

Организация диагностического мониторинга технического состояния высоковольтных кабельных линий

Все более широкое практическое применение высоковольтных кабельных линий предъявляет жесткие требования к повышению надежности их работы.

Имеющаяся статистика показывает, что основной причиной аварийности кабельных линий являются проблемы в высоковольтной изоляции, чаще всего в концевых и соединительных муфтах.

В наибольшей степени это актуально для современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, в которых, по сравнению с кабелями с изоляцией бумага-масло, возникшие дефекты могут развиваться очень быстро: за считанные месяцы, недели, а иногда и даже дни. По этой причине эффективность проведения общепринятых для других типов высоковольтного электротехнического оборудования плановых периодических испытаний для кабельных линий на практике оказывается недопустимо низкой.

Единственным решением, обеспечивающим надежный контроль технического состояния изоляции муфт и самих высоковольтных кабелей, является применение специализированного диагностического оборудования, работающего в режиме непрерывного мониторинга.

Выбор такого диагностического оборудования для мониторинга технического состояния изоляции высоковольтных кабельных линий, особенно длинных, проложенных в сложных условиях, является непростой технической задачей. Практически для каждой кабельной линии приходится создавать уникальную систему мониторинга, максимально учитывающую условия ее прокладки и эксплуатации.

Данный обзор посвящен рассмотрению наиболее важных задач, которые приходится решать при создании систем мониторинга кабельных линий. Эти вопросы касаются как выбора наиболее подходящего диагностического оборудования, так и использования современного программного обеспечения, предназначенного не только для реализации стандартных функций мониторинга.

В современных системах мониторинга кабельных линий необходима экспертная диагностика дефектов и автоматизированная оценка текущего технического состояния, а что еще более важно, нужна оперативная функция прогнозирования возможности дальнейшей безаварийной эксплуатации кабельных линий.

1. Методы контроля технического состояния кабельных линий под рабочим напряжением

Системы непрерывного контроля (мониторинга) технического состояния высоковольтного оборудования всегда основаны на использовании онлайн диагностических методов, которые контролируют параметры работающего оборудования.

Для оперативного контроля технического состояния высоковольтных кабельных линий обычно используются два взаимодополняющих диагностических метода: контроль состояния изоляции по параметрам частичных разрядов и

оптоволоконный метод контроля распределенной температуры кабельной линии. Другие диагностические методы не получили широкого применения в системах мониторинга высоковольтных кабельных линий из-за сложности технического применения и меньшей информативности.

1.1. Наиболее информативным диагностическим методом, позволяющим оперативно оценивать техническое состояние изоляции кабельных линий, является регистрация и анализ частичных разрядов. Эти разряды практически всегда сопровождают возникновение дефектов на локальных изоляционных промежутках кабельной линии и характеризуются уровнем в десятки и сотни пикокулон, т.е. они имеют очень низкий уровень.

Это является и достоинством, и недостатком практического применения данного современного диагностического метода.

Основным достоинством является очень высокая чувствительность этого диагностического метода: возникновение частичных разрядов всегда говорит о возникновении дефектов в изоляции на самых ранних стадиях развития, что в большинстве случаев может позволить предотвратить возникновение опасных аварийных ситуаций.

Существенных недостатков у метода контроля дефектов в изоляции кабельных линий по параметрам частичных разрядов два:

- Необходимо регистрировать высокочастотные импульсы частичных разрядов небольшой амплитуды, обычно менее одного вольта, на фоне высоких рабочих напряжений кабельной линии, достигающих сотен киловольт. Для решения этой проблемы используются специализированные высокочастотные датчики импульсов частичных разрядов и измерительная аппаратура высокой чувствительности.
- Высокий уровень высокочастотных импульсных шумов, наведенных в кабельную линию из энергосистемы или от внешних источников, например, от телевизионных каналов, сотовой связи, различных промышленных источников высокочастотных импульсов. Эти помехи влияют на достоверность получаемых диагностических заключений и требуют использования сложных технических и алгоритмических средств фильтрации помех. В итоге это чаще всего существенно увеличивает общую стоимость такой системы мониторинга кабельной линии.

1.2. Информативным методом оценки технического состояния кабельных линий является температурный мониторинг. В настоящее время используются два подхода к организации температурного мониторинга: с использованием локальных и распределенных температурных датчиков.

Традиционные локальные датчики температуры различных типов и исполнений (накладные и дистанционные, проводные и беспроводные, и т.д.) используются при создании систем мониторинга кабельных линий среднего уровня напряжения 6-35 кВ.

Для контроля технического состояния кабельных линий высоких уровней рабочего напряжения достаточно часто применяются системы распределенного температурного контроля. Они позволяют контролировать температуру всей кабельной линии с высоким пространственным разрешением, до 1 метра.

Этот метод контроля параметров кабельной линии наиболее полезен с точки зрения контроля эксплуатационных параметров, так как позволяет оперативно контролировать температуру различных участков кабельной линии.

Имеющаяся в литературе информация о том, что при помощи этого метода можно выявить локальные перегревы изоляции кабельной линии в зонах возникновения дефектов не совсем корректна. Такие перегревы могут происходить, но только на самых последних стадиях развития дефектов, и то не во всех случаях. Чаще всего разрушение изоляции высоковольтных кабельных линий не является результатом перегрева, а происходит в форме электрического пробоя. При этом сам дефект, даже при своем развитии практически до критического уровня, не выделяет какого-либо значимого количества тепла.

С диагностической точки зрения метод контроля распределенной температуры при помощи оптического волокна может позволить точно выявить место возникновения пробоя кабельной линии, что будет полезно для работы ремонтных служб. Конечно это будет возможно только в том случае, когда при аварийном пробое изоляции кабельной линии также произойдет разрушение оптического волокна.

1.3. Для более полного контроля технического состояния изоляции кабельных линий желательно также контролировать токи утечки в изоляции по экрану кабеля.

По величине этого тока можно определять возникновение увлажнения поверхности главной изоляции жилы, возникающее при повреждении защитной внешней оболочки кабеля и наличии внешнего увлажнения снаружи кабеля. При наличии такого сочетания параметров и попадании влаги под защитную оболочку возможно возникновение очень опасного дефекта, приводящего к появлению «водяных деревьев» в изоляции жилы. Выявление этого опасного дефекта другими диагностическими методами в режиме непрерывного мониторинга под рабочим напряжением чрезвычайно затруднено.

Сложностью является то, что данный метод применим только для контроля кабельных линий, в которых три фазы располагаются в общей защитной оболочке. Если же фазы кабельной линии прокладываются раздельно, то токи утечки в большей степени зависят от взаимной прокладки кабелей, переключаются в точках суперпозиции. По этой причине их измерение и анализ не могут принести пользы для контроля состояния главной изоляции и оболочек кабельной линии.

2. Структура технических средств систем диагностического мониторинга кабельных линий

Как и все системы мониторинга любого другого высоковольтного электротехнического оборудования системы мониторинга кабельных линий имеют иерархически многоуровневую структуру расположения и функционирования технических средств.

Наиболее существенным отличием от других подобных систем, например, от систем мониторинга силовых трансформаторов, является пространственное распределение технических средств, располагаемых вдоль длинной кабельной линии.

В зависимости от длины кабельной линии может даже изменяться необходимый состав основного диагностического оборудования системы мониторинга, обеспечивающего регистрацию и анализ первичных параметров линии. Для реализации одного диагностического метода в системе мониторинга кабельной линии может понадобиться не один измерительный прибор, а несколько аналогичных по параметрам, но расположенных в разных точках контролируемой кабельной линии.

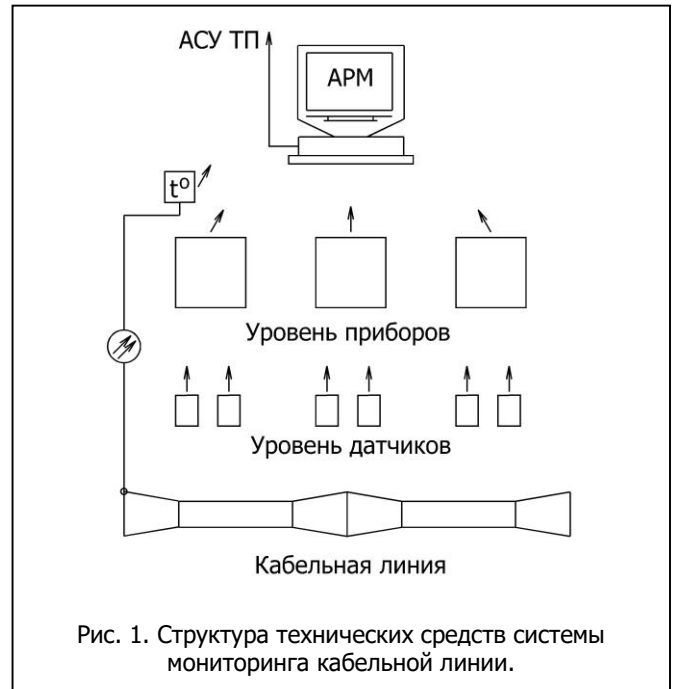


Рис. 1. Структура технических средств системы мониторинга кабельной линии.

В целом в системе мониторинга кабельных линий можно выделить несколько уровней технических средств, различающихся назначением и местом установки:

- Уровень первичных датчиков и преобразователей. Оборудование этого уровня располагается рядом с концевыми и соединительными муфтами (датчики частичных разрядов) или непосредственно в кабеле в зоне экрана (оптическое волокно контроля распределенной температуры кабельной линии).
- Уровень локальных технических средств регистрации и анализа первичных параметров кабельной линии. Современные приборы этого уровня включают в себя программные экспертные системы, позволяющие проводить диагностику дефектов и оценку технического состояния контролируемого участка кабельной линии, т.е. всю необходимую обработку первичной информации. Эти приборы располагаются в точках кабельной линии, в которых осуществляется контроль участка. Для короткой кабельной линии это может быть один прибор. Чем длиннее кабельная линия, тем больше нужно таких приборов локальной диагностики.
- Уровень диагностических приборов, контролирующих первичные параметры кабельной линии практически любой длины. К этому уровню обычно относятся приборы контроля распределенной температуры линии при помощи оптического волокна. Для большинства линий температура трех фаз может измеряться прибором,

имеющим один вход, для чего оптические волокна в фазах зигзагообразно последовательно включаются в одну линию. Температура самых длинных кабельных линий контролируется при помощи многоканальных измерительных приборов.

- Верхний уровень системы мониторинга высоковольтной кабельной линии: автоматизированное рабочее место (АРМ). Этот уровень обычно реализуется при помощи специализированного программного обеспечения, устанавливаемого на персональном компьютере. Это программное обеспечение решает три основные задачи: интегрирует диагностическую информацию от распределенных приборов контроля и анализа частичных разрядов по участкам кабельной линии, интегрирует информацию от подсистем контроля распределенной температуры и частичных разрядов, и, в конечном итоге, формирует заключение о текущем техническом состоянии кабельной линии и возможности ее дальнейшей эксплуатации.

Реальная конфигурация технических средств системы мониторинга конкретной высоковольтной кабельной линии практически всегда является уникальной, связанной с ее длиной, способом и трассой прокладки, параметрами используемого кабеля, применяемых муфт и многих других параметров.

Во многом это связано с параметрами и возможностями технических средств, которые будут использованы при создании системы мониторинга.

3. Особенности выбора технических средств для системы контроля частичных разрядов в изоляции кабельных линий.

Несмотря на кажущуюся однозначность задачи измерения и анализа частичных разрядов в изоляции высоковольтных кабельных линий на практике существует несколько значительно отличающихся друг от друга технических решений.

Поскольку эти технические решения, несмотря на внешне одинаковое формулирование поставщиками оборудования конечной задачи - регистрация частичных разрядов по факту они имеют различную диагностическую эффективность.

В следующем разделе данного обзора сделана попытка сравнительно определить достоинства и недостатки этих решений для оценки технического состояния изоляции кабельных линий.

3.1. Влияние частотного диапазона датчиков и регистрирующей аппаратуры на эффективность контроля изоляции кабельных линий

Существующая в настоящее время аппаратура контроля импульсов частичных разрядов в высоковольтной изоляции кабельных линий, включающая в себя первичные датчики и приборы регистрации, может работать в трех частотных диапазонах: акустическом или ультразвуковом (АС), высокочастотном (ВЧ или HF) и сверхвысокочастотном (СВЧ или UHF).

Выбор в пользу применения измерительной аппаратуры и датчиков регистрации частичных разрядов в каждом из этих частотных диапазонов имеет свои преимущества и недостатки:

- Достоинством оборудования, работающего в акустическом и ультразвуковом диапазонах частот, является его простота и сравнительно невысокая стоимость. Критических недостатков у измерительного

оборудования этого частотного диапазона два: ограниченная зона чувствительности акустических датчиков (в силу особенностей распространения акустических сигналов в кабелях и муфтах, которая не превышает одного метра) и высокий уровень внешних (!) акустических помех.

- При регистрации импульсов частичных разрядов в высокочастотном (ВЧ) диапазоне частот зона реальной чувствительности системы мониторинга к дефектам в изоляции может составлять несколько километров в обе стороны от датчика. Практически это расстояние определяется реальным уровнем высокочастотных помех, наведенных в кабельную линию извне. Гарантированно оно составляет от 2 км.

- При использовании регистрирующей аппаратуры и датчиков сверхвысокочастотного диапазона частот (СВЧ) влияние внешних помех на измерение минимально. Однако, поскольку СВЧ импульсы частичных разрядов обычно затухают в кабельной линии на расстоянии в несколько десятков метров, контролируемая системой мониторинга зона кабельной линии оказывается недопустимо малой.

На основании сравнения диагностических возможностей датчиков и аппаратуры регистрации импульсов частичных разрядов в изоляции кабельных линиях, работающих в разных диапазонах частот, можно сделать два практически важных вывода:

- Локальный контроль технического состояния концевых и соединительных муфт кабельных линий может производиться с использованием регистрирующей аппаратуры, работающей в любом из этих трех частотных диапазонов.

- Комплексный контроль технического состояния участков кабелей и муфт, входящих в кабельные линии, может быть реализован только при использовании диагностического оборудования, работающего в ВЧ диапазоне частот.

Ниже в обзоре в основном будет рассматриваться оборудование, работающее в ВЧ диапазоне частот, как наиболее универсальное и эффективное для создания систем диагностического мониторинга как кабельных муфт, так и всей кабельной линии.

3.2. Влияние длины кабельной линии на конфигурацию технических средств системы мониторинга

В зависимости от полной длины контролируемой кабельной линии изменяется оптимальный состав и места установки комплекта диагностического оборудования, обеспечивающего контроль технического состояния:

- Комплексный мониторинг технического состояния кабельной линии длиной до 2 км может быть выполнен при помощи одного прибора, работающего в высокочастотном диапазоне (ВЧ). Этот прибор устанавливается с одной стороны контролируемой кабельной линии, желательно в точке, где экран кабельной линии заземлен без использования ограничителя перенапряжений.

- Для высоковольтных кабельных линий длиной от 2 до 4 км для обеспечения необходимой информативности системы мониторинга первичные датчики и приборы регистрации и анализа частичных разрядов в изоляции приходится устанавливать с двух сторон кабельной линии.

- Для кабельных линий длиной более 4 км приборы контроля частичных разрядов и датчики необходимо устанавливать не только с двух сторон линии, но и в промежуточных точках линии. Обычно диагностическое оборудование устанавливается в шкафах и колодцах суперпозиции экранов фазных кабелей, расположение которых в каждом случае определяется техническим проектом прокладки кабельной линии. Расстояние выбирается из условий эффективной компенсации токов в экранов и обычно составляет примерно от 2 до 4 км.

Данные рекомендации по использованию различного диагностического оборудования в системах мониторинга приведены для кабельных линий, работающих в условиях достаточно интенсивных, но не предельных уровней высокочастотных помех.

В большинстве практических реализаций состав, количество и место установки диагностического оборудования системы мониторинга кабельных линий имеют свои, часто уникальные особенности.

3.3. Проблемы организации питания приборов и передачи информации от приборов систем мониторинга длинных кабельных линий

При создании систем диагностического мониторинга кабельных вставок и высоковольтных кабельных линий, особенно длиной более 4 км, достаточно часто приходится решать две специфические технические задачи.

Во-первых, не всегда в выбранном для установки диагностического оборудования месте кабельной линии возможно его оперативное подключение к сети переменного или постоянного тока, используемого для питания встроенной электроники. Особенно критическим это является при установке систем контроля частичных разрядов в изоляции кабельных линий и кабельных вставок, частично или полностью проложенных «в поле», где оперативное напряжение питания чаще всего отсутствует.

На практике приходится использовать альтернативные источники питания, например, солнечные батареи с буферным накопителем энергии. Но и использование этого решения возможно только при поверхностной прокладке кабельной линии на эстакадах. Для подземных кабельных линий использование таких источников питания обычно невозможно из-за технических сложностей и проблем с безопасностью эксплуатации.

Для подземных кабельных линий применяются специализированные источники питания, которые получают энергию трансформаторным путем от электромагнитного поля, возникающего вокруг кабеля при протекании по жиле рабочего тока. При таком подходе включение в работу кабельной линии практически сразу же приводит к автоматическому включению системы диагностического мониторинга.

Использование альтернативных источников питания любого типа всегда усложняет конфигурацию технических средств системы мониторинга и увеличивает, в ряде случаев очень значительно, общую стоимость поставки технических средств. На использование таких усложняющих решений приходится идти при создании необслуживаемых систем диагностического мониторинга.

Второй технической проблемой, достаточно часто возникающей при установке технических средств систем мониторинга кабельных линий вне зданий подстанций или других обслуживаемых помещений, является сложность организации высокоскоростных каналов передачи информации между приборами системы мониторинга, АРМ

мониторинга и общей системой АСУ-ТП энергетического предприятия.

Теоретически возможно использование нескольких технических вариантов создания таких каналов для информационного обмена:

- Если в кабеле на этапе производства были заложены оптические линии связи, то их можно использовать для передачи информации.
- Если контролируемая кабельная линия проложена в пределах городской застройки, то для передачи информации можно использовать средства GSM телефонии.
- В случае крайней необходимости и недоступности перечисленных каналов связи приходится создавать и использовать радиоканалы различных частотных диапазонов.

При использовании каналов связи любого типа для передачи информации от приборов систем мониторинга в общий АРМ приходится устанавливать специализированные приемопередатчики или модемы, которые тоже увеличат стоимость системы.

Также необходимо учитывать, что для организации питания таких приемопередатчиков потребуется дополнительная энергия. Для этой цели мощность используемых в системе мониторинга автономных блоков питания придется увеличивать, иногда значительно, а это потребует дополнительных материальных затрат.

4. Назначение программных средств системы мониторинга - управление эксплуатацией кабельных линий.

Внедрение любых диагностических систем мониторинга всегда требует материальных вложений, чаще всего значительных. В качестве результата внедрения таких систем эксплуатационный персонал ожидает получения готовой экспертной информации, которая позволит ему, как минимум, уменьшить аварийность контролируемого оборудования, а в лучшем случае еще и сократить затраты на текущую эксплуатацию оборудования. Только в этом случае можно ожидать, что затраты на внедрение системы мониторинга окупятся.

4.1. Общие требования к специализированному программному обеспечению мониторинга.

4.1.1. Для повышения эффективности системы управления эксплуатацией оборудования персонал надеется получать от системы мониторинга ответы на следующие практически значимые вопросы:

- Определение текущего технического состояния оборудования, оцененное в понятных категориях качества, например, при помощи цветов стандартного светофора.
- Оценка практической возможности дальнейшей безаварийной эксплуатации кабельной линии, даже с учетом того, что в ней могут быть выявлены признаки каких-либо дефектных состояний.
- Расчет оптимальных сроков и объемов необходимых ремонтных и сервисных работ, выполненный с использованием современных алгоритмов предиктивной аналитики.

Подразумевается, что получение этих интегральных диагностических и эксплуатационных параметров не будет требовать от персонала специализированной подготовки и дополнительной «ручной» обработки информации. Для этого в программное обеспечение приборов системы

мониторинга должно быть включено экспертное ядро, которое будет в автоматическом режиме анализировать информацию от датчиков частичных разрядов и контролируемых технологических параметров.

Требования к параметрам и возможностям экспертного ядра программного обеспечения системы мониторинга:

- Информация, получаемая пользователем от системы мониторинга, должна быть не простым набором «сырых» данных, состоящим из измеренных прибором технологических параметров оборудования. В дополнение к исходной информации должны быть представлены уже готовые интегральные и экспертные параметры, реально и понятно отражающие текущее состояние кабельной линии.
- Для получения необходимых диагностических и эксплуатационных заключений не должны требоваться длительная (и даже не длительная) обработка получаемой информации и привлечение подготовленных экспертов. Все заключения должны подготавливаться программным обеспечением полностью в автоматическом режиме, вплоть до формирования готовых отчетных документов.

Все рассматриваемые ниже приборы контроля и анализа частичных разрядов имеют набор таких диагностических функций. Это делает их законченными интеллектуальными устройствами, не требующими использования в АРМ более высокого уровня дополнительных экспертных систем.

4.1.2. Очень важным является вопрос эффективного распределения экспертных алгоритмов и программ по различным уровням общей структуры системы мониторинга кабельной линии.

Возможны два подхода к решению этого вопроса и, что является очевидным, оба они могут привести к одинаково положительному диагностическому результату:

- В первом варианте все экспертное программное обеспечение централизованно располагается в компьютере верхнего уровня единого АРМ системы мониторинга.
- Второе решение предусматривает иерархическое рассредоточение экспертных алгоритмов между центральным АРМ и всеми диагностическими приборами, распределенными вдоль кабельной линии.

Определяющим является сложность и устойчивость работы программного обеспечения, уровень загрузки и зависимость работоспособности экспертной системы от параметров каналов связи между приборами.

Оптимальным с этой точки зрения является использование второго варианта распределения экспертных алгоритмов, который предусматривает создание распределенной иерархической структуры экспертных и диагностических алгоритмов системы мониторинга.

К достоинствам такой организации программного обеспечения системы мониторинга можно отнести следующее:

- Все экспертные алгоритмы располагаются на том уровне технических средств, который соответствует уровню решаемой диагностической задачи. В этом случае они находятся максимально близко к точке входа необходимой первичной информации о состоянии кабельной линии в систему мониторинга. Например, диагностику дефектов и оценку технического состояния кабельной муфты лучше проводить в приборе, который регистрирует частичные разряды в этой муфте. В этом

случае на верхний уровень системы мониторинга передается не простой набор измеренных первичных параметров, а итоговая информация о техническом состоянии муфты. В результате объем передаваемой по каналам связи информации сокращается на несколько порядков.

- На более высоком диагностическом уровне используются алгоритмы поиска дефектов, которые требуют анализа информации от нескольких измерительных приборов. Например, это некоторые алгоритмы локализации дефектов, возникших на участке кабельной линии, контролируемом с двух сторон двумя приборами. Такие экспертные программы также располагаются в диагностических приборах и используются по мере необходимости.
- На верхнем уровне, на компьютере АРМ системы мониторинга должны располагаться диагностические алгоритмы, отвечающие за управление эксплуатацией всей кабельной линии. В первую очередь они должны интегрировать информацию, полученную от приборов, расположенных вдоль линии, формируя комплексное диагностическое заключение о состоянии изоляции всей кабельной линии.
- Если в системе мониторинга реализованы контроль частичных разрядов и распределенный мониторинг температуры кабелей, то экспертная система должна объединять результаты использования этих диагностических методов. Это позволит более точно локализовать место возникновения дефекта.

Такое распределение экспертных диагностических алгоритмов позволяет оптимизировать их состав и распределение в технических средствах систем мониторинга.

4.1.3. Каково влияние использования экспертных диагностических систем на общую стоимость поставки систем мониторинга?

Конечно, разработка экспертами автоматизированных диагностических систем или обучение систем искусственного интеллекта (в зависимости от пути, который выберут создатели такого программного обеспечения) стоит дорого и занимает много времени.

Самое главное, что необходимо понимать: эти затраты максимальны на этапе разработки, дальнейшее поддержание и совершенствование экспертной системы будет существенно дешевле.

С техническими средствами систем мониторинга дело обстоит несколько иначе: и начальная разработка, и дальнейшее их изготовление для каждой поставки стоит больших денег.

Если брать за основу для сравнения итоговую информативность работы системы мониторинга, состоящей из технических и экспертных средств, то можно выделить несколько основных аспектов:

- Увеличение информативности работы системы за счет технических средств потребует увеличения количества контролируемых параметров и практически пропорционально увеличит стоимость поставки системы мониторинга.
- Увеличение информативности работы за счет совершенствования экспертного программного обеспечения при серийных поставках увеличит стоимость поставки, но не так значительно.
- Система мониторинга, в которой делается акцент на использование современных диагностических

алгоритмов, в итоге оказывается дешевле, чем система, в которой равная информативность достигается за счет контроля большого количества исходных параметров.

Естественно, что такое сравнение справедливо «в рамках разумного» сочетания свойств и параметров. Никакая экспертная система не сможет работать при отсутствии необходимой первичной информации, и наоборот, современная система непрерывного контроля не будет востребована, если она будет реализована без использования компьютерной техники.

4.2. Диагностика дефектов в изоляции кабельной линии и оценка текущего технического состояния

4.2.1. При помощи встроенных диагностических алгоритмов экспертные системы измерительных приборов должны проводить эффективную обработку первичной информации от датчиков.

Экспертные алгоритмы выполняют следующие функции:

- Осуществляют максимально эффективное выделение информативных импульсов частичных разрядов на фоне даже очень высокого уровня электромагнитных импульсных помех в кабельной линии. Для этого в приборах должна использоваться синхронная регистрация сигналов от всех датчиков частичных разрядов, синхронизация процесса регистрации с питающим напряжением. Фильтрации помех способствует контроль формы и частотных параметров зарегистрированных импульсов.

- Выполняют расчет интегральных параметров зарегистрированных импульсов частичных разрядов, описывающих суммарную энергетическую активность дефектных зон в изоляции. Рассчитывают временные зависимости (тренды) параметров частичных разрядов в процессе эксплуатации кабельной линии.

- Определяют тип дефекта в изоляции, являющегося источником частичных разрядов, оценивают степень его опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии. Выявление типа дефекта в приборах производится с использованием стандартных образов дефектных распределений импульсов частичных разрядов относительно синусоиды питающей сети. Такие распределения являются характерными для каждого возможного типа дефекта и хранятся в памяти приборов. Также для каждого выявленного дефекта определяется скорость его развития, рассчитанная в режиме мониторинга.

- Контролируют температуру поверхности кабельной линии и муфт в местах установки датчиков температуры: в процессе эксплуатации она может возрасти на последних этапах развития и модификации дефекта в изоляции кабеля или муфты.

Наличие или отсутствие признаков дефектных состояний, выявляемых экспертной диагностической системой, является важным признаком изменения технического состояния изоляции кабельной линии.

4.2.2. Оценка технического состояния изоляции кабельной линии является важной функцией работы системы мониторинга.

Итогом работы всего комплекса встроенных экспертных диагностических алгоритмов системы мониторинга кабельной линии является расчетный коэффициент текущего технического состояния изоляции кабельной линии $K_{ТТС}$. Этот коэффициент рассчитывается на основании исходных значений технологических параметров линии, выявленных признаков дефектных состояний в изоляции

муфт и кабеля, а также на основании расчета скорости их развития в процессе эксплуатации.

Для этого оценка текущего технического состояния кабельной линии, т.е. расчет коэффициента $K_{ТТС}$, производится в три этапа.

- На первом этапе расчета этого важного коэффициента проводится параметрическая диагностика, т.е. сравнение зарегистрированных параметров с заданными пороговыми значениями. Применительно к высоковольтным кабельным линиям производится сравнение рабочих температур кабелей и муфт с допустимыми значениями. При таком сравнении необходимо учитывать, что все датчики температуры обычно располагаются на поверхности главной изоляции, поэтому всегда приходится делать перерасчет на максимальную температуру изоляции вблизи токоведущей жилы.

- На втором этапе оценки, если экспертной системой были выявлены признаки тех или иных дефектов в изоляции линии, производится оценка степени их опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии. Для такой оценки используется составленная экспертами таблица сравнительной опасности выявленных дефектов.

- Очень важным диагностическим признаком ухудшения технического состояния кабельной линии является наличие изменений в степени развития выявленных дефектных состояний. Дефект, параметры которого стабильны во времени, менее опасен, чем тот дефект, который развивается. Чем выше скорость развития признаков дефектных состояний, тем опаснее дефект. Выявить наличие признаков стабильности или развития дефектных состояний в изоляции можно только при помощи систем непрерывного контроля, разовые измерения, выполняемые переносными приборами, такой информации не дадут.

Использование такого трехступенчатого расчета позволяет достаточно корректно оценить текущее техническое состояние кабельной линии.

4.3. Определение остаточного ресурса и управление эксплуатацией кабельной линии по техническому состоянию

После получения эксплуатационным персоналом величины расчетного коэффициента текущего технического состояния всегда задается один и тот же вопрос: «А можно ли дальше безаварийно эксплуатировать эту кабельную линию, а если можно, то как долго?».

Для ответа на этот вопрос в состав экспертного программного обеспечения должны входить алгоритмы расчета прогнозной скорости развития коэффициента технического состояния данной кабельной линии на будущих этапах эксплуатации кабельной линии.

Для прогнозирования скорости возможного изменения (ухудшения) технического состояния контролируемой кабельной линии в процессе будущей эксплуатации в программном обеспечении системы мониторинга необходимо использовать целый набор самонастраивающихся математических моделей и уникальных алгоритмов предиктивной аналитики.

В первую очередь, в программном обеспечении на основании текущих и архивных значений контролируемых параметров кабельной линии и отдельных ее элементов должны автоматически создаваться соответствующие цифровые двойники. Цифровой двойник кабельной линии -

это специализированная математическая модель, которая максимально корректно описывает как текущее техническое состояние линии, так и его прогнозируемые изменения на последующих этапах эксплуатации. Это дает возможность при помощи цифрового двойника максимально корректно «заглядывать в будущее».

Цифровой двойник каждой кабельной линии является уникальным, так как он должен учитывать основные конструктивные особенности линии, реальные условия ее эксплуатации и наличие выявленных встроенной экспертной диагностической системой признаков различных дефектных состояний.

Максимальное значение при создании цифрового двойника имеет наличие или отсутствие в изоляции кабельной линии выявленных экспертной системой признаков дефектных состояний, наличие трендов в изменении их интенсивности. Это особенно важно для кабельных линий потому, что скорость развития различных дефектов в изоляции очень сильно различается.

Степень влияния этих дефектов на параметры цифрового двойника линии во многом определяется реальной степенью опасности дефектов. По мере развития параметров дефектных состояний в изоляции кабельной линии параметры цифрового двойника линии приходится в автоматическом режиме оперативно корректировать.

Наличие адаптивного цифрового двойника кабельной линии позволяет постоянно формировать реальные рекомендации по дальнейшей безаварийной эксплуатации оборудования. На основании таких расчетов может быть определено оставшееся допустимое время, в течение которого кабельная линия, даже уже имеющая признаки наличия дефектных состояний, может безопасно эксплуатироваться.

В силу того, что реальное время развития дефектов разного типа в высоковольтной изоляции кабельных линий из сшитого полиэтилена очень сильно зависит от типа дефекта и может сильно различаться, расчетное прогнозируемое время безаварийной работы линии, автоматически рассчитанное экспертной системой, иногда может быть очень небольшим.

В соответствии с оптимальной структурой распределения экспертных алгоритмов на разных уровнях системы мониторинга, меняется их назначение. В локальных приборах рассчитываются прогнозные параметры муфт и контролируемых участков линии. На уровне АРМ решаются вопросы интегральной оценки прогнозных параметров всей контролируемой кабельной линии.

5. Технические средства для создания систем мониторинга высоковольтных кабельных линий.

Полный набор технических средств, необходимых для создания комплексных систем диагностического мониторинга высоковольтных кабельных линий, включает в себя три группы оборудования:

- Измерительное диагностическое оборудование, предназначенное для регистрации и анализа импульсов частичных разрядов. В состав программного обеспечения этого оборудования должны входить экспертные системы, созданные на основании различных диагностических и прогнозных алгоритмов.
- Датчики первичных параметров, предназначенные для сбора информации о текущем техническом состоянии кабельных линий. Это датчики частичных разрядов,

различные датчики температуры, контактные, бесконтактные, а также датчики температуры в виде распределенного оптического волокна в экране кабеля.

- Вспомогательные технические средства, необходимые для работы систем мониторинга кабельных линий. В основном это специализированные автономные источники питания и приемопередатчики информации проводных и беспроводных интерфейсов связи. Эти приемопередатчики предназначены для организации каналов передачи информации между распределенными вдоль линии приборами и в комплексные системы АСУ-ТП предприятия.

В данном разделе приведен краткий обзор технических средств, которые фирма РУСОВ наиболее часто использует при создании систем диагностического мониторинга кабельных линий.

5.1. Приборы для регистрации параметров и экспертного анализа технического состояния кабельных линий

5.1.1. Базовым прибором для создания систем мониторинга высоковольтных кабельных линий с рабочим напряжением от 6 до 500 кВ служит шестиканальный измерительный прибор марки CDM-6, внешний вид которого показан на рисунке 2. Прибор предназначен для монтажа в защитном шкафу.



Рис. 2. Прибор марки CDM-6 для мониторинга кабельных линий по частичным разрядам.

Техническими достоинствами диагностического прибора системы мониторинга марки CDM-6 являются:

- Регистрация импульсов частичных разрядов в ВЧ диапазоне частот, позволяющая из одной точки надежно контролировать техническое состояние высоковольтной кабельной линии длиной до 2 км (\pm в каждую сторону от места установки датчика, если прибор установлен на линии в пункте транспозиции экранов).
- Наличие в приборе 6 измерительных каналов является оптимальным при организации мониторинга двух высоковольтных кабельных линий, обычно работающих параллельно, по три измерительных канала (датчика) на каждую линию, по одному датчику на фазу.
- Наличие в приборе нескольких входных каналов позволяет реализовать наиболее эффективные измерительные схемы, применяемые для контроля технического состояния трех фаз высоковольтного кабеля в промежуточных точках линии. Эти схемы приведены ниже в разделе практического создания систем мониторинга кабельных линий различной длины.
- В приборе используется синхронная регистрация входных сигналов от всех шести датчиков частичных разрядов. Это позволяет в полной мере использовать возможности самых эффективных алгоритмов:

временных, амплитудных и частотных, предназначенных для отстройки имеющих диагностическое значение частичных разрядов от «шумовых» высокочастотных импульсных помех.

- Возможность регистрации «длинных» рефлектограмм импульсов частичных разрядов, которые включают в себя как исходные импульсы, так и отраженные от соединительных муфт и противоположного конца кабельной линии импульсы. При помощи анализа таких рефлектограмм в программном обеспечении прибора автоматически производится локализация места возникновения дефекта по длине кабельной линии.

Для создания различных систем мониторинга приборы марки CDM выпускаются с разным количеством входных каналов, от 6 до 45. Это позволяет создавать при помощи одного базового измерительного прибора системы мониторинга, дополненного встроенным электронным коммутатором входных каналов, создавать системы мониторинга разного количества кабельных линий.

Когда в одной кабельной сборке или в одном КРУ подклучено большое количество кабельных линий, то использование одного многоканального прибора позволяет уменьшить приведенную стоимость технических средств, используемых для контроля одной кабельной линии. При этом информативность работы системы мониторинга не уменьшается.

От других диагностических приборов, представленных на отечественном рынке и предназначенных для организации мониторинга высоковольтных кабельных линий, прибор CDM-6 отличает наличие встроенной в программное обеспечение многоплановой экспертной системы.

При помощи этой системы в CDM-6 производятся:

- Определение типа дефекта, являющегося источником зарегистрированных частичных разрядов. Такая диагностика производится с использованием встроенной библиотеки фазо-частотных образов наиболее часто встречающихся дефектов в изоляции кабельных линий.
- Оценивается степень опасности выявленного дефекта для дальнейшей безаварийной работы кабельной линии. Такая оценка производится на основании анализа типа дефекта, степени и скорости его развития.
- Итоговым результатом работы экспертной части прибора CDM-6 является не набор измеренных параметров частичных разрядов, а обобщенный интегральный коэффициент текущего технического состояния $K_{ТТС}$ кабельной линии.

5.1.2. Если речь идет не о создании системы мониторинга кабельной линии, а об организации локального контроля только одной муфты, то оптимальным решением является использование беспроводного диагностического прибора марки МКМ-2.

Этот компактный прибор, показанный на рисунке 3, необходимо использовать в том случае, когда муфту по определенным параметрам считают находящейся в тревожном состоянии, или она нуждается в дополнительном контроле после первичного монтажа или же после проведенного ремонта.

Основные конструктивные особенности и параметры прибора мониторинга марки МКМ-2:

- Корпус прибора марки МКМ-2 имеет защищенное беспроводное исполнение, к нему не нужно подключать кабель для внешнего питания встроенной электроники. Вся энергию прибор получает электромагнитным путем

от полей, наведенных вокруг кабеля рабочими токами в жиле. Для этого контролируемая муфта или кабель охватывается гибким разъемным магнитопроводом. Такая реализация источника питания прибора МКМ-2 возможна только для трехфазных линий из однофазных кабелей. В кабельных линиях с тремя фазами в одной оболочке рабочие токи фаз взаимно вычитаются и внешнее поле не создается.

- Для передачи информации о техническом состоянии кабельной муфты и кабельной линии в приборе марки МКМ-2 используется беспроводной интерфейс Bluetooth. Это позволяет получать информацию в радиусе 50 метров при помощи обычных смартфонов и планшетов, оснащенных этим интерфейсом. Если предполагается передавать информацию в систему АСУ-ТП, то необходимо использовать специализированные приемники интерфейса Bluetooth, включенные в сети передачи данных.

Для сбора первичной информации о техническом



Рис. 3. Прибор марки МКМ-2 для контроля технического состояния кабельных муфт

состоянии кабельной муфты в приборе МКМ-2 используются датчики трех типов.

- Техническое состояние изоляции муфты и прилегающих к муфте участков кабельной линии контролируется при помощи высокочастотного трансформаторного датчика частичных разрядов марки RFCT-8, монтируемого на поводке заземления экрана.
- Дополнительный локальный контроль импульсов частичных разрядов непосредственно внутри кабельной муфты производится при помощи двух встроенных в прибор акустических датчиков, один из которых является резонансным, а второй широкополосным.
- Контроль температуры поверхности кабельной муфты (кабельной линии в месте установки прибора), которая может повышаться на финальных стадиях развития дефектов, производится при помощи встроенного в корпус прибора температурного датчика.

Достоинством прибора МКМ-2 является его мобильность: прибор можно, по мере необходимости, легко монтировать и демонтировать на кабельных муфтах, максимально нуждающихся в дополнительном контроле.

Практика эксплуатации кабельных линий показывает, что наиболее часто выход из строя кабельных муфт происходит в первые несколько месяцев после ввода их в эксплуатацию. Благодаря особенностям конструкции и удобству монтажа-демонтажа, прибор МКМ-2 удобно использовать в качестве мобильной системы диагностики, оперативно устанавливая его на вновь вводимых в эксплуатацию муфтах. В этом случае прибор может являться элементом системы приемо-сдаточных испытаний кабельных линий.

Прибор марки МКМ-2 также является интеллектуальным устройством, в котором реализована эффективная экспертная диагностическая система, комплексно сочетающая в себе возможности и алгоритмы диагностической и предиктивной аналитики.

При помощи встроенных диагностических алгоритмов экспертная система прибора МКМ-2 может решать следующие задачи:

- Проводить максимально эффективное выделение информативных импульсов частичных разрядов на фоне даже очень высокого уровня электромагнитных импульсных помех в кабельной линии.
- Выполнять расчет интегральных параметров зарегистрированных импульсов частичных разрядов, описывающих суммарную энергетическую активность дефектных зон в изоляции, производить расчет параметров временных трендов.
- Определять тип дефекта в изоляции, являющегося источником частичных разрядов, оценивать степень его развития и опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии. Выявление типа дефекта производится с использованием стандартных образов распределения импульсов частичных разрядов относительно синусоиды питающей сети.
- Контролировать температуру поверхности кабельной линии в месте установки прибора МКМ-2: температура может возрасти на последних этапах развития дефекта в изоляции кабельной муфты.

Текущим итогом работы всего комплекса встроенных экспертных диагностических алгоритмов прибора МКМ-2 является расчетный коэффициент текущего технического состояния изоляции кабельной линии K_{TTC} , рассчитанный на основании выявленных дефектов и оценки степени эксплуатационной опасности этих дефектов для дальнейшей работы кабельной линии.

Создание в программном обеспечении прибора адаптивного цифрового двойника кабельной муфты позволяет формировать рекомендации по дальнейшей безаварийной эксплуатации оборудования. Поэтому результатом работы прибора МКМ-2 является не только техническое заключение о состоянии контролируемой муфты. В отчете с результатами работы встроенной в прибор экспертной диагностической программы приводится расчетная информация о возможном остаточном сроке безаварийной работы кабельной муфты.

5.1.3. В отличие от прибора мониторинга марки CDM, который является полностью законченным техническим решением, включающим в себя интерфейсы передачи информации в систему АСУ-ТП, прибор МКМ-2 является минимальным по составу техническим решением. Это сделано для уменьшения стоимости прибора. По этой причине он имеет в своем составе только беспроводной интерфейс Bluetooth с возможностью передачи информации на расстояние в несколько десятков метров.

Для решения задачи передачи информации от МКМ-2 в систему АСУ-ТП используется интегрирующий прибор - приемопередатчик марки МКМ, показанный на рисунке 4. Этот прибор может собирать информацию от нескольких приборов контроля кабельных муфт МКМ-2, а также от любых других устройств и датчиков, использующих беспроводной интерфейс связи, например, беспроводных датчиков температуры BDM/T.

Полученную от первичных датчиков информацию интегрирующий прибор марки МКМ может, используя запрограммированные диагностические алгоритмы,

дополнительно обработать и отобразить на своем экране в удобном для персонала виде.



Рис. 4. Интегрирующий прибор марки МКМ.

5.2. Датчики для измерения частичных разрядов и технологических параметров кабельных линий

5.2.1. Для регистрации импульсов частичных разрядов в ВЧ диапазоне частот наибольшее распространение получили высокочастотные трансформаторы тока марки RFCT, сердечник которых выполнен из феррита.

Благодаря использованию такого материала сердечника датчики RFCT не чувствительны к токам промышленной частоты, а в протекающем через них токе выделяют только импульсы с частотой от сотен килогерц до полутора десятков мегагерц.

Для регистрации частичных разрядов в изоляции кабельных линий, для удобства оперативного монтажа, такие датчики обычно имеют разъемный сердечник, позволяющий устанавливать их на проводниках заземления муфт и экранов кабелей без отключения заземляющих проводников и шин.

Наиболее часто для измерения частичных разрядов в изоляции кабельных линий используется датчик марки RFCT-7 в разъемном пластиковом корпусе, внешний вид которого показан на рисунке 5.



Рис. 5. Датчик частичных разрядов марки RFCT-7 с пластиковым разъемным корпусом.

Датчик RFCT-7 имеет две конструктивные модификации, позволяющие устанавливать его на проводниках и шинах заземления, по которым возможно длительное протекание токов промышленной частоты величиной 0,5 и 1,0 кА. Необходимо учитывать, что при протекании больших токов возникает насыщение магнитопровода датчика, изменяется его проницаемость, в результате чего уменьшается чувствительность датчика и искажается форма передаваемых импульсов частичных разрядов.

Технологически датчик регистрации частичных разрядов марки RFCT-7 предназначен для монтажа внутри помещений, потому что его пластиковый корпус не выдерживает длительное воздействие ультрафиолетового (солнечного) излучения.

5.2.2. Для использования в системах мониторинга высоковольтных кабельных линий наружной прокладки необходимо использовать датчики, специально предназначенные для этого. Корпуса таких датчиков должны иметь защищенное, лучше металлическое промышленное исполнение, и быть стойкими к влиянию ультрафиолетового излучения.

Для этих целей фирмой ДИМРУС небольшими партиями изготавливается несколько модификаций датчиков марки RFCT, имеющих металлический защитный корпус и различные конструктивные параметры. Корпуса таких разъемных датчиков имеют различные размеры, в зависимости от предполагаемого места монтажа датчиков на контролируемой кабельной линии.

Максимальный размер внутреннего квадратного окна датчика, выпускаемого фирмой ДИМРУС и предназначенного для монтажа на токопроводах и конструктивных элементах, составляет до 87*164 мм. Для установки на токопроводах и проводах заземления датчики имеют круглое внутреннее окно, максимальный диаметр которого составляет до 140 мм. Такие датчики имеют сравнительно высокую стоимость из-за сложности изготовления металлического разъемного корпуса и уникальности большого ферритового сердечника.

Для наружной установки также используется серийный универсальный датчик частичных разрядов марки RFCT-8, показанный на рисунке 6. Он имеет литой металлический корпус разъемной конструкции и предназначен для открытого монтажа на большинстве контролируемых кабельных линий.



Рис. 6. Датчик частичных разрядов RFCT-8 с разъемным металлическим корпусом.

5.2.3. Кроме контроля частичных разрядов в изоляции кабельных линий для уточнения экспертной оценки технического состояния достаточно информативным является контроль локальной температуры муфт и кабелей в зонах, в которых возможно возникновение дефектных изменений в изоляции. Наиболее эффективно такой контроль также должен проводиться при помощи систем мониторинга.

Использование контактных датчиков температуры, монтируемых на поверхности кабельных муфт, на первый взгляд кажется самым простым решением, но на практике это не всегда надежно и безопасно. Это происходит потому, что в процессе коммутаций кабельной линии, а также при протекании по ней сквозных токов короткого замыкания, на

поверхности муфты (кабеля) возникают большие импульсные потенциалы, до десятков киловольт.

Это высокое импульсное напряжение будет приложено к корпусу датчика температуры по отношению к корпусу измерительного прибора, имеющего заземленную конструкцию. В результате может произойти выход из строя или температурного датчика, или даже измерительного прибора системы мониторинга.

Оптимальным с точки зрения безопасности является использование беспроводных контактных датчиков температуры, питающихся от энергии электромагнитного поля работающего кабеля. Примером такого датчика является BDM/T, выпускаемый фирмой ДИМРУС. Такие датчики температуры достаточно дешевы и надежно работают в условиях эксплуатации высоковольтных кабельных линий.

Также эффективно использование для целей контроля температуры муфт кабельных линий дистанционных тепловизоров, позволяющих контролировать не температуру в точке установки датчика, а распределение температуры по поверхности контролируемой кабельной муфты.



Рис. 7. Беспроводной датчик температуры марки BDM/T и дистанционный датчик марки IRT для контроля температурного поля кабельной муфты.

Примером такого бюджетного решения для дистанционного контроля кабельных муфт является температурный датчик марки IRT, являющийся простейшим тепловизором с разрешением 24 на 36 зон, который подключается к прибору системы мониторинга по проводному интерфейсу RS-485. При помощи этого датчика контролируется не температура в точке, а распределение температурного поля, что более информативно для диагностической системы мониторинга.

5.2.4. Система оперативного контроля температурного профиля кабельной линии.

Еще одним вариантом контроля температурных режимов кабельных линий является использование системы распределенного измерения температуры линии. Такая система работает на основании измерения распределенной температуры оптического проводника, заложенного в зону экрана кабеля на этапе производства.

Высокое пространственное разрешение такой системы, достигающее одного метра при длине кабельной линии в десятки километров, позволяет не только использовать полученную информацию для контроля технологических режимов работы кабельной линии по участкам, но и в ряде случаев достаточно корректно выявлять дефектные зоны с локальными перегревами.

Обычно такая система контроля температуры кабельной линии устанавливается автономно, а полученная информация передается и используется в составе комплексной системы мониторинга. Существуют варианты

комплексного использования систем контроля частичных разрядов и температурного профиля кабельной линии.

Поскольку оптическое волокно обычно уже установлено в высоковольтные кабели на этапе производства, то для организации системы распределенного контроля температуры необходимо только подключить к оптоволокну внешний измерительный прибор.

Практически значимым недостатком системы оптоволоконного контроля профиля температуры высоковольтной кабельной линии является то, что измерительный лазерный диагностический прибор, необходимый для этой цели, имеет высокую цену. По этой причине оптоволоконная система температурного мониторинга обычно используется только для ответственных кабельных линий с рабочим напряжением 110 кВ и выше.

6. Дополнительное оборудование, необходимое для создания систем мониторинга высоковольтных кабельных линий

6.1. Источник питания оборудования системы мониторинга от рабочих токов в жиле кабеля.

Как уже указывалось выше, при создании систем мониторинга высоковольтных, особенно длинных, кабельных линий, приходится решать две специфические технические задачи, связанные с тем, что диагностическое оборудование приходится устанавливать в различных точках контролируемой линии. При этом в некоторых точках установки оборудования системы мониторинга, особенно в промежуточных точках контролируемой линии, возникают сложности с организацией питания электроники приборов и передачей информации в АРМ мониторинга и далее в систему АСУ-ТП.

Специализированное оборудование, описанное в этом разделе, специально разработано для организации питания диагностических приборов и организации информационного обмена в местах, где отсутствует доступное оперативное постоянное или переменное напряжение.

Это оборудование используется в качестве дополнения к диагностическим приборам марки МКМ-2 и СДМ-6 и предназначено для повышения их функциональности при создании систем мониторинга высоковольтных кабельных линий подземной и наружной прокладки.

6.3.1. Автономный трансформаторный блок питания марки PLST, который работает от энергии электромагнитного поля, возникающего вокруг кабеля при протекании рабочего тока по центральной жиле кабеля.

Блок питания PLST состоит из двух конструктивных элементов. Источником энергии в блоке питания является специализированный трансформатор тока промышленной частоты с разъемным сердечником. Этот трансформатор устанавливается на поверхности кабеля рядом с муфтой. Таких трансформаторов может быть установлено несколько в зависимости от того, какова должна быть мощность источника питания.

При помощи кабеля трансформатор (трансформаторы) подключается к второму блоку источника питания, называемому PLST, одна из модификаций которого показана на рисунке 8.

Если рабочие токи в жиле кабеля будут меньше 50-100 А, и получаемой при этом энергии будет недостаточно для непрерывной работы системы мониторинга, то блок PLST

сначала будет работать в режиме накопления энергии. При достижении необходимого напряжения на встроенных накопителях энергии модуль автоматически подает напряжение питания на диагностические приборы и устройства связи.

Параметры встроенного накопителя в блоке питания выбраны таким образом, чтобы запасенной энергии хватило на полный цикл проведения замера параметров кабельной линии, экспертной обработки полученной информации и ее передачи в систему АСУ-ТП предприятия. После этого цикл зарядки внутреннего накопителя энергии автоматически повторяется.



Рис. 8. Блок питания марки PLST, работающий от рабочих токов в жиле кабеля.

Такой блок питания чаще всего используется при подземной прокладке кабельной линии. Трансформаторы устанавливаются на этапе монтажа линии на поверхности фазных кабелей, которые обычно прокладываются вне транспозиционных кабельных колодцев. Сам блок PLST с встроенными накопителями располагается в самом колодце и служит для питания диагностических приборов и модемов связи.

6.2. Оборудование для передачи информации от распределенных диагностических приборов.

Приемопередатчик марки PLS для организации проводных и беспроводных каналов, служащих для передачи информации о техническом состоянии кабельной линии от диагностических приборов в систему АСУ-ТП.

В качестве дополнительного приемопередатчика и преобразователя интерфейсов связи в системах мониторинга кабельных линий, создаваемых на основе приборов МКМ-2 и СДМ-6, используется устройство PLS, одна из модификаций которого показана на рисунке 9.

Основное назначение устройства PLS: сбор первичной и экспертной информации от диагностических приборов, расположенных в точке контроля параметров кабельной линии, включая беспроводные датчики температуры, и передача ее на общий АРМ системы мониторинга и далее в систему АСУ-ТП предприятия.

В приемопередатчике марки PLS технически и программно реализованы три наиболее часто используемых интерфейса связи:

- Проводной гальванически изолированный интерфейс связи марки RS-485. Он предназначен для подключения к приемопередатчику PLS диагностического прибора марки СДМ-6. Вторым назначением этого универсального интерфейса является использование его для подключения различных дополнительных внешних

модемов, предназначенных, например, для передачи информации по оптическому волокну в кабеле или по радиоканалу.

- Беспроводной интерфейс связи марки Bluetooth, предназначенный для сбора информации от приборов марки МКМ-2 и других беспроводных датчиков, например, датчиков температуры марки BDM/Т. Этот интерфейс связи позволяет эксплуатационному персоналу оперативно просматривать информацию от всех диагностических приборов, включая CDM-6, (подключаемые к PLS при помощи интерфейса RS-485) при помощи обычного смартфона или планшета.

- В приемопередатчик PLS конструктивно встроен модем телефонной связи GSM. При помощи этого интерфейса связи можно осуществлять двухсторонний обмен информацией с использованием существующих телефонных каналов.



Рис. 9. Приемопередатчик марки PLS для организации обмена информацией с АСУ-ТП.

К устройству PLS можно подключать внешний модем, при помощи которого будет передаваться информация по оптическому волокну, проложенному в зоне экрана высоковольтного кабеля. Этот вариант является практически единственным, реально доступным для организации обмена информацией при подземной прокладке кабельных линий и установке диагностического оборудования в подземных колодцах транспозиции экранов фазных кабелей.

При помощи внешнего модема, подключенного к устройству PLS, также может быть организована передача информации по радиоканалу, если контролируемая кабельная линия открыто проложена по эстакаде.

7. Примеры реализации систем мониторинга, предназначенных для контроля кабельных муфт

В этом разделе рассмотрены особенности организации систем непрерывного диагностического контроля кабельных муфт, дефекты в которых являются наиболее частой причиной выхода из строя высоковольтных кабельных линий.

3.1. Система мониторинга критической кабельной муфты при помощи прибора МКМ-2

При помощи прибора МКМ-2 может быть реализован самый простой и оперативный способ организации непрерывного контроля изоляции кабельной муфты, по

каким-либо причинам находящейся в тревожном или критическом состоянии.

Непрерывный контроль технического состояния такой муфты нужен потому, что если проводить периодические измерения параметров технического состояния муфты переносными приборами, то велика вероятность пропустить момент развития дефекта до аварийного уровня, особенно в кабельных линиях с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Пример использования прибора МКМ-2 для создания системы локального мониторинга одной кабельной муфты показан на рисунке 10.

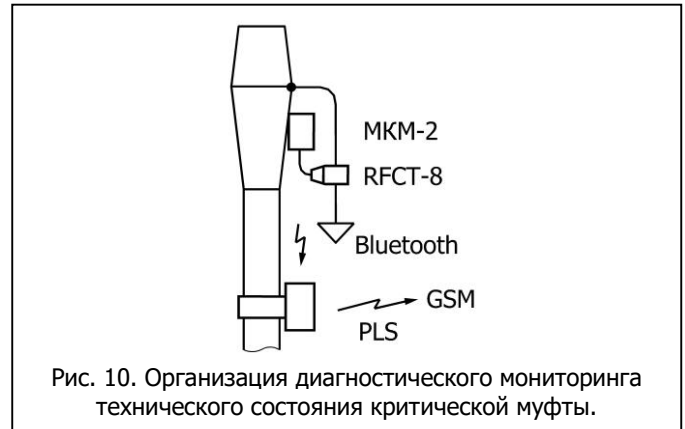


Рис. 10. Организация диагностического мониторинга технического состояния критической муфты.

Прибор МКМ-2 монтируется или непосредственно на корпусе контролируемой муфты, или на поверхности кабельной линии максимально близко к муфте при помощи внешнего магнитопровода, являющегося конструктивным элементом монтажа прибора. На проводке заземления муфты устанавливается разъемный датчик RFCT-8, который подключается к разъему на приборе МКМ-2.

После этого система мониторинга кабельной муфты, созданная на основе прибора МКМ-2, готова к работе. При подаче питающего напряжения на кабельную линию и протекании по жиле кабеля рабочего тока прибор МКМ-2 практически сразу начнет работать и контролировать техническое состояние муфты.

Результаты работы экспертной диагностической системы прибора МКМ-2 в виде расчетного коэффициента текущего технического состояния контролируемой муфты $K_{ТТС}$ и остаточного ресурса (допустимого времени безаварийной работы) можно просмотреть на экране смартфона или планшета, оснащенного беспроводным интерфейсом Bluetooth.

Если технологически необходимо передавать информацию о состоянии контролируемой муфты непосредственно в систему АСУ-ТП предприятия, то рядом с приборами МКМ-2, контролирующими состояние муфт, необходимо устанавливать специализированный приемопередатчик беспроводных интерфейсов связи марки PLS, подключенный к системе АСУ-ТП. Конфигурация такой системы мониторинга трех кабельных муфт приведена на рисунке 11.

Для обеспечения питания дополнительного модуля интерфейсов связи марки PLS, в случае отсутствия в точке его установки оперативного постоянного или переменного напряжения, может быть использована стандартная солнечная панель (с контроллером и буферным аккумулятором - БП) или трансформаторный источник питания марки PLST, получающий энергию от рабочих токов в жиле кабеля.

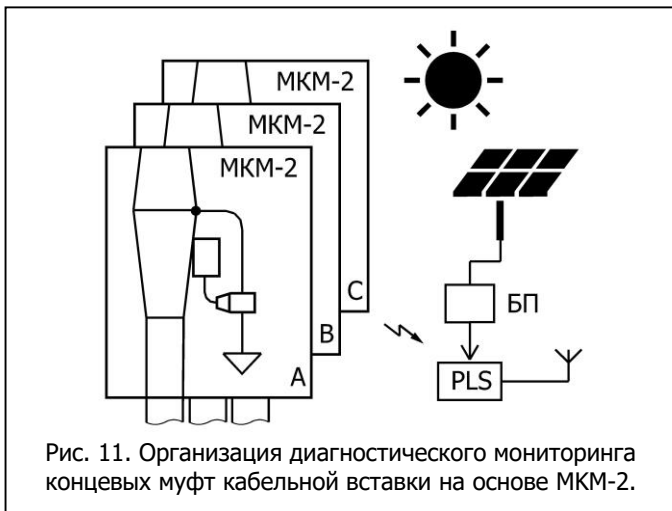


Рис. 11. Организация диагностического мониторинга концевых муфт кабельной вставки на основе МКМ-2.

7.2. Контроль технического состояния трех концевых муфт кабельной вставки

Наиболее сложной по условиям монтажа обычно является система мониторинга концевых муфт кабельной вставки, расположенной «в поле». В этом случае чаще всего муфты располагаются на концевой опоре линии электропередачи, где оперативное напряжение для питания электроники отсутствует. Монтаж системы мониторинга усложняется тем, что в месте расположения кабельной вставки может быть недоступно использование GSM телефонии для передачи информации о состоянии муфт в систему АСУ-ТП.

Пример системы мониторинга трех концевых муфт кабельной вставки приведен на рисунке 12.

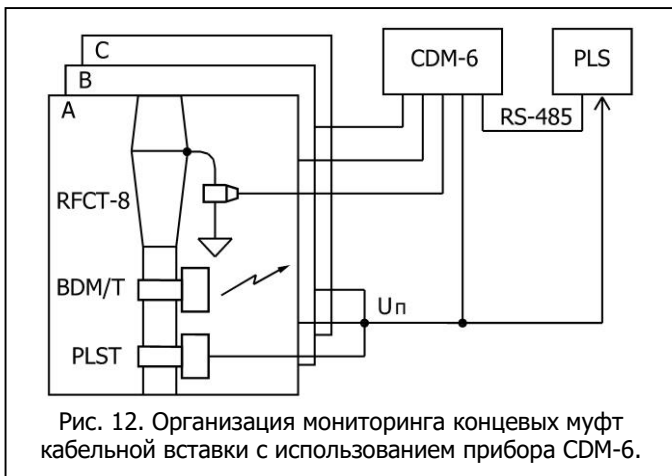


Рис. 12. Организация мониторинга концевых муфт кабельной вставки с использованием прибора CDM-6.

Основу системы мониторинга составляют три прибора марки МКМ-2, установленные на трех концевых муфтах с одной стороны кабельной вставки. К каждому измерительному прибору подключен датчик частичных разрядов марки RFCT-8, установленный на проводнике заземления экрана муфты.

При такой конфигурации технических средств внешний источник напряжения питания не нужен, система мониторинга получает энергию от электромагнитного поля, и сама начинает работать при появлении в фазах кабельной линии рабочих токов нагрузки.

Если предполагается просматривать информацию о техническом состоянии муфт «на месте» оперативным персоналом только при помощи смартфонов с беспроводным интерфейсом Bluetooth, то никаких дополнительных средств для организации передачи

информации не нужно. Диагностические приборы МКМ-2 сами являются передатчиками информации по беспроводному интерфейсу Bluetooth.

Если все же будет необходимо передавать информацию в систему АСУ-ТП, то система мониторинга дополняется приемопередатчиком марки PLS. Этот прибор является беспроводным сборщиком информации от МКМ-2, которую он передает или по GSM каналу, или проводному интерфейсу RS-485, или с использованием дополнительных модулей по оптическому волокну датчика или радиоканалу. Для питания модуля PLS необходимо использовать дополнительный блок питания БП, работающий от солнечной панели, с контроллером заряда и буферным аккумулятором.

Использование трансформаторных датчиков частичных разрядов RFCT-8 для контроля муфт кабельной вставки позволяет, теоретически, контролировать техническое состояние всей кабельной вставки, длина которой обычно не превышает нескольких сотен метров.

Критическим условием для выбора технических средств мониторинга такой модификации будет реальный уровень помех в месте установки диагностических приборов. Если интенсивность помех будет большой, для создания системы мониторинга лучше будет использовать прибор марки CDM-6, при помощи которого можно более эффективно отстраиваться от помех. Пример организации такой системы приведен на рисунке 10.

На рисунке показано, что к общему диагностическому прибору CDM-6 подключаются 3 датчика измерения частичных разрядов марки RFCT-8, которые устанавливаются в цепях заземления экранов кабельных муфт различных фаз кабельной вставки.

Для измерения температуры используются беспроводные датчики контроля BDM/T. Так делается потому, что использование для этой цели тепловизоров марки IRT затруднено из-за высокой вероятности загрязнения оптики при открытом монтаже измерительного оборудования.

Дополнительно к основному прибору CDM-6 в системе мониторинга используется приемопередатчик марки PLS. Этот прибор не только организует передачу информации из системы мониторинга в систему АСУ-ТП, но и дополнительно собирает информацию от беспроводных датчиков температуры. Эта информация позволяет увеличить достоверность диагностических заключений экспертной системы прибора CDM-6, в которых оценивается текущее техническое состояние кабельной линии.

В отличие от системы мониторинга на основе МКМ-2, показанной на рисунке 10, питание приборов CDM-6 и PLS на рисунке 11 организовано с использованием энергии электромагнитного поля, возникающей от рабочих токов, протекающих в жиле кабеля. Для этой цели на поверхности кабелей устанавливаются блоки питания марки PLST. Для обеспечения необходимой выходной мощности все три фазных блока питания могут быть включены на параллельную работу.

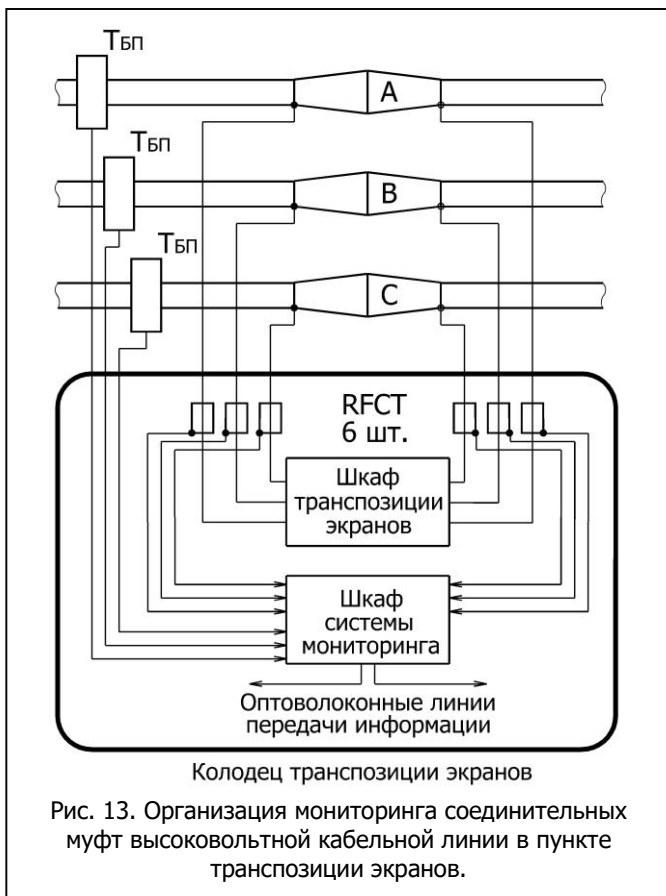
7.3. Контроль технического состояния соединительных муфт в пункте транспозиции экранов кабелей

Для контроля технического состояния промежуточных муфт и самой кабельной линии в пункте транспозиции экранов используется диагностический прибор марки CDM-6. В данном случае он поставляется в герметичном корпусе

и может устанавливаться непосредственно в колодце транспозиции экранов фазных кабелей.

Принципиальная схема размещения технических средств системы диагностического мониторинга кабельных муфт и самого кабеля (± 2 км от места установки датчиков) в промежуточном транспозиционном колодце приведена на рисунке 13.

К прибору CDM-6 подключены шесть датчиков частичных разрядов марки RFCT-8, установленных на проводниках заземления шести кабелей: трех подходящих и трех отходящих. Эти кабели заземления экранов подключены к расположенному в колодце модулю МТЭ для транспозиции экранов фазных кабелей. Соединительные муфты, как и сами кабели, расположены вне транспозиционного колодца.



Такая схема установки шести датчиков частичных разрядов позволяет, используя классический метод «контроля времени прибытия импульсов от двух датчиков», определять направление движения импульсов частичных разрядов через муфту влево или вправо. Это увеличивает точность определения дефектного кабеля, так как дает возможность сказать, где возник дефект: в подходящем или отходящем кабеле, или же непосредственно в соединительной муфте.

Диагностика такого уровня позволяет более дифференцированно и точно локализовать место возникновения дефекта в изоляции, оценить степень его опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии.

Для питания электроники диагностических приборов используются трансформаторные блоки питания приборов марки PLST, устанавливаемые на фазных кабелях. Сам прибор PLST располагается непосредственно в колодце.

От этого же блока питания осуществляется работа модема М, обеспечивающего связь прибора CDM-6 с

системой АСУ-ТП по оптическому волокну, проложенному в фазных кабелях, поскольку другие варианты обмена информацией в этом случае по ряду технических причин недоступны.

В силу особенностей распространения высокочастотных импульсов по кабельной линии прибор CDM-6 одновременно с контролем соединительных муфт контролирует возникновение частичных разрядов и в самом кабеле. Как уже говорилось выше, в этом случае достаточно надежно контролируемая длина кабеля составляет плюс-минус 2 км от места установки датчиков марки RFCT-8. Это расстояние как раз соответствует усредненному расстоянию между колодцами кабельной линии, в которых производится транспозиция экранов кабелей.

По этой причине система мониторинга, показанная на рисунке 12, по своим функциям является универсальной, так как она позволяет контролировать техническое состояние не только соединительных муфт, но и самих высоковольтных кабелей и муфт, расположенных на кабеле на расстоянии до 2 км от места установки датчиков частичных разрядов.

Показанную на рисунке 13 конфигурацию технических средств можно считать базовой для монтажа в транспозиционных колодцах, в дальнейшем она будет обозначаться как МП – промежуточный диагностический модуль системы мониторинга кабельных линий.

8. Примеры реализации комплексной системы мониторинга для кабельных линий различной конфигурации

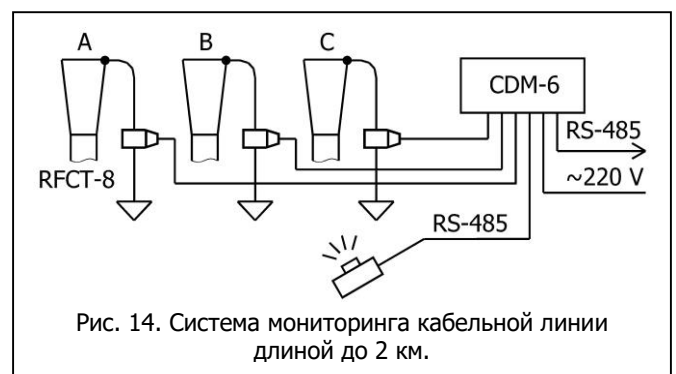
Для создания систем мониторинга высоковольтных кабельных линий используется универсальный диагностический прибор марки CDM-6.

В этом приборе эффективно сочетаются синхронная регистрация импульсов частичных разрядов по всем каналам, необходимая для реализации современных эффективных алгоритмов отстройки от высокочастотных помех, наличие современной экспертной диагностической системы и сравнительно низкая стоимость.

Ниже рассматриваются варианты создания нескольких модификаций систем диагностического мониторинга высоковольтных кабельных линий различной длины, созданные на основе этого универсального диагностического прибора.

8.1. Система мониторинга технического состояния кабельных линий длиной до 2 км

Конфигурация технических средств системы мониторинга для одной кабельной линии с максимальной длиной до 2 километров приведена на рисунке 14. Все технические средства системы мониторинга устанавливаются на одном конце линии.



При такой сравнительно малой длине кабельной линии, до 2 километров, достаточно устанавливать один диагностический прибор CDM-6 и три датчика частичных разрядов марки RFCT-8, по одному датчику на каждый фазный кабель. Технические возможности датчика и прибора достаточны для надежной регистрации импульсов

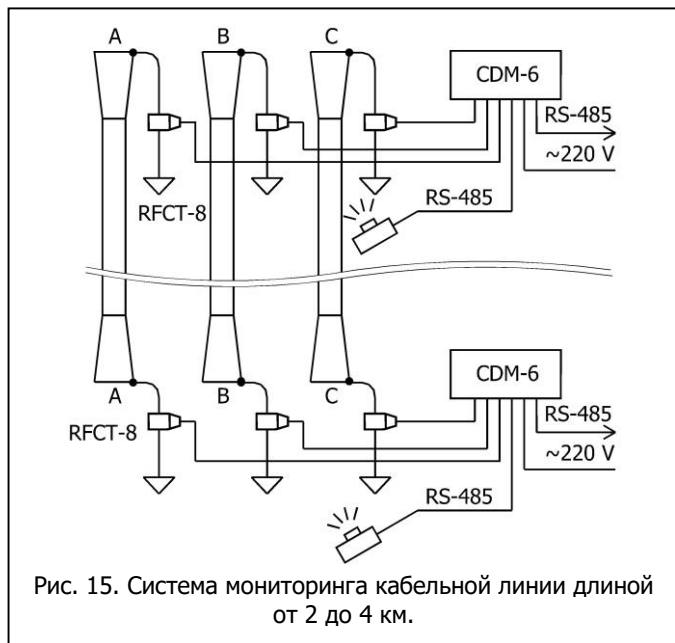


Рис. 15. Система мониторинга кабельной линии длиной от 2 до 4 км.

частичных разрядов от дефектов, которые могут возникнуть в любом месте кабельной линии при практически любом уровне высокочастотных помех.

Если стоит задача организовать диагностический мониторинг двух параллельно работающих высоковольтных кабельных линий, что чаще всего необходимо на практике, то в систему мониторинга необходимо добавить еще 3 датчика частичных разрядов марки RFCT-8 и использовать оставшиеся три измерительных канала шестиканального диагностического прибора марки CDM-6.

Конфигурация технических средств системы мониторинга приведена на рисунке 14 для случая, когда в месте установки прибора CDM-6 доступно оперативное питание и есть возможность организовать обмен информацией с системой АСУ-ТП по проводному каналу связи RS-485.

Если возможность подключения к оперативному питанию отсутствует, то для питания электроники диагностического прибора CDM-6 используются альтернативные источники, например, солнечная панель или же трансформаторный блок питания PLST, работающий от рабочего тока в жиле кабеля.

Для контроля температуры трех концевых кабельных муфт в схеме на рисунке 13 используется дистанционный датчик измерения распределения поверхностной температуры марки IRT. Этот компактный тепловизор устанавливается так, чтобы он захватывал своим измерительным полем три фазные муфты и даже небольшие участки отходящих кабелей.

Возможно и другое техническое решение для организации температурного контроля фазных кабелей. Для этого нужно использовать три беспроводных датчика температуры марки BDM/T и соответствующий беспроводной приемник интерфейса Bluetooth марки WDM, подключаемый к прибору CDM-6 с использованием проводного интерфейса RS-485.

8.2. Система мониторинга технического состояния кабельных линий длиной до 4 км

При длине кабельных линий от 2 до 4 км датчики частичных разрядов и диагностические приборы приходится устанавливать с двух сторон контролируемой линии. Это делается для того, чтобы даже при высоком уровне высокочастотных помех гарантированно зарегистрировать импульсы частичных разрядов от дефектов в изоляции, возникших на любом участке кабельной линии.

Пример конфигурации технических средств такой системы мониторинга приведен на рисунке 15. Система включает в себя два одинаковых измерительных комплекта, состоящих из приборов марки CDM-6 и трех датчиков частичных разрядов марки RFCT-8, установленных на фазных кабелях каждой кабельной линии.

На рисунке показаны два тепловизора марки IRT, предназначенные для контроля температуры концевых кабельных муфт. Как и в предыдущей системе мониторинга, их можно заменить на беспроводные датчики температуры марки BDM/T и, соответственно, использовать два приемника интерфейса Bluetooth марки WDM-T.

Вопрос с выбором интерфейса связи для передачи информации от приборов CDM-6 в систему АСУ-ТП, как и в предыдущем случае, решается по принципу «имеющихся возможностей». Иногда приходится с одной стороны кабельной линии использовать один интерфейс связи, а с противоположной стороны линии другой.

8.3. Система мониторинга технического состояния длинных кабельных линий

При создании систем мониторинга высоковольтных кабельных линий длиной более 4 км основополагающим является принцип использования функционально законченных диагностических модулей двух типов:

- Диагностические модули, устанавливаемые на концах контролируемой кабельной линии, обозначаемые на схемах как КМ. Каждый такой модуль включает в себя измерительный прибор CDM-6, три или шесть датчиков частичных разрядов марки RFCT-8, три или шесть беспроводных датчиков температуры BDM/T или один (или два) дистанционный датчик температуры марки IRT. Количество первичных датчиков зависит от того, осуществляется контроль одной или двух параллельно работающих кабельных линий. В состав диагностического модуля КМ входят, если это необходимо, автономное устройство питания и приемопередатчик интерфейса связи с системой АСУ-ТП.

- Второй тип диагностических модулей предназначен для установки в пунктах суперпозиции экранов фазных кабелей, расположенных по длине кабельной линии. Эти модули ПМ также включают в себя диагностический прибор марки CDM-6, шесть датчиков частичных разрядов марки RFCT-8 и шесть беспроводных датчиков температуры марки BDM/T. При помощи этих модулей контролируется состояние кабелей и соединительных муфт не только в точке суперпозиции экранов, но и всех промежуточных муфт.

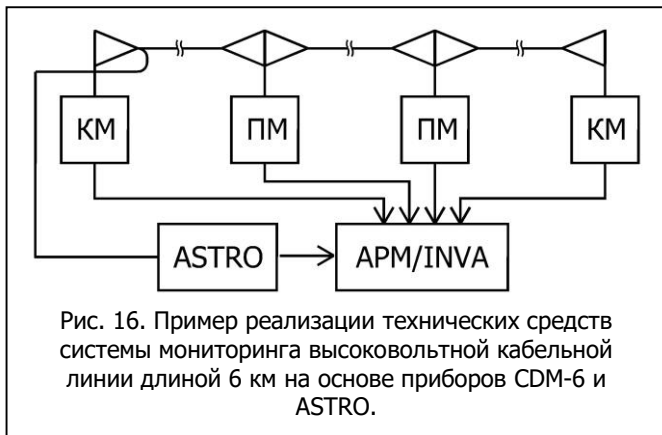
Дистанционные датчики температуры марки IRT в пунктах суперпозиции экранов используются редко, так как обычно кабельные муфты и сами кабели находятся вне колодца, поэтому они визуально недоступны для контроля температуры.

В состав промежуточного модуля ПМ также входят трансформаторные модули питания марки PLST и преобразователи сигналов от прибора CDM-6 в интерфейс связи с АСУ-ТП с передачей информации по оптическому волокну, находящемуся в фазных кабельных линиях.

Реальная конфигурация технических концевых и промежуточных диагностических модулей средств системы диагностического мониторинга зависит от способа прокладки кабельной линии, наличия в месте монтажа оперативного питания и доступных интерфейсов связи для обмена информацией с системой АСУ-ТП.

На рисунке 16 приведен пример использования диагностических модулей для создания системы мониторинга кабельной линии длиной 6 км. Система включает в себя два концевых диагностических модуля КМ и два промежуточных модуля марки ПМ, расположенных в колодцах суперпозиции экранов фазных кабелей.

Конструкция двух концевых КМ модулей одинакова, также и все промежуточные диагностические модули ПМ используют общие технические решения, принятые для условий данной кабельной линии.



Информация от всех диагностических модулей собирается по оптическому волокну в общем АРМ системы мониторинга, созданном на основе персонального компьютера с операционной системой Linux и специализированным программным обеспечением INVA. Этот АРМ предназначен для интегрирования информации от распределенных вдоль линии диагностических модулей и формирования итогового экспертного заключения о техническом состоянии всей кабельной линии.

Количество первичных датчиков, установленных в концевых и промежуточных диагностических модулях, можно уменьшить, если исключить беспроводные датчики

температуры BDM/Т. Это возможно сделать в том случае, если вместо этих датчиков для контроля температурного профиля кабельной линии применить систему, основанную на использовании распределенного контроля температуры оптического волокна в зоне экрана каждого фазного кабеля.

На рисунке 16 приведен пример организации температурного мониторинга с использованием для этой цели диагностической системы марки ASTRO, контролирующей температуру оптического волокна, проложенного по всей кабельной линии. Информация от этой системы также передается в общий АРМ системы мониторинга и используется для комплексной оценки технического состояния кабельной линии.

Итоговая оценка технического состояния кабельной линии формируется в программном обеспечении INVA. Основой для такого анализа являются диагностические заключения, полученные от концевых и промежуточных диагностических модулей, каждое из которых относится к контролируемому модулем участку кабельной линии.

Если общая длина контролируемой кабельной линии будет больше рассмотренных 6 км, то в состав необходимых технических средств системы мониторинга необходимо будет включать дополнительные промежуточные диагностические модули, обычно их количество равняется количеству колодцев, предназначенных для суперпозиции экранов кабелей.

Заключение.

В данном техническом документе рассмотрены только общие подходы к организации непрерывного мониторинга высоковольтных кабельных линий, от коротких, длиной в десятки метров, до длинных, достигающих длины в десятки километров. Как видно даже из этого краткого анализа, решение возникающих проблем требует рассмотрения достаточно большого объема информации.

Реально же круг вопросов, которые приходится решать при создании систем диагностического мониторинга, а особенно систем управления эксплуатацией кабельных линий по техническому состоянию, на практике оказывается гораздо шире.

Специалисты фирмы РУСОВ готовы принять участие в создании систем мониторинга любого уровня, как на основе уже имеющегося диагностического оборудования, так и с использованием новых, уникальных OEM разработок.