 - сопротивление резисторов, присоединенных к поврежденной и неповрежденной жилам соответственно.

При применении мостового метода необходимо иметь одну неповрежденную жилу или жилу с переходным сопротивлением, не менее чем в 100 раз большим переходного сопротивления других жил.

Методом надежно определяются однофазные и многофазные повреждения устойчивого характера.

При обрывах жил определение места повреждения производится путем измерения емкости линии при помощи мости переменного тока.

Как правило, применяется универсальный кабельный мост, который допускает измерение на постоянном и переменном токе.

Индукционный метод относится к топографическим методам и основан на принципе прослушивания с поверхности земли звука, который создается электромагнитными колебаниями при прохождении по жилам КЛ тока звуковой частоты (800 -1200 Гц).

С этой целью генератор звуковой частоты присоединяется к двум жилам кабельной линии. Для прослушивания звука используются специальная приемная рамка с усилителем (кабелеискатель) и телефонные наушники.

При движении оператора с кабелеискателем по трассе звук в наушниках будет периодически изменяться из-за наличия скрутки жил. Кроме того, звук будет усиливаться над соединительной муфтой, изменяться в зависимости от изменения глубины прокладки линии, наличия труб и т.п.

Только над местом повреждения будет отмечаться резкое возрастание звука с последующим его затуханием на расстоянии 0,5-1,0 м от повреждения.

С помощью индукционного метода определяются двух- и трехфазные повреждения устойчивого характера при значении переходного сопротивления не более 20 - 25 Ом.

Применяются генераторы звуковой частоты и кабелеискатели различного схемного и конструктивного исполнения.

С целью увеличения чувствительности метода и исключения индустриальных помех (соседние кабели, электрифицированный транспорт и т.п.), увеличивают частоту генератора до 10 кГц, применяют кабелеискатели с высокоизбирательными антеннами и используют настроенные рамки.

Индукционный метод широко используется для определения трассы кабеля и глубины его залегания в земляной траншее.

С этой целью первый вывод генератора присоединяется к жиле, противоположный ее конец и второй вывод генератора заземляется.

Ток генератора в зависимости от величины помех и глубины залегания кабеля устанавливается до 15 - 20 А.

При горизонтальном расположении приемной рамки кабелеискателя максимальный звук в наушниках будет соответствовать положению над кабелем.

При вертикальном расположении рамки над кабелем звук будет исчезать, при перемещении рамки в одну и другую сторону от кабеля звук сначала возрастает, а затем медленно убывает.

В результате прослушивания звука над трассой устанавливается ее точное наложение. Для определения глубины залегания кабеля приемную рамку кабелеискателя устанавливают под углом 45° к вертикальной плоскости, проходящей через кабель.

Рамку отводят от линии расположения кабеля до того момента, когда пропадет звук в наушниках. Расстояние между линией трассы и положением рамки будет соответствовать глубине прокладки кабеля.

Метод используется также для определения положения соединительных муфт на трассе. В таком случае генератор включают по схеме двухпроводного питания, т.е. выводы генератора присоединяются к двум жилам линии, последние с другого конца соединяются накоротко. Над муфтами будет прослушиваться резкое усиление звука

Метод накладной рамки является разновидностью индукционного метода.

При этом вместо приемной рамки к кабелеискателю присоединяется так называемая накладная рамка, выполненная в виде металлической обоймы, внутри которой расположена измерительная катушка.

Накладная рамка вращается оператором вокруг поврежденного кабеля при включенном генераторе звуковой частоты. Звук в наушниках до места повреждения будет дважды изменяться, достигая максимума и минимума, над местом повреждения в наушниках будет прослушиваться монотонное звучание.

Метод накладной рамки применяется на открыто проложенных КЛ, при замыкании одной жилы на оболочку и при повреждении изоляции двух или трех жил с большим переходным сопротивлением.

При применении метода для линий, проложенных в земле, производится вскрытие трассы с помощью шурфов.

Акустический метод основан на прослушивании над местом повреждения звуковых колебаний, возникающих в месте повреждения по причине искрового разряда от электрических импульсов, посылаемых в кабельную линию.

В качестве источника импульсов служит испытательная установка.

Схема определения места повреждения зависит от вида повреждения КЛ. Если произошел «заплывающий» пробой, то источником импульсов служит испытательная установка, напряжение которой поднимается до пробоя в месте повреждения.

При устойчивых замыканиях в месте повреждения для образования импульса используется испытательная установка, разрядник и накопительная

(зарядная) емкость или емкость неповрежденных жил. В этом случае одновременно с разрядником происходит разряд в месте повреждения КЛ.

В процессе определения места повреждения звук разряда периодически посылаемых импульсов прослушивается в месте повреждения оператором с помощью стетоскопа или кабелеискателя с пьезодатчиком, который преобразует механические колебания возникающие в грунте при разряде импульса, в электрические. Максимальный звук соответствует месту повреждения. Метод используется при «заплывающих» пробоях, одно- и многофазных повреждениях устойчивого характера (но не металлических замыканий), при обрывах жил с заземлением в месте повреждения. Современные кабелеискатели являются акустико-индукционными и могут использоваться для акустического и индукционного методов измерения.

Определенные трудности, возникающие при дистанционном и топографическом методах определения места повреждения, возникают при однофазных замыканиях на землю.

В частности, импульсный метод дает надежные результаты только при малом значении переходного сопротивления в месте повреждения.

По этой причине были разработаны новые прибор, принцип работы которых базируется на импульсной локации во время горения дуги.

В результате область использования импульсного метода значительно расширилась. В частности, с его помощью можно определять дефект кабельной линии при увлажненной изоляции и даже «заплывающий» пробой.

При однофазных повреждениях КЛ (при металлическом замыкании на землю) акустический метод непригоден.

Индукционный метод в таких случаях также не всегда эффективен. Только применение накладной рамки с соответствующим шурфованием на трассе кабельной линии обеспечивает определение места повреждения с необходимой точностью.

Применение индукционного метода при наличии переходного сопротивления в месте однофазного повреждения вообще исключено, так как

невозможно устранить электромагнитное поле помех, которое создается током звуковой частоты, стекающим с оболочки кабеля в землю.

По этим причинам средства поиска однофазных повреждений необходимо совершенствовать.

Можно отметить индукционно-фазовый способ, который базируется на контроле фазового сдвига тока, протекающего по поврежденной жиле кабельной линии.

С этой целью в целую и поврежденную жилы линии посылают токи кратной частоты, например 1 и 10 кГц, которые создаются генераторным комплексом.

Контроль производится индукционным методом с помощью усовершенствованного приемно-передающего переносного устройства.

Место повреждения определяется по изменению фазового угла тока на месте дефекта кабельной линии.

Для диагностирования кабелей с пластмассовым покрытием применяются потенциальные методы, которые предусматривают измерение разности потенциалов на поверхности земли, создаваемой током растекания в месте повреждения.

В основу одного из таких способов положено сравнение двух сигналов звуковой частоты, создаваемых током в оболочке кабеля и током растекания в земле.

Генератор присоединяется к оболочке кабеля и к земле.

Приемная аппаратура содержит индукционный датчик, усилители обоих сигналов, потенциальные зонды и схему сравнения фазы сигналов и индикатор.

Место повреждения устанавливается на трассе линии по нулевому показанию индикатора.

7.2. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей

В условиях эксплуатации происходит старение кабелей и, в первую очередь, их электрической изоляции.

Ресурс электрической изоляции определяет фактическую наработку кабеля, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента нагрузки.

У многих кабельных линий (КЛ) истек срок службы, но они продолжают работать, так как они не выработали своего ресурса. Поэтому на практике необходимо знать наработку кабеля и его остаточный ресурс.

В настоящее время ведутся исследования, направленные на поиски неразрушающих методов испытаний, во время которых кабели не подвергаются старению и не выходят из строя, а результаты диагностики дают информацию о наработке и остаточном ресурсе. Ниже приведены некоторые из них.

Метод отклика напряжения в изоляции кабеля. По этому методу измеряются зависимости напряжения саморазряда $U_d(t)$ - спадающего напряжения и восстанавливающегося напряжения $U_r(t)$ (рисунок 16 а, б).

Напряжение $U_d(t)$ измеряется после длительного "заряда" изоляции кабеля, т.е. после возбуждения поляризационных процессов полей постоянного напряжения $U_0 = 1 \text{ кВ}$ за период $t_c = 60 \text{ мин}$.

Восстанавливающееся напряжение $U_d(t)$ измеряется после «заряда» постоянным напряжением $U_0 = 1 \text{ кВ}$ за период $t_c = 60 \text{ мин}$. Затем следует отключение от источника напряжения, закорачивание на $t_{dc} = 3 - 5 \text{ с}$ и снятие напряжения $U_r(t)$. Снимать зависимости $U_d(t)$ и $U_r(t)$ необходимо через 1, 10, 15 с и 60 мин. Первоначальные участки зависимостей $U_d(t)$ и $U_r(t)$ и наклоны касательных S_d и S_r , можно использовать как параметры, характеризующие состояние изоляции кабелей, так как имеем

$$S_d = \frac{\gamma E}{\varepsilon_0};$$

$$S_r = \frac{\beta E}{\varepsilon_0}$$

где γ - удельная электропроводность изоляции кабеля;

β - величина интенсивности поляризации.

$$\beta = \sum_{k=1}^n \alpha_k / T_k$$

где β - прямо пропорционально интенсивностям α элементарных поляризационных процессов с постоянными времени $T_1 \dots T_n$, которые определяются измеренными параметрами t_c и временем разряда. Этот метод не зависит от размеров и форм образцов, т.е. параметры являются "удельными".

Количественной характеристикой являются первоначальные наклоны касательных S_d (прямо пропорционально проводимости) и S_r (прямо пропорционально интенсивности поляризации). По величинам параметров можно определить, степени увлажнения (S_d) и старения (S_r).

Параметр S_d является более характерным для диагностики кабелей с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката (ПВХП), т.к. при деградации молекул выделяется водород и хлор, которые взаимодействуют между собой, образуя HCl. При увлажнении изоляции HCl растворяется в воде, существенно увеличивая электропроводность изоляции и ее старение.

Параметр S_r , является более характерным для диагностики кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ), т.к. термическое старение изоляции увеличивает интенсивность поляризации.

Параметры S_d и S_r характеризуют ресурс (наработку) изоляции, а не срок службы. При накоплении опыта проведения испытаний этим методом и правильной трактовке полученных результатов можно предсказать остаточный ресурс кабельных линий.

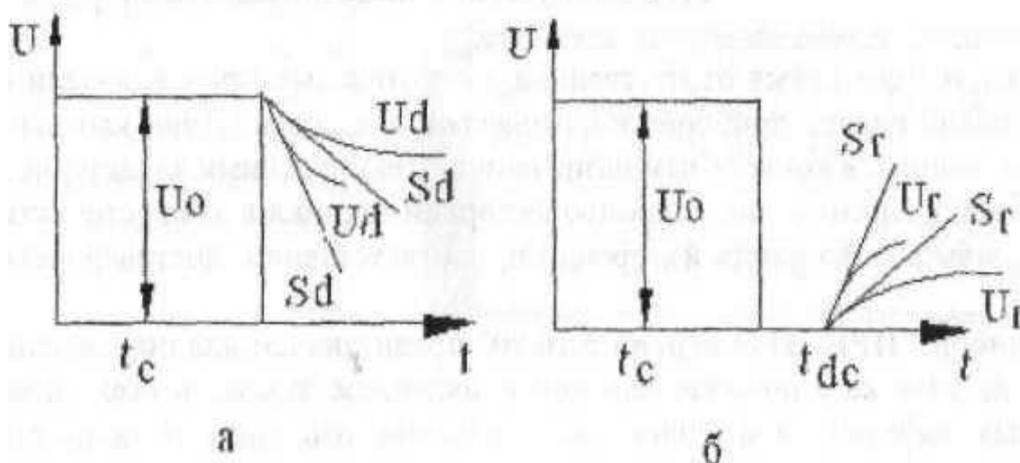


Рисунок 16 - Изменение напряжения саморазряда

а) спадающее напряжение U_d ; б) восстанавливающееся напряжение U_r .

Метод оценки ресурса кабелей с полиэтиленовой изоляцией.

Данный метод основан на определении корреляционной зависимости между характеристиками изоляции кабеля и характеристиками, прямо связанными с ресурсом кабелей.

Основной причиной выхода из строя кабелей с полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией, находящихся под длительным воздействием повышенных температур и механических нагрузок (термомеханическое старение) при рабочих напряжениях, является растрескивание оболочек и изоляции кабелей.

Стойкость к растрескиванию количественно определяется температурой холодостойкости T_x .

Разными исследователями было установлено, что уменьшение ресурса кабелей с ПЭ изоляцией в условиях эксплуатации обусловлено структурными изменениями в процессе термического старения, при этом температура T_x ПЭ изоляции повышается.

Тепловое движение структурных элементов в полимерах и подвижность обуславливает релаксационные переходы, которые изучаются методами релаксационной спектроскопии.

Спектры механических потерь отражают те же процессы молекулярного движения, что и диэлектрические потери.

По мере старения в области α -релаксации происходит увеличение тангенса угла электрических потерь $\text{tg}\delta_m$ в максимуме температурной и частотной зависимости и, что самое главное, происходит смещение местоположения максимума $\text{tg}\delta_m$ на температурных зависимостях в область более высоких температур ΔT_m примерно на 35°C от исходного состояния до полного расходования ресурса, а частотных характеристиках - в область низких частот Δf_m примерно на 750 Гц .

Отклонение местоположения $\text{tg}\delta_m$ от исходного состояния ΔT_m или Δf_m является количественной мерой оценки процесса старения.

Данный метод неразрушающего определения ресурса может быть применен и для других видов изоляции.

7.3. Технические средства диагностики кабельных линий

В настоящее время отечественные и зарубежные производители выпускают широкий спектр приборов и комплексов для диагностики кабельных линий, отличающихся конкретным назначением, техническими характеристиками и стоимостью. Применение микропроцессорной техники в этих устройствах позволило повысить точность измерений и, соответственно, достоверность диагноза.

Прибор "ИРК-ПРО 7.4" предназначен для определения расстояния до участка с пониженным сопротивлением изоляции всех типов симметричных кабелей, измерения сопротивления изоляции и сопротивления шлейфа, омической асимметрии, измерения электрической емкости кабеля (рис. 17), определения расстояния до участка с пониженным сопротивлением изоляции кабеля; определения места обрыва или перепутывания жил кабеля; измерения сопротивления изоляции, шлейфа, омической асимметрии, электрической емкости всех типов кабелей связи.

У прибора два уровня испытательного напряжения: 400 В для открытия любых дефектов и пониженное 180 В для работы с импортным оборудованием.



Рисунок 17 – Внешний вид прибора ИРК-ПРО

В приборе используется микропроцессорное управление, расчет производится автоматически. В память прибора занесены параметры большинства используемых электрических кабелей. Результаты выводятся на многострочный алфавитно-цифровой дисплей.

Технические характеристики:

- определение расстояния до дефектного участка с сопротивлением изоляции от 0 до 20 МОм с точностью до 1 м;
- прямые показания расстояния в метрах до 60 км;
- определение расстояния при одновременном повреждении всех жил кабеля;
- измерение сопротивления шлейфа до 10 кОм с точностью до 0,1 Ом, определение омической асимметрии. Прибор может рассчитать по шлейфу длину кабеля любой марки;
- измерение электрической емкости кабеля. По измеренной емкости прибор рассчитывает расстояние до обрыва жилы кабеля.

Диапазоны измеряемых параметров:

- переходное сопротивление - 0 - 20 Мом,
- сопротивление шлейфа - 0 - 10 кОм;
- сопротивление изоляции - 1 кОм - 30 000 МОм;
- электрическая емкость - 1 - 2000 нФ;

- испытательное напряжение - не менее 350 В.

Портативный кабельный мост ПКМ-105 предназначен для измерения параметров кабельных линий и определения мест повреждения телекоммуникационных кабелей методами постоянного и переменного тока.

Микропроцессорный прибор ПКМ-105 реализует мостовые методы измерения сопротивления шлейфа, оммической асимметрии, емкости кабеля, сопротивления изоляции и расстояния до обрыва или места понижения изоляции кабельной линии.

Прибор ПКМ-105 позволяет:

- измерить сопротивление шлейфа;

- измерить оммическую асимметрию;

- измерить емкость линии;

- измерить сопротивление изоляции;

- определить расстояние до места повреждения (понижения изоляции);

- определить расстояние до места обрыва;

- сохранить измеренные параметры кабельных линий во встроенном запоминающем устройстве и на компьютере;

Области применения:

1. Прокладка кабельных линий .
2. Поиск мест повреждений в кабельных линиях мостовым методом.
3. Паспортизация кабельных линий всех типов.

- сравнить параметры кабельной линии с ранее измеренными.



Рисунок 17 – Внешний вид прибора ПКМ-105

4. Эксплуатация кабельных линий сельских, городских и междугородних телефонных станций.

5. Эксплуатация кабельных линий связи во всех отраслях народного хозяйства.

6. Кабельное телевидение и компьютерные сети.

7. Эксплуатация линий связи промышленных предприятий и учреждений, железных дорог, нефтепроводов, электростанций, судов и самолетов.

8. Производство и торговля кабелями

Поисковые комплекты КП-100, КП-100С, КП-100У, КП-100К, КП-500, КП-500А, КП-500Б



Рисунок 17 – Внешний вид поисковых комплектов КП

Назначение:

- для точного определения мест повреждений подземных кабелей индукционным (ИМ) и акустическим (АМ) методами;

- для поиска трассы и определения глубины залегания подземных кабельных линий и коммуникаций при работе в активном режиме (с применением генератора);

- для поиска трассы и определения глубины залегания подземных кабелей, находящихся под напряжением частотой 50 Гц при работе в пассивном режиме (без применения генератора).

Все комплекты работают индукционным и акустическим методами и имеют режим пассивного поиска трассы (ПТ). Комплекты могут использоваться для поиска повреждений кабелей на расстояниях до 20 км (КП-100), 50 км (КП-500) и на глубине залегания подземных кабельных линий и коммуникаций до 11 м. Точность определения повреждений до 0,1 м.

Генераторы поисковые ГП-100 и ГП-100У предназначены для работы в полевых условиях с питанием постоянным напряжением 12 В, в том числе от автомобильного аккумулятора. ГП-500А имеет режим автоматического согласования мощности с нагрузкой, что позволяет получать близкую к максимальной мощность во всем диапазоне нагрузок.

Оценка уровня сигнала производится по громкости в телефонах и стрелочному индикатору. В приемнике поисковом ПП-500 предусмотрены режим "высокой разборчивости" при ПТ, режим с шумоподавлением при ИМ и режим блокировки питания (БП). Переход в режим БП происходит автоматически, при уменьшении напряжения питания на 5%, что предотвращает недопустимый разряд аккумулятора (АБ). Контроль состояния АБ осуществляется по стрелочному индикатору и по световой индикации режима БП. Заряд АБ осуществляется от внешнего зарядного устройства (без извлечения АБ из приёмника).

Рефлектометр цифровой РЕЙС-205 (с измерительным мостом)

Назначение:

- Рефлектометр цифровой РЕЙС-205 с измерительным мостом разработан специально для определения всех видов повреждений кабельных линий связи и других типов кабельных линий.

- РЕЙС-205 это измерительная система, которая представляет собой совокупность двух приборов в одном корпусе: самый совершенный российский импульсный рефлектометр и кабельный измерительный мост.

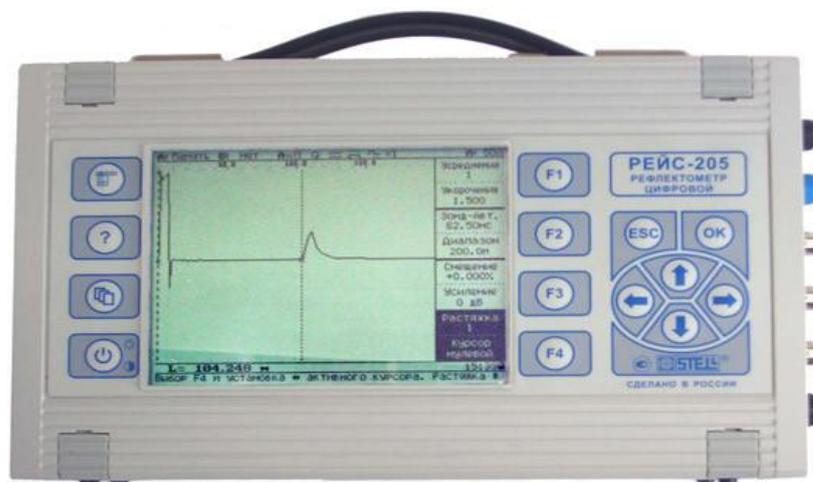


Рисунок 18 – Внешний вид прибора Рейс-205

Возможности рефлектометра цифрового РЕЙС-205:

1. Измерения кабельной линии с целью локализации места повреждения:

- обнаружение и точное определение расстояния до места любого повреждения (короткое замыкание, обрыв, низкоомные утечки, высокоомные утечки, понижение изоляции) кабельных линий связи, силовых кабельных линий и любых других кабельных линий локационным методом (методом импульсной рефлектометрии), мостовым методом, волновым методом и методом кратковременной дуги;
- паспортизация кабельных линий с созданием и сохранением в энергонезависимой встроенной памяти и на компьютере базы данных (паспортов) по рефлектограммам и параметрам обслуживаемых линий;
- диагностика состояния кабельной линии за счет сравнения рефлектограмм, сопротивления изоляции и других параметров кабельной линии с ранее измеренными значениями (паспортными данными);
- измерение длины линии (в том числе длины кабеля на бухте или барабане);

- измерение коэффициентов укорочений и запись их в энергонезависимую память;

- определение волнового сопротивления линии.

2. Серийные и приемочные измерения кабельных линий

- измерение сопротивления изоляции;

- измерение сопротивления шлейфа (петли);

- измерение омической асимметрии (разности сопротивлений жил);

- измерение емкости линии;

- сохранение измеренных параметров кабельных линий во встроенном запоминающем устройстве и на компьютере.

Используемые методы измерения:

- В рефлектометре РЕЙС-205 наряду с традиционным *методом импульсной рефлектометрии*, при котором надежно и точно определяется длина линии, расстояние до мест короткого замыкания, обрыва, низкоомной утечки и продольного увеличения сопротивления (например, в местах скрутки жил и т.п.), дополнительно реализуется мостовой метод измерения.

- *Мостовой метод измерения* - позволяет с высокой точностью измерять сопротивление шлейфа, омическую асимметрию, емкость линии, сопротивление изоляции, определить расстояние до места высокоомного повреждения (понижения изоляции) или обрыва линии.

- Использование мостового метода особенно важно при измерениях кабелей связи и при паспортизации кабельных линий.

Рефлектометр высоковольтный Искра-3

Рефлектометр высоковольтный осциллографический "Искра-3" предназначен для определения расстояния до места повреждения кабелей связи и кабелей электроснабжения.

Рефлектометр высоковольтный осциллографический "Искра-3" предназначен для определения расстояния до места повреждения кабелей связи и кабелей электроснабжения.



Рисунок 19 – Внешний вид прибора Искра -3

Высоковольтный рефлектометрический комплекс "Искра-3" позволяет:

-обнаружить и определить расстояние до места повреждения или неоднородности локационным (рефлектометрическим) методом на симметричных и несимметричных кабелях;

-измерять длину кабелей (в том числе на барабанах и в бухтах) или расстояние до места обрыва или короткого замыкания;

-запоминать, хранить и обрабатывать результаты измерений;

-в составе передвижной электролаборатории определять расстояние до повреждения в кабелях длиной до 12 км при всех видах повреждений без использования предварительного полного прожига изоляции.

Аппарат для испытания кабеля из сшитого полиэтилена АВ-60-01

Аппарат высоковольтный для испытания кабеля из сшитого полиэтилена АВ-60-0,1.

Предназначен для испытания силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена длиной от 0,2 до 3 км переменным напряжением частотой 0,1 Гц.



Рисунок 20 – Внешний вид аппарата АВ-60-01

Применяется в качестве приставки к высоковольтным испытательным установкам. В качестве дополнительного внешнего источника высокого напряжения используется аппарат АВ-50/70, АИД-70, блок высоковольтных испытаний БВИ-60/50, входящий в состав электролаборатории, либо иной аналогичный.

8. Методы диагностики воздушных линий

8.1. Общие положения

Воздушная линия электропередачи (ВЛ) - устройство для передачи и распределения электрической энергии по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленным к опорам или кронштейнам и стойкам на инженерных сооружениях при помощи изоляторов и арматуры. Ответвления к вводам в здания относятся к ВЛ.

Диагностика изоляторов. Важное место в обеспечении надежной эксплуатации устройств электроснабжения занимает современная и качественная диагностика изоляции сетей. На сегодняшний день не существует достаточно надежных методик дистанционного обнаружения дефектных изоляторов и технических средств, позволяющих эти методики реализовать.

Фарфоровые тарельчатые изоляторы перед установкой испытываются напряжением 50 кВ промышленной частоты в течение 1 мин, далее мегаомметром на напряжение 2,5 кВ измеряется их сопротивление, которое должно быть не менее 300 МОм.

Диагностирование изоляторов, находящихся в эксплуатации, производится приборами дистанционного контроля или измерительными штангами.

Рассмотрим, какие физические эффекты возникают в результате приложения к изолятору высокого напряжения.

Из теории известно, что если к двум электродам, разделенным изолятором, приложить электрическое поле достаточной напряженности, то на поверхности или в теле изолятора образуется электропроводный слой, в котором возникает и развивается электрический разряд - стример.

Возникновение и развитие разряда сопровождается генерацией колебаний в широком диапазоне частот (в инфракрасном, т.е. тепловом, звуковом, ультразвуковом диапазонах частот, в видимом спектре и в широком диапазоне радиочастот). Отсюда очевидно, что приемная часть устройства диагностики должна обнаруживать то или иное из перечисленных следствий образования и развития стримера.

Полимерные изоляторы выходят из строя иными способами, чем фарфоровые или стеклянные изоляторы, и трудно определить состояние таких изоляторов в отсутствии каких-либо наблюдаемых физических дефектов типа трещин или почернения.

На ВЛ 110 *кВ* применяются только подвесные изоляторы;

на ВЛ 35 *кВ* и ниже могут применяться как подвесные, так и штыревые изоляторы.

При пробое изолятора в гирлянде, его диэлектрическая "юбка" разрушается и падает на землю в случае выполнения юбки из стекла, а при пробое фарфорового изолятора юбка остается целой. Поэтому неисправные стеклянные изоляторы видны невооруженным глазом, тогда как диагностика вышедших из строя фарфоровых изоляторов возможна только с помощью специальных приборов, например прибора ультрафиолетовой диагностики "Филин".

Воздушные линии (ВЛ) электропередачи напряжением 35 *кВ* и выше являются основными в системах передачи электроэнергии. И поэтому дефекты и неисправности, происходящие на них, требуют немедленной локализации и устранения.

Анализ аварий воздушных линий показывает, что ежегодно происходят многочисленные отказы ВЛ в результате изменения свойств материала

проводов и их контактных соединений (КС): разрушение проводов из-за коррозии и вибрационных воздействий, истирание, износ, усталостные явления, окисление и др. Кроме того, с каждым годом растет число повреждений фарфоровых, стеклянных и полимерных изоляторов.

Существует множество методов и систем для диагностики вышеперечисленных элементов, однако они, как правило, являются трудоемкими, обладают повышенной опасностью и, кроме того, требуют отключения оборудования от напряжения.

Высокой производительностью характеризуется метод обследования ВЛ вертолетным патрулированием. За день работы (5 - 6 ч) осматриваются до 200 км линий. При вертолетном патрулировании проводятся следующие виды работ:

- тепловизионная диагностика ВЛ, изоляторов, контактных соединений и арматуры с целью выявления элементов, подвергающихся температурному нагреву вследствие возникающих дефектов;

- ультрафиолетовая диагностика ВЛ, изоляторов, контактных соединений с целью обнаружения коронных разрядов на них;

- визуальный контроль опор, изоляторов, контактных соединений, используется видеокамера с высоким разрешением.

Применение тепловизоров позволяет намного упростить процесс контроля состояния разрядников, установленных на воздушных линиях 35, 110 кВ. На основе термограммы можно определять не только фазу разрядника с повышенным током проводимости, но и конкретный дефектный элемент, повлиявший на рост этого тока.

Своевременная замена и ремонт дефектных элементов позволяет продолжить дальнейшую эксплуатацию разрядников.

Использование авиационных инспекций по мере развития технологий обследования увеличивается и в зарубежных странах. Например, фирма TVA работает над применением при авиационных инспекциях инфракрасных камер с высокой разрешающей способностью на стабилизированной подвеске и

камеры DayCor для обнаружения короны на элементах ВЛ в дневное время, радара для выявления гниющих деревянных опор и т.д.

Образование короны на элементах ВЛ свидетельствует о замыканиях, трещинах, загрязнении керамических изоляторов или обрывах прядей проводов.

При короне возникает слабое ультрафиолетовое излучение, которое нельзя увидеть в дневное время. Камера DayCor благодаря фильтру, пропускающему только ультрафиолетовое излучение в диапазоне длин волн 240 - 280 *нм*, позволяет обнаружить корону в дневное время.

Для оперативной диагностики состояния опорно-стержневых изоляторов и керамики высоковольтных вводов используется малогабаритный переносный вибродиагностический прибор «Аякс-М». Для получения диагностической информации на башмак опорного изолятора оказывается ударное воздействие, после чего в нем возбуждаются резонансные колебания.

Параметры этих колебаний связаны с техническим состоянием изолятора. Появление дефектов любого типа приводит к снижению частоты резонансных колебаний и увеличению скорости их затухания. Для устранения влияния резонансных колебаний конструкций, связанных с изолятором, регистрация вибраций производится после двух ударов - по верхнему и нижнему башмакам изолятора. На основании сравнения спектров резонансных колебаний при ударе по верхней и нижней частям изолятора производится оценка технического состояния и поиск дефектов.

При помощи прибора «Аякс-М» можно проводить диагностику состояния опорной изоляции и поиск дефектов следующих типов: наличие трещин в керамике изолятора или местах заделки керамики в опорные башмаки; наличие пористости в керамике изолятора; определение коэффициента технического состояния изолятора.

По итогам диагностики определяются категории состояния изолятора - «требуется замены», «требуется дополнительного контроля» или «может эксплуатироваться».

Зарегистрированные параметры состояния изолятора могут быть записаны в долговременную память прибора и, в дальнейшем, в память компьютера для хранения и обработки. При помощи дополнительной программы можно проводить оценку изменения параметров изолятора от измерения до измерения. При помощи прибора может производиться диагностика состояния изоляторов практически любого типа и марки.

Для оценки состояния вентильных разрядников используются следующие испытания:

- измерение сопротивления;
- измерение тока проводимости при выпрямленном напряжении;
- измерение пробивного напряжения;
- тепловизионный контроль.

Для оценки состояния ограничителей перенапряжений используются следующие испытания:

- измерение сопротивления;
- измерение тока проводимости;
- тепловизионный контроль.

Диагностика проводов. Для определения возможных проблемных мест на линиях электропередачи, возникающих из-за вибрации, используется прибор для контроля и анализа вибрации проводов линий электропередачи.

Прибор позволяет оценивать на месте в реальных погодных условиях характеристики вибрации линий электропередачи с различной конструкцией, натяжением проводов и техническим обеспечением, определять номинальный срок службы проводов, подвергающихся вибрации.

Прибор представляет собой вибрационный инструмент, использующийся на месте для контроля и анализа вибрации проводов воздушных линий электропередачи под действием ветра.

Прибор измеряет частоты и амплитуды всех циклов вибрации, сохраняет данные в матрице с высокой четкостью и обрабатывает результаты для

обеспечения оценки средней продолжительности срока службы исследуемых проводов.

Методы измерения и оценки основываются на международном стандарте IEEE и процедуре CIGRE. Устройство может быть установлено непосредственно на провод около любого типа зажимов.

Прибор состоит из калиброванного кронштейна лучевого сенсора, пристегивающегося к зажиму провода, который поддерживает короткий корпус цилиндрической формы.

Чувствительный элемент в контакте с проводом передает движение на сенсор. Внутри корпуса располагаются микропроцессор, электронная цепь, источник питания, дисплей и температурный сенсор.

Использование амплитуды изгиба (Yb) в качестве параметра измерения для оценки жесткости вибрации провода является хорошо признанной практикой.

Измерение дифференциального смещения на 89 мм от последней точки контакта между проводом и металлическим подвесным зажимом является исходным положением стандартизации IEEE измерений вибрации проводов.

Сенсор - консольная балка, чувствует изгиб провода вблизи подвесных или аппаратных зажимов. Для каждого цикла вибрации датчики деформации генерируют выходной сигнал, пропорциональный амплитуде изгиба провода.

Данные о частоте и амплитуде вибрации сохраняются в матрице амплитуда/частота в соответствии с количеством событий. В конце каждого периода контроля встроенный микропроцессор рассчитывает индекс номинального срока службы провода. Это значение сохраняется в памяти, после чего микропроцессор возвращается в режим ожидания следующего запуска.

Доступ к микропроцессору может быть напрямую получен с любого терминала ввода-вывода или компьютера через линию связи RS-232.

Дефектоскопия проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи.

Надежность ВЛ зависит от прочности стальных канатов, используемых в качестве токоведущих, несущих элементов в комбинированных проводах, грозозащитных тросов, оттяжек. Контроль технического состояния ВЛ и ее элементов основывается на сравнении выявленных дефектов с требованиями норм и допусками, приведенными в проектных материалах обследуемой ВЛ, в государственных стандартах, ПУЭ, СНиП, ТУ и других нормативных документах.

Состояние проводов и тросов обычно оценивается при визуальном осмотре. Однако такой метод не позволяет выявлять обрывы внутри проводов.

Для достоверной оценки состояния проводов и тросов ВЛ необходимо применять неразрушающий инструментальный метод с помощью дефектоскопа, который позволяет определить как потерю их сечения, так и внутренние обрывы проволок.

Тепловой метод диагностики ВЛ. Обнаружить утечку тепла и предотвратить аварию, связанную с перегревом на воздушных линиях, можно на самых ранних этапах ее появления. Для этой цели используются тепловизоры или пирометры.

Оценка теплового состояния токоведущих частей и изоляции ВЛ в зависимости от условий их работы и конструкции осуществляется:

- по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры);
- избыточной температуре;
- динамике изменения температуры во времени;
- с изменением нагрузки;
- путем сравнения измеренных значений температуры в пределах фазы, между фазами, с заведомо исправными участками.

Предельные значения температуры нагрева и ее превышения приводятся в регламентирующих директивах РД 153-34.0-20363-99 "Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ", а также в "Инструкции по инфракрасной диагностике воздушных линий электропередач".

Для контактов и контактных соединений расчёты ведут при токах нагрузки $(0,6 - 1,0)I_{ном}$ после соответствующего пересчета. Пересчет превышения измеренного значения температуры к нормированному осуществляется исходя

из соотношения $\frac{\Delta T_{ном}}{\Delta T_{раб}} = \left(\frac{0,5I_{ном}}{I_{раб}}\right)^2$,

где $\Delta T_{ном}$ - превышение температуры при $I_{ном}$;

$\Delta T_{раб}$ - превышение температуры при $I_{раб}$.

Тепловизионный контроль оборудования и токоведущих частей при токах нагрузки ниже $0,3 I_{ном}$ не эффективен для выявления дефектов на ранней стадии их развития.

Дефекты, выявленные при указанных нагрузках, следует относить к дефектам при аварийной степени неисправности. И незначительную часть дефектов следует относить к дефектам с развивающейся степенью неисправности.

Следует отметить, что не существует оценки степени неисправности дефектов на косвенно перегреваемых поверхностях оборудования.

Косвенные перегревы могут быть вызваны скрытыми дефектами, например трещинами, внутри изоляторов разъединителя, температура которых измеряется снаружи, при этом часто дефектные части внутри объекта бывают очень горячими и сильно обгоревшими.

Оборудование с косвенными перегревами следует относить ко второй или третьей степени перегрева. Оценку состояния соединений, сварных и выполненных обжатием, следует производить по избыточной температуре.

Проверка всех видов проводов воздушных линий электропередачи тепловизионным методом проводится:

- вновь вводимых в эксплуатацию ВЛ - в первый год ввода их в эксплуатацию при токовой нагрузке не менее 80 %;
- ВЛ, работающих с предельными токовыми нагрузками, или питающих ответственных потребителей, или работающих в условиях

повышенных загрязнений атмосферы, больших ветровых и гололедных нагрузках - ежегодно;

- ВЛ, находящихся в эксплуатации 25 лет и более, при отбраковке 5 % контактных соединений - не реже 1 раза в 3 года;
- остальных ВЛ - не реже 1 раза в 6 лет.

Ультразвуковая диагностика опор ВЛ. Оценка состояния железобетонных опор ультразвуковым прибором поверхностного прозвучивания.

Постоянное наблюдение за состоянием опор ВЛ позволяет не только предотвратить аварии, но и существенно повысить рентабельность эксплуатации электрических сетей, выполняя ремонт лишь тех опор, которые действительно нуждаются в ремонте или замене. Значительная доля опор ВЛ в нашей стране и за рубежом выполнено из железобетона.

Распространенным видом железобетонной опоры является стойка в виде толстостенной трубы, изготовленная методом центрифугирования.

Под воздействием климатических факторов, вибрации и рабочей нагрузки бетон стойки меняет структуру, растрескивается, получает различные повреждения, и в результате стойка постепенно теряет свою несущую способность.

Поэтому для определения необходимости замены стойки требуются регулярные обследования всех стоек электрических сетей. Такие обследования предотвращают также излишнюю отбраковку опор.

В процессе эксплуатации конструкций в связи с изменением структуры бетона и появлением в нём дефектов происходит ухудшение прочности бетона, которое проявляется в уменьшении скорости распространения ультразвуковых колебаний.

В силу конструктивных особенностей стоек и характера нагрузок на них, изменения свойств бетона в направлениях вдоль и поперёк стойки оказываются неодинаковыми: скорость ультразвука в поперечном направлении со временем снижается быстрее, что, по-видимому, можно объяснить повышением концентрации микротрещин с преимущественно продольной ориентацией.

По изменению величин скоростей распространения ультразвука вдоль и поперёк стойки в процессе её эксплуатации, а также по их отношению можно судить о степени потери несущей способности стойки и принимать решение о её замене.

8.2. Технические средства и системы диагностики воздушных линий

В качестве основного измерительного средства при контроле опор ВЛ используется *ультразвуковой тестер УК 1401М*, предназначенный для измерений времени и скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твёрдых материалах при поверхностном прозвучивания на постоянной базе 150 мм.



Рисунок 21 – Внешний вид ультразвукового тестера УК 1401М

Ультразвуковой тестер представляет собой малогабаритный электронный блок с цифровым индикатором результатов измерений и двумя ультразвуковыми преобразователями с сухим акустическим контактом.

Ультразвуковой тестер УК-1401М предназначен для измерения времени и скорости распространения продольных ультразвуковых (УЗ) волн в твердых материалах при поверхностном прозвучивании на фиксированной базе с целью определения прочности и целостности материалов и конструкций.

Основные области применения прибора:

- определение прочности бетона по скорости ультразвука согласно ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности»;
- определение прочности бетона в эксплуатируемых сооружениях в сочетании с методом «отрыв со сколом»;
- оценка несущей способности бетонных опор и столбов из центрифугированного бетона через отношение скоростей распространения ультразвука в направлениях вдоль и поперек оси опоры.

Дополнительные возможности прибора:

- поиск приповерхностных дефектов в бетонных сооружениях по аномальному уменьшению скорости или увеличению времени распространения ультразвука в дефектном месте по сравнению с областями без дефектов;
- оценка глубины трещин, выходящих на поверхность бетона или камня;
- оценка пористости и трещиноватости горных пород, степени анизотропии и текстуры композитных материалов;
- оценка сходства или различия упругих свойств материалов или образцов одного материала друг от друга, а также возраста материала при условии изменения его свойств от времени.

Работа УЗ тестера основана на измерении интервала времени, за который УЗ импульс проходит по изделию от передающего преобразователя к приемному. Скорость ультразвука вычисляется путем деления расстояния между точками излучения и приема УЗ колебаний, на измеренное время. Для повышения достоверности измерений излучение и прием УЗ импульса периодически повторяются. На дисплей выводится величина, полученная в результате обработки нескольких принятых подряд УЗ сигналов.

УЗ импульсы проходят по изделию вблизи его поверхности в виде упругих волн различных типов. Отсчет измеряемого интервала времени производится по наиболее раннему возмущению, приходящему к приемному преобразователю. Поэтому измеряется скорость продольных акустических волн, распространяющихся с наибольшей скоростью в данном материале.

Основная часть энергии УЗ импульсов распространяется в приповерхностном слое материала толщиной 2 – 3 сантиметра. Если на пути волны находится какое-то нарушение структуры материала, например, пустота или трещина, близкая к поверхности, то волна, огибая ее, поступит к приемнику ослабленной и с запозданием, по сравнению с местом, где нарушение структуры материала отсутствует. В этом случае низкая скорость звука или большее время распространения УЗ волны по сравнению с другими местами являются признаком дефекта структуры материала, невидимого с поверхности.

Если трещина выходит на поверхность, то она полностью преграждает путь для УЗ волны вдоль поверхности. В этом случае только небольшая часть энергии волны, огибая трещину в глубине материала (до 50 мм), может прийти к приемному преобразователю УЗ тестера. Время ее распространения из-за более длинного пути будет больше, чем время распространения волны по кратчайшему пути между преобразователями при отсутствии трещины в материале. На сравнении этих интервалов времени и основан способ измерения глубины трещины с помощью ультразвукового тестера УК-1401М.

Контроль опор проводят при поверхностном прозвучивании материала стойки в двух взаимно перпендикулярных направлениях (поперёк и вдоль оси стойки) в одном или нескольких её местах, в зависимости от типа и степени её повреждения.

Способ поверхностного прозвучивания позволяет вести контроль в любых местах стоек.

При контроле выполняют по три измерения времени распространения ультразвука между преобразователями тестера в каждом направлении и определяют средние значения этих измерений.



Рисунок 22 – Внешний вид меню ультразвукового тестера УК 1401М

По полученному среднему значению времени распространения ультразвука в поперечном направлении ("показателю П1") и по его отношению ко времени распространения ультразвука в продольном направлении ("показателю П2") оценивают фактическую несущую способность опоры.

На основе накопленного опыта оценки состояния стоек опор различных типов установлены предельные значения показателей П1 и П2, при достижении которых опоры необходимо заменять.

Ультразвуковые приборы применяются также для определения состояния деревянных опор.

Электромагнитный дефектоскоп для контроля проводов и тросов «Интрос».

Проблема неразрушающего контроля проводов и тросов ВЛ решается применением разработанного и выпускаемого ООО «Интрон Плюс» (г. Москва) двухканального электромагнитного дефектоскопа «Интрос».

Дефектоскоп «Интрос» предназначен для контроля канатов круглого сечения диаметром 6 -64 мм и плоских канатов шириной до 233 мм и толщиной до 38 мм. Прибор применяется в двух режимах: при контроле в реальном времени, с запоминанием и обработкой данных контроля.

Дефектоскоп Интрос реализует магнитный вид контроля (по ГОСТ 18353-79). Канат намагничивается до состояния близкого к магнитному насыщению. Изменение площади поперечного сечения или появление локального дефекта каната вызывает перераспределение магнитного потока вокруг каната. Это перераспределение регистрируется магнито - чувствительными датчиками - преобразователями Холла.

Дефектоскоп ИНТРОС состоит из электронного блока (ЭБ) и магнитных головок (МГ/ЭМГ) различных конструкций и типоразмеров. Магнитные головки предназначены для контроля канатов круглого сечения определенного диапазона диаметров или плоских стальных, а также резинотросовых канатов определенного диапазона размеров поперечного сечения.



Рисунок 22 – Внешний вид элементов Дефектоскоп ИНТРОС

В магнитных головках используются постоянные магниты. В качестве измерительных элементов применены преобразователи Холла.

В магнитной головке МГ 150 применены два вида измерительных элементов: преобразователи Холла, используемые для измерения потери сечения каната и индуктивные катушки, используемые для обнаружения локальных дефектов.

Магнитные головки подключаются к ЭБ с помощью специального кабеля длиной 5 или 8 м. Все электронные блоки совместимы с любой из выпускаемых МГ.

Переносной прибор для поиска места однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6 - 35 кВ "Квант". Прибор предназначен для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6-35 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью, но может использоваться также для поиска обрывов, повреждения изоляции опор и дистанционного контроля тока нагрузки и напряжения в сетях 0,4 кВ. Кроме того, прибор позволяет обнаружить хищение электроэнергии в быту бесконтактным способом.



Рисунок 23 – Внешний вид прибора для поиска места однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6 - 35 кВ "Квант"

Прибор "Квант" обеспечивает:

- контроль тока нагрузки на воздушных линиях электропередач (ВЛ) 0,4-35 кВ;
- контроль наличия напряжения на ВЛ 6-35 кВ;
- определение места однофазного замыкания на землю в сетях 6-35 кВ;
- определение места обрыва провода в сетях 6-35 кВ;
- определение опоры, находящейся под напряжением 6-35 кВ;
- световую проверку исправности обесточенных предохранителей или целостности электрической цепи.

Контроль наличия напряжения 6-35 кВ осуществляется с помощью встроенной электрической антенны.

Электрической антенной служит металлическая пластина, расположенная в передней части прибора.

Контроль тока нагрузки ВЛ осуществляется с помощью магнитного датчика. Магнитным датчиком служит катушка индуктивности с разомкнутым стержневым ферритовым сердечником, которая расположена в правой части прибора.

Определение места замыкания на землю в сетях 6-35 кВ основано на измерении вблизи ВЛ уровня высших гармонических составляющих

магнитного поля тока нулевой последовательности с помощью магнитного датчика, настроенного, в этом режиме, на частоту 550 Гц. Коэффициент передачи усилителя можно изменять в соотношении 1:1000; 1:100; 1:10; 1:1 в зависимости от уровня тока замыкания на землю.

Ультрафиолетовый дефектоскоп "Филин - 6".

Электронно-оптический дефектоскоп "Филин - 6" преобразует ультрафиолетовое излучение разрядных процессов в видимое и совмещает его на экране с изображением объекта контроля в видимом спектре.

Выявляет такие дефекты:

- нарушение заделки опорных изоляторов и наличие поверхностных микротрещин фарфора;
- наличие и оценка степени загрязнения любых изоляторов;
- нарушение целостности жил проводов ВЛ;
- пробитые (нулевые) фарфоровые изоляторы в гирлянде;
- дефекты монтажа подвесок, внутрифазовых распорок ВЛ, разделки кабелей, контактных соединений и многие другие.



Рисунок 24 – Внешний вид прибора "Филин-6"

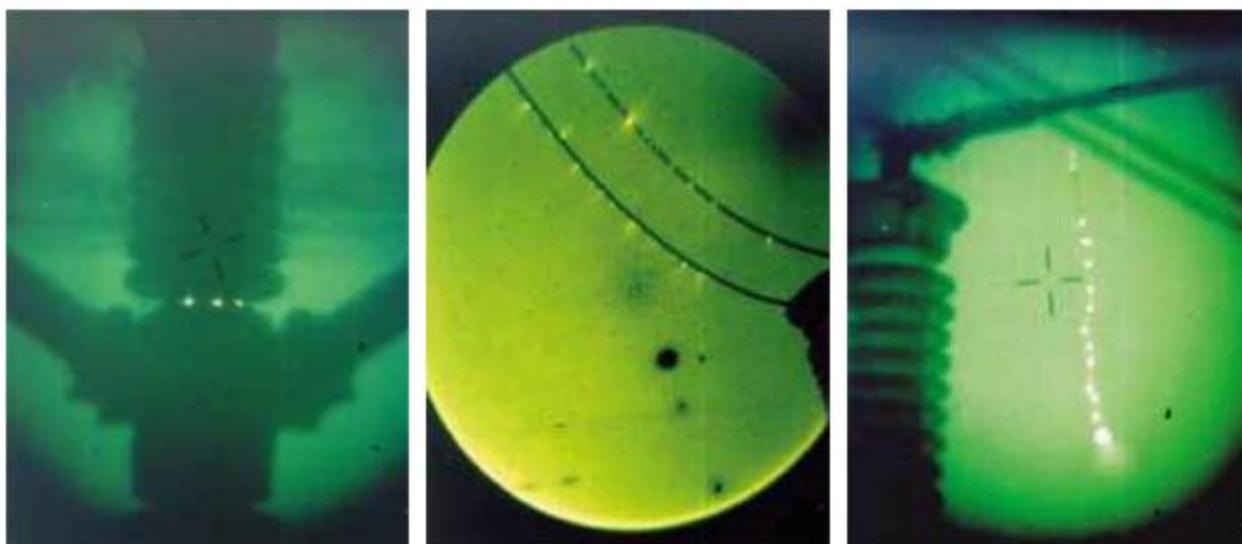


Рисунок 25 – Изображение дефектов, выявленных прибором "Филин-6"

Камера позволяет проводить обследования и при движении со скоростью до 250 км/ч, работать при освещенности до 100 лк, то есть в пасмурный день либо сразу после захода солнца.

Электронно-оптический дефектоскоп "Филин-6" преобразует ультрафиолетовое излучение разрядных процессов в видимое и формирует их изображение вместе с изображением контролируемого объекта на экране. Он позволяет в полевых условиях получить и зарегистрировать как мгновенную, так и изменяющуюся в реальном времени картину месторасположения и распределения разрядов по их интенсивности и частоте появления на поверхности оборудования.

Максимум спектра излучения всех электрических разрядов (искра, поверхностные частичные разряды, коронные и другие) лежит в области ультрафиолета на частоте 280 - 400 нанометров по шкале электромагнитных волн.

Предлагаемый оптический способ наблюдения, изучения и регистрации электрических разрядов в применении к диагностике состояния высоковольтного промышленного оборудования отличается значительно более высокой чувствительностью и разрешающей способностью, чем существующие электрические или акустические методы.

Чувствительность камеры настолько высока, что позволяет обнаруживать с 5 - 7 метров элементарный разряд в 1 пикокулон. Для опытного специалиста получение подобной информации более, чем достаточно, чтобы определить дефект оборудования.

Прибор не оценим при проведении научных исследований, связанных с разработкой высоковольтного оборудования или новых электроизоляционных материалов, а также в физике, химии и других областях науки и техники, где требуется регистрация слабосветящихся процессов в спектральном диапазоне 0,25 - 0,85 мкм.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Надежная регистрация единичного разряда 1 пикокулон	4-6 метров
Спектральный диапазон: с полосовыми фильтрами	300-400 нм
с диспергирующими фильтрами	360-560 нм
Пространственное разрешение изображения	30 линий\мм
Кoeffициент усиления	20000 не хуже
Темновой фон (шум)	0,0012 кд\м ²
Фокусное расстояние объектива (стандартная поставка)	108 мм
Отношение сигнал\шум	45 не хуже
Напряжение питания	2.4-3.0 В
Потребляемый ток	100 мА, не более
Габаритные размеры	Длина 340 мм Высота без рукоятки 89 мм Ширина 75 мм
Масса	2 кг
Условия эксплуатации:	
Температура	-20+50 °С
Относительная влажность	98%

Дефектоскоп состоит из кварцевого длиннофокусного объектива с соответствующим полосовыми или диспергирующим фильтром, высокочувствительного электронно-оптического преобразователя, регулируемого (48 - 52 Гц) стробирующего устройства, аккумуляторного питания, источника опорного оптического сигнала для измерения амплитуды излучения, цифровой камеры с адаптером для присоединения к дефектоскопу,

программного обеспечения для анализа видеоизображений а также другими дополнительными принадлежностями.

Тепловизоры, например, тепловизор TESTO 876

Тепловизор TESTO 876 снабжён поворотным дисплеем, который обеспечивает максимальный комфорт пользователя при проведении измерений и даёт возможность получить изображение даже наиболее отдалённых участков, обладает высокой температурной чувствительностью



Рисунок 26 – Внешний вид тепловизора TESTO 876

Ультразвуковой измеритель расстояний "Даль" позволяет без приближения к токоведущим частям и без снятия напряжения с воздушной линии электропередачи определять ее габариты (расстояния от земли до проводов, расстояния между проводами). Измеритель "Даль" дает возможность определять расстояния до трех проводов, расположенных друг над другом с запоминанием и поочередной индикацией в цифровой форме расстояния до каждого из проводов.

Измерения прибором "Даль" производятся с земли. Для этого измеритель расстояния следует расположить так, чтобы посторонние предметы (здания, деревья) и сам измеряющий не попали в сектор излучения.



Рисунок 27 – Внешний вид ультразвукового измерителя расстояний "Даль"

Измеритель расстояния "Даль" имеет следующие характеристики:

Диапазон измерения, м	3,5 – 15
Погрешность измерений расстояний, не более, %	1
Габаритные размеры корпуса, мм	200x90x70
Масса (с элементами питания, без футляра), не более, кг	0,4
Питание прибора – автономное, от четырех элементов R6-AA-UM3 (А 316), В	6
Количество измерений, не менее	10 000
Температурный диапазон, °С	от -10 до +40

Устройство поиска повреждений типа УПП-10М.

Предназначено для применения в воздушных и кабельных электрических сетях 6 - 10 кВ оперативно-выездными бригадами для ускорения выявления аварийных линий или их участков при наличии коротких замыканий на землю. Устройство позволяет исключить пробные включения на возможное короткое замыкание, опасное для оборудования и персонала, особенно в сетях с большими токами коротких замыканий. Устройство также может использоваться при фазировке сети 6-10 кВ.

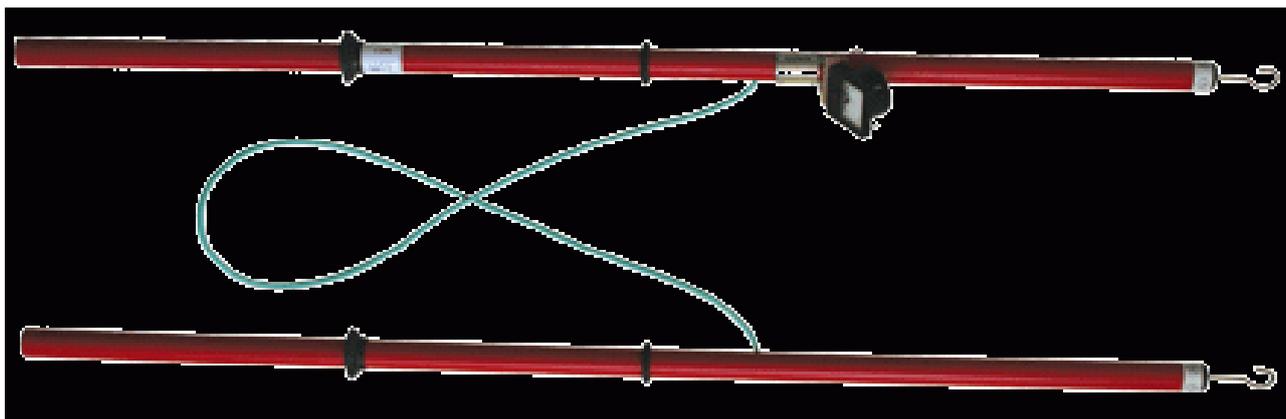


Рисунок 28 – Внешний вид устройства для поиска повреждений типа УПП-10М

По принципу действия устройство является высоковольтным однополупериодным выпрямителем переменного тока частотой 50 - 60 Гц.

Измеряя устройством значение тока между цепью рабочего напряжения 6 - 10 кВ и фазами проверяемой линии, можно судить о наличии или отсутствии повреждений на ней.

Устройство состоит из двух полых штанг из полиэтилена. Элементы электрической схемы размещены внутри штанг. Связь между диодами и резисторами выполнена гибким проводом в высоковольтной изоляции. На концах штанг предусмотрены контактные выводы для касания шин в электроустановках. Стрелочный индикатор - миллиамперметр, укреплен на одной из штанг вблизи ограничительного кольца, на рабочей части

Устройство ИМФ - 1С предназначено для непосредственного определения расстояния до места двухфазных и трехфазных коротких замыканий на воздушных линиях электропередачи напряжением 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью.

Контроль векторов тока и сравнение их значений с уставками для определения наличия короткого замыкания производится непрерывно. При срабатывании устройство выдает информацию об аварии на индикатор и замыкает контакты реле "Сигнал».

Устройство оснащено автоматическим встроенным контролем исправности основных внутренних узлов с выдачей сигнала отказа контактами реле "Отказ".

Принцип работы устройства основан на измерении векторной диаграммы токов и напряжений в аварийном режиме с последующим расчетом расстояния до места повреждения с использованием заранее введенных в качестве уставок параметров линии.



Рисунок 29 – Внешний вид устройства ИМФ - 1С

Устройство ИМФ-1С оснащено интерфейсом линии связи для подключения нескольких устройств к одному компьютеру. Это позволяет дистанционно задавать уставки, выполнять "пробный пуск" и считывать данные об авариях с последующей их обработкой на компьютере.

Системы телеизмерения гололедных нагрузок СТГН предназначены для непрерывного измерения гололедных нагрузок на фазные провода и грозозащитные тросы воздушных линий электропередачи различных классов напряжений.

В отличие от существующих систем, унифицированная аппаратура СТГН может применяться в составе региональной информационной системы с произвольным количеством пунктов контроля гололедной нагрузки на различных ВЛ. Аппаратура СТГН выпускается с передачей информации о гололедной нагрузке низкочастотными импульсами, постоянным напряжением или их

сочетанием.



Рисунок 30 – Внешний вид приемного устройства системы телеизмерения гололедных нагрузок СТГН

Выбор способа передачи информации зависит от типа ВЛ, схемы и режимов сети, количества пунктов контроля гололедной нагрузки на ВЛ. Передача информации в СТГН осуществляется по каналу: «фаза-земля» - на ВЛ 6 - 35 кВ с изолированной нейтралью; «изолированный грозозащитный трос - земля» - на ВЛ 110 кВ и выше с глухозаземленной нейтралью; радиоканалу.

Аппаратура СТГН состоит:

- из бесконтактного магнитоупругого датчика гололедной нагрузки (ДГН), устанавливаемого между траверсой и гирляндой изоляторов ВЛ. Исполнение ДГН серии ДМС зависит от типа ВЛ и измеряемых нагрузок;

- линейного (ЛП) и приемного (ПП) преобразователей, осуществляющих соответственно в пункте контроля - кодирование, а в пункте приема - декодирование сигнала ДГН.

Исполнение унифицированных ЛП и ПП зависит от способа передачи информации о гололедной нагрузке.

Приемный преобразователь обеспечивает индикацию гололедной нагрузки в пункте приема и выдачу аналоговых и релейных сигналов в цепи сигнализации и телемеханики.

Системы отличаются простотой в наладке и надежностью в эксплуатации, обеспечивают с достаточной точностью непрерывный контроль гололедной нагрузки на проводах ВЛ. Это позволяет оперативному персоналу энергосистем своевременно формировать оптимальную стратегию борьбы с гололедом в регионе и управлять различными установками плавки гололеда на ВЛ.

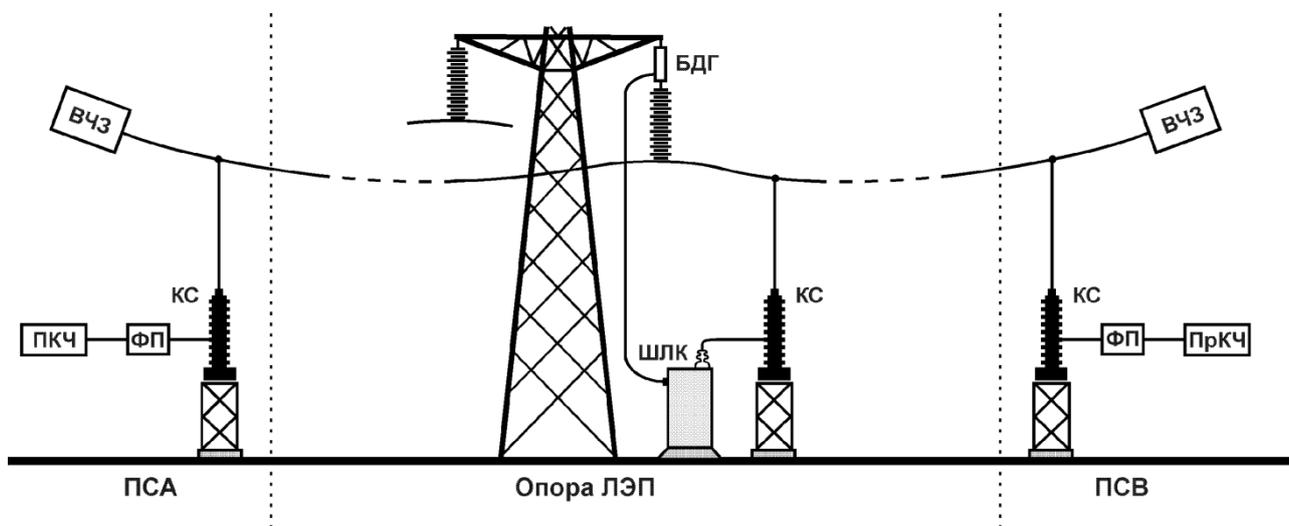


Рисунок 31 – Структурная схема СТГН:

ПСА – подстанция А, ПКЧ – передатчик контрольных частот, ФП – фильтр присоединения, ВЧЗ – высокочастотный заградитель, КС – конденсатор связи, БДГ – бесконтактный датчик гололеда, ШЛК – шкаф линейного комплекта, ПрКЧ – приемник контрольной частоты, ПСВ – подстанция В

Принцип работы СТГН:

1. ПКЧ, установленный на подстанции ПСА, через стандартный фильтр присоединения (ФП) и конденсатор связи (КС) передает в фазный провод пилот сигналы, именуемые контрольной частотой (КЧ).

2. В ШЛК, установленном у основания опоры, в месте, где необходимо измерять весовые нагрузки на проводе ЛЭП, на основе данных, исходящих от датчика БДГ, производится амплитудно-импульсная модуляция сигнала КЧ.

3. Модулированный сигнал через конденсатор связи (КС) и фильтр присоединения (ФП) поступает в приёмник контрольной частоты (ПрКЧ), установленный на противоположной подстанции ПСВ, где после соответствующих преобразований индицируется весовая нагрузка на фазный провод и затухание в линии.

Содержание

1.	Общие вопросы технической диагностики.....	3
2.	Измерение электрических и магнитных величин.....	8
	2.1. Общие положения.....	8
	2.2. Измерение температуры.....	9
	2.3. Влагометрия.....	10
	2.4. Измерение параметров вибрации	12
	2.5. Измерение шума.....	14
	2.6. Основные диагностические параметры электротехнического оборудования.....	14
3	Методы диагностики электротехнического оборудования.....	15
	3.1. Тепловые методы диагностики.....	15
	3.2. Вибродиагностика.....	19
	3.3. Физико-химические методы.....	28
4	Методы диагностики электротехнического оборудования	32
	4.1. Метод частичных разрядов.....	32
	4.2. Оптические методы.....	39
	4.3. Неразрушающий контроль конструкционных материалов и изделий.....	42
5	Диагностические комплексы и мобильные диагностические лаборатории.....	55
6	Диагностика коммутационных аппаратов.....	69
	6.1. Диагностика изоляции коммутационных аппаратов.....	69
	6.2. Контроль электроизоляционного масла.....	78
	6.3. Диагностика контактов и контактных соединений.....	79
	6.4. Технические средства диагностики коммутационных аппаратов.....	81
7	Диагностика кабельных линий.....	90
	7.1. Методы диагностики кабельных линий.....	90
	7.2. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей.....	101
	7.3. Технические средства диагностики кабельных линий.....	104
8	Методы диагностики воздушных линий.....	112
	8.1. Общие положения.....	112
	8.2. Технические средства и системы диагностики воздушных линий	121