

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

БЕЛКОВСКИЙ С.В., БОТОВ С.В., GERMANENKO Д.В., РУСОВ В.А., ШКОЛЬНИК А.Б.,

ООО «DIMRUS», г. Пермь

При создании современных систем электроснабжения с использованием высоковольтных кабельных линий все чаще предпочтение отдается кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена – СПЭ (международное обозначение – «XLPE» (Cross Linked Polyethylene)). Основное эксплуатационное отличие кабелей с СПЭ изоляцией от маслонаполненных высоковольтных кабелей с изоляцией бумага–масло заключается в том, что большинство возникающих в них дефектов, являющихся опасными, развиваются за сравнительно короткий период времени, от нескольких месяцев до нескольких дней. В результате, периодические испытания кабельных линий в режиме «off-line» с выводом из работы, проводимые через достаточно длительные интервалы времени (год и более), обычно эффективные для маслонаполненных кабелей, при использовании кабельных линий с СПЭ изоляцией теряют смысл. Они не обеспечивают своевременного выявления дефектов и практически не способствуют снижению аварийности.

Снижение аварийности работы кабельных линий возможно только за счет внедрения систем непрерывного мониторинга, которые могут контролировать состояние изоляции кабельных линий в режиме реального времени. Только такие системы могут своевременно выявлять развивающиеся дефекты на самых ранних стадиях, тем самым предотвращая возможные аварийные ситуации с высоковольтными кабельными линиями.

Для обеспечения эффективной и безаварийной эксплуатации высоковольтных кабельных линий наиболее интересными являются три диагностических метода, применение которых возможно и обосновано в системах мониторинга технического состояния:

- **распределенный температурный мониторинг**, который позволяет контролировать продольный профиль темпера-

туры кабельной линии с разрешением до одного метра. Такая подробная информация дает возможность обслуживающему персоналу оперативно отслеживать условия эксплуатации всей кабельной линии, ее рабочую температуру;

- **контроль наличия дефектов в изоляции концевых и соединительных муфт** по наличию частичных разрядов. Более половины (по некоторым источникам – до 80 %) всех случаев возникновения дефектов в высоковольтных кабельных линиях происходит именно в концевых и соединительных муфтах. Обычно эти дефекты обусловлены недостаточно качественной работой персонала при выполнении работ по заделке муфт;

- **диагностика наличия дефектов в изоляции высоковольтного кабеля**. Дефекты в изоляции кабеля встречаются значительно реже, чем в муфтах. Появлению дефектов предшествуют или повреждение оболочки кабеля, или негерметичность монтажа муфты, приводящие к проникновению влаги в изоляцию кабеля. Именно влага чаще всего является причиной повреждения главной изоляции высоковольтных кабелей. Производственные дефекты изоляции кабеля хотя и встречаются на практике, но достаточно редко.

Реализация всех диагностических возможностей систем мониторинга КЛ возможна только при комплексном использовании взаимодополняющих методов контроля

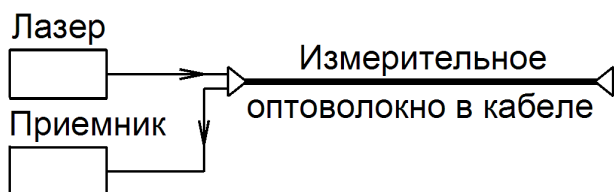


Рис. 1. Оптический мониторинг температуры кабельной линии

состояния кабельной линии под рабочим напряжением. Эти три метода физически независимы друг от друга, но только при совместном использовании дают наиболее высокую эффективность. Каждый из этих методов контроля состояния высоковольтных кабельных линий под рабочим напряжением имеет свои достоинства, недостатки и предназначен для решения различных диагностических задач.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ

Оптоволоконная система мониторинга предназначена для контроля температуры кабельной линии в процессе эксплуатации. Достоинство использования оптоволоконных систем – возможность измерения температуры кабельной линии в режиме реального времени с высокой точностью (до долей градуса) и с детализацией распределения температуры по длине кабельной линии до 1 метра.

Система мониторинга профиля температуры кабельной линии включает в себя распределенный датчик измерения температуры (оптическое волокно), в идеальном случае располагаемый внутри контролируемого кабеля, и прибор-регистратор для измерения профиля температуры. Оптическое волокно при изменении температуры меняет свои свойства. При облучении его импульсом лазера в нем возбуждаются фотоны, которые генерируют свои импульсы, отличные по частоте от частоты возбуждающего лазера.

Лазерный источник измерительного прибора посылает в оптическое волокно импульс, который возбуждает колебания во всех участках контролируемого кабеля, и именно эти колебания поступают обратно в приемник-анализатор спектра. Полученный сигнал, в зависимости от относительного времени прихода импульса в прибор, описывает температурное состояние определенного участка контролируемого кабеля. Параметры отраженного оптического сигнала зависят от температуры оптического волокна в каждой точке контролируемой кабельной линии, что и дает возможность контролировать профиль распределения температуры вдоль линии.

Система температурного мониторинга в основном предназначена для контроля технологических режимов работы кабельной линии, так как точное знание текущей температуры кабеля позволяет оперативно оптимизировать нагрузочную способность линии. В качестве средства диагностики система температурного мониторинга на основе оптического волокна недостаточно информативна. Это связано с тем, что возникновение и развитие дефектов в высоковольтной изоляции до самого момента дугового пробоя очень часто не сопровождается заметным повышением температуры.

Все основные дефекты в СПЭ изоляции при возникновении носят локальный характер, поэтому процессы разрушения в этих дефектных зонах приводят только к сокращению эффективного слоя изоляции в муфтах или в самом кабеле. Развитие дефектов в высоковольтной СПЭ изоляции завершается не тепловой деградацией и пробоем, как это имеет место в низковольтных кабелях, а ползвым (высоковольтным) пробоем. Поэтому система рас-



Рис. 2. Оптический регистратор «ASTRO E54»

пределенного контроля температуры не очень эффективна для диагностики дефектов в изоляции.

Оптоволоконная система мониторинга «ASTRO E54», предназначенная для непрерывного контроля температуры нагрева силового кабеля, производится отечественной фирмой «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь). Система позволяет производить измерение температуры в кабельных линиях длиной до 8 км (16 км для прибора марки «ASTRO E58»). Время проведения одного измерения температуры зависит от длины кабельной линии и не превышает нескольких минут.

Система мониторинга включает в себя:

- регистратор температуры марки «ASTRO E54» («ASTRO E58»), стационарный, одноканальный. Регистратор выполняет функцию головного устройства системы мониторинга, связанную с приемом и обработкой информации о распределении температуры нагрева силового кабеля;
- встроенный коммутатор оптических сигналов, до 16 линий, необходимый для последовательного подключения к входу регистратора нескольких оптических волокон, проложенных в разных фазах контролируемой кабельной линии;
- оптическое волокно, 2 жилы (с резервом), с допустимой температурой до 300 °С. Волокно предназначено для мониторинга температуры вдоль изоляционной оболочки кабеля. Волокно закладывается внутрь силового кабеля (под внешней оболочкой) в процессе производства.

СИСТЕМА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ

Наиболее эффективно поиск, анализ и локализация дефектных мест в высоковольтных кабельных линиях осуществляются при использовании метода регистрации и анализа частичных разрядов в изоляции. Это обусловлено тем, что возникновение и развитие практически всех дефектов в высоковольтной изоляции сопровождается появлением частичных разрядов различной интенсивности. Этот метод диагностики применяется только в режиме «on-line», в процессе эксплуатации кабельной линии под рабочим напряжением, т. е. данный метод идеально подходит для использования в системах мониторинга.



Рис. 3. Внешний вид прибора марки «CDM-30»

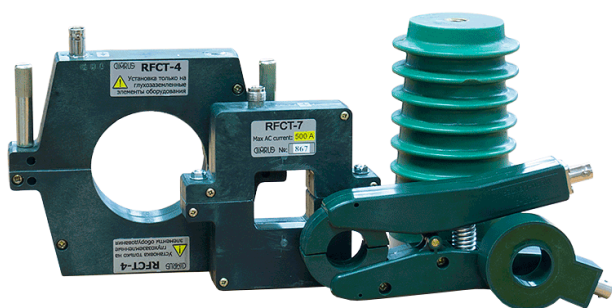


Рис. 4. Датчики HF диапазона частот для систем мониторинга кабельных линий

Для регистрации частичных разрядов в различном высоковольтном оборудовании могут быть использованы первичные датчики и регистрирующая аппаратура, работающие в трех различных диапазонах частот:

- акустический и ультразвуковой диапазон частот US, до 300 кГц;
- высокочастотный диапазон частот HF (ВЧ), от 150 кГц до 30 МГц;
- сверхвысокочастотный диапазон частот UHF (СВЧ), от 100 до 1500 МГц.

Измерительное оборудование, работающее в каждом из этих трех частотных диапазонов, отличается параметрами, свойствами, особенностями монтажа первичных датчиков, ценой. Применительно к измерению частичных разрядов в высоковольтных кабельных линиях, при выборе определяющим фактором является длина кабельной линии, которую

Таблица 1. Применимость различного диагностического оборудования

Диапазон частот	Тип датчиков ЧР	Способ монтажа	Зона контроля	Объект контроля
US (ультразвук)	Пьезодатчики, микрофоны	Контактно и бесконтактно	± 1 м	Муфты
HF (ВЧ)	HF трансформаторы, конденсаторы связи	На земляных и токоведущих шинах	± 2000 м	Муфты, кабель
UHF (СВЧ)	Электромагнитные антенны	Бесконтактно	± 20 м	Муфты (?)

можно контролировать при помощи одного датчика. Общая информация о применимости различного диагностического оборудования приведена в таблице 1.

Наиболее эффективным является диагностическое оборудование, работающее в высокочастотном (HF) диапазоне. Оно одинаково хорошо применимо как для контроля состояния концевых и соединительных муфт, так и для контроля самого высоковольтного кабеля.

Системы мониторинга, использующие акустические датчики и измерительные приборы, могут быть использованы только для контроля технического состояния концевых и соединительных муфт.

Диагностическое оборудование, работающее в UHF диапазоне частот, может быть использовано в системах мониторинга для контроля состояния муфт, но по соотношению цена–свойства оно существенно уступает оборудованию, использующему акустические датчики, и оборудованию, использующему датчики HF диапазона частот.

Дополнительные достоинства применения диагностического оборудования, работающего в HF диапазоне частот:

- возможность выявления дефектов в изоляции кабельной линии за счет эффективной отстройки от внешних помех, за счет использования различных технических и алгоритмических методов;
- возможность на основании экспертного анализа зарегистрированных импульсов частичных разрядов диагностировать тип дефекта, определять степень его развития и опасности для дальнейшей эксплуатации кабельной линии;
- возможность достаточно точно локализовать место возникновения дефекта в изоляции, используя график распределения во времени прямого и отраженных импульсов частичных разрядов (от противоположного конца кабельной линии и соединительных муфт).

В целом очевидно, что для кабельных линий с СПЭ изоляцией основное диагностическое оборудование для поиска дефектов в основной изоляции – оборудование, работающее в HF диапазоне частот, принцип действия которого основан на регистрации и анализе частичных разрядов.

Наиболее широкий спектр подобного диагностического оборудования выпускается отечественной фирмой «DIMRUS» (г. Пермь).

Основные системы:

- система мониторинга марки «CDM-30» (Cables Diagnostics Monitor, 30 Channel), предназначенная для постоянного контроля технического состояния изоляции от 15 до 45 кабельных линий 6÷35 кВ под рабочим напряжением. Все контролируемые кабельные линии должны быть подключены (через выключатели) на одном КРУ, чтобы соединительные сигнальные кабели от датчиков до измерительного прибора не превышали 60 метров.

Использование многоканальной системы мониторинга «CDM-30» позволяет снизить общие затраты на мониторинг и диагностику, рассчитываемые на один контролируемый кабель. С другой стороны, возможность проведения одновременного анализа частичных разрядов по нескольким каналам позволяет более эффективно отстраиваться от наводок высокочастотных помех на контролируемое оборудование, которые в условиях больших КРУ очень значительны.

Выбор необходимых датчиков для создания конкретной системы мониторинга определяется типом контролируемых кабельных линий и условиями их монтажа в КРУ. Наиболее часто в качестве датчиков частичных разрядов используются высокочастотные импульсные трансформаторы тока; ■ система мониторинга марки «CDR» для мониторинга кабельных линий с напряжением 110–500 кВ.

В качестве устройства регистрации частичных разрядов в системе «CDR» использован универсальный шестиканальный измерительный прибор. Его функциональная особенность – возможность регистрации импульсов частичных разрядов в очень широком диапазоне частот, от 50 кГц до 1 ГГц.

Прибор марки «CDR» сочетает в себе два современных метода локализации места возникновения дефекта в изоляции кабельной линии. Один работает независимо на основе анализа рефлектограмм распределения импульсов частичных разрядов в линии, а второй анализирует разницу по времени прихода высокочастотного импульса от дефекта к «концам» контролируемой кабельной линии.

В системе «CDR» реализована экспертная диагностическая система «PD-Expert», позволяющая в автоматическом режиме определять тип дефекта в изоляции и степень его развития. Для реализации такого уникального набора функциональных возможностей в системе «CDR» использованы специфические технические решения.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ «КМК-500»

Наилучшие экономические результаты при проведении мониторинга высоковольтных кабельных линий могут быть достигнуты при комплексном использовании всех вышеперечисленных диагностических методов. Аппаратно и алгоритмически оборудование для реализации этих методов интегрировано в комплексной системе мониторинга марки «КМК-500» (комплексный мониторинг кабельных линий).

Основная особенность этой системы – оперативный контроль состояния КЛ ведется с использованием нескольких методов диагностики:

- контроль режимов работы линии на основании анализа профиля температуры с использованием встроенных оптоволоконных датчиков;
- контроль состояния кабеля по результатам измерения частичных разрядов с использованием высокочастотных трансформаторов тока;
- контроль состояния концевых и соединительных муфт по частичным разрядам при помощи акустических датчиков;
- регистрация и анализ емкостных токов утечки и уравнительных токов в экранах кабельной линии, контроль токов утечки через повреждения оболочек.

В стандартной – наиболее полной – конфигурации технических средств система мониторинга марки «КМК-500» комплектуется следующим диагностическим оборудованием:

- система контроля температуры кабельной линии (при помощи встроенного оптического волокна) марки «ASTRO», производителем которой является отечественная фирма «Инверсия – Сенсор». Эта современная высокотехнологическая система мониторинга позволяет оценивать темпе-

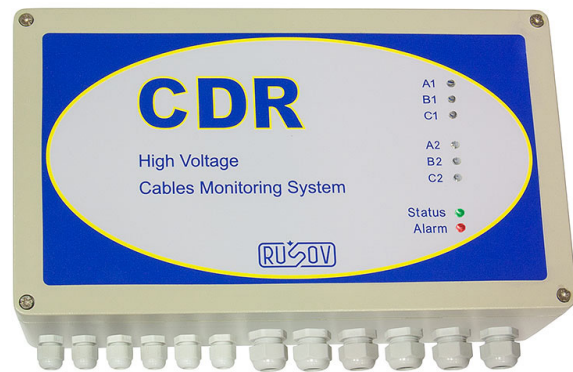


Рис. 5. Система мониторинга марки «CDR».

ратурный режим работы кабельной линии и выявлять зоны кабеля с повышенным нагревом;

- для выявления дефектов изоляции кабеля и муфт по частичным разрядам на самых ранних стадиях их возникновения и развития, определения типа и опасности выявленного дефекта, оперативного проведения локализации места возникновения дефектов в системе «КМК-500» используются различные диагностические приборы производства отечественной фирмы «DIMRUS». Это приборы марок:

- «CDM» – прибор контроля состояния изоляции кабельных линий до 35 кВ, подключенных к одному КРУ или кабельной сборке,
- «CDR» – прибор контроля состояния кабельных линий до 500 кВ по уровню и распределению частичных разрядов,
- «ADM-9» – прибор, предназначенный для контроля состояния изоляции концевых и соединительных муфт при помощи контактных акустических датчиков,
- «CLM» – прибор оперативного контроля токов утечки и поиска повреждений оболочек кабелей. Для длинных кабельных линий, в которых диагностика повреждений оболочки затруднена, в «КМК-500» используются регистраторы переменных токов и напряжений типа «ПАРМА».

Все основное диагностическое и коммуникационное оборудование системы мониторинга «КМК-500» располагается в монтажных шкафах трех типов, объединяемых между собой оптоволоконными линиями связи. Конфигурация технических средств системы мониторинга, располагаемых в этих монтажных шкафах, зависит от реальной топологии контролируемой кабельной линии.

Универсальный «центральный шкаф» системы мониторинга кабельных линий «КМК-500/1» представлен на рисунке 6. В этом шкафу обычно располагается промышленный компьютер с программным обеспечением мониторинга и диагностики.

Если шкаф системы мониторинга марки «КМК-500/1» располагается рядом с концевой муфтой (концевыми муфтами) контролируемой кабельной линии, то в нем могут монтироваться приборы систем «ASTRO», «CDR», «ADM» и «CLM».

Если расстояние от шкафа мониторинга «КМК-500/1» до контролируемой кабельной линии достаточно велико, более нескольких десятков метров, то все измерительные приборы с целью уменьшения длины сигнальных кабелей монтируются в локальном шкафу марки «КМК-500/2».



Рис. 6. Шкаф марки «КМК-500/1»

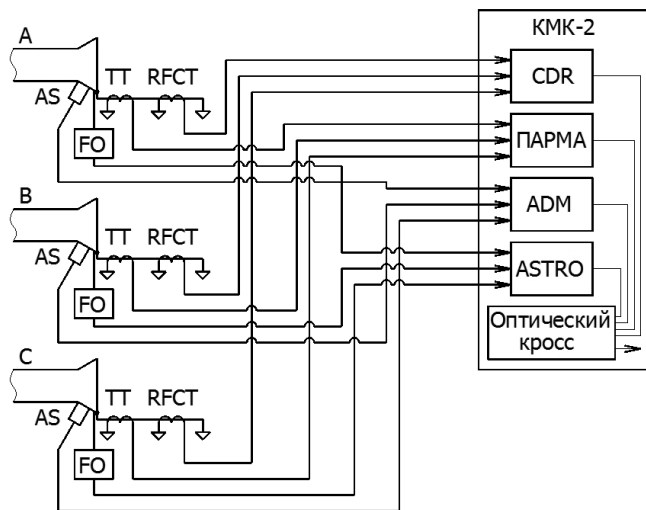


Рис. 7. Функциональная схема установки датчиков и их подключения в шкафу марки «КМК-500/2»

В шкафу марки «КМК-500/2» обычно располагаются измерительные приборы всех диагностических подсистем мониторинга «ASTRO», «CDR», «ADM», «CLM» или «ПАРМА», так как в этом случае получаются максимально короткие сигнальные кабельные линии.

На рисунке 7 приведена общая схема подключения первичных датчиков контроля состояния кабельной линии

к измерительным приборам, смонтированным в шкафу «КМК-500/2».

К прибору «ASTRO» при помощи оптических соединителей «FO» подключаются три встроенных в фазные кабели оптических волокна, предназначенные для оперативного контроля температурных режимов работы КЛ.

К прибору «ADM» подключаются контактные акустические датчики, предназначенные для регистрации частичных разрядов в концевых муфтах. На рисунке датчики имеют обозначение «AS». В зависимости от рабочего напряжения и размеров муфт, на каждой из них могут устанавливаться один или два акустических датчика.

Схема установки датчиков на концевой муфте, приведенная на рисунке 7, соответствует точке кабельной линии, в которой производится замыкание экранов кабелей на землю. Если же в точке установки датчиков экраны кабелей замкнуты на землю через ограничители перенапряжений (ОПН или разрядники), то в схеме необходимо предусматривать защиту измерительных цепей от импульсных перенапряжений. Эти перенапряжения возникают при различных коммутационных процессах и могут достигать величин до десятка киловольт, в зависимости от напряжения срабатывания ОПН.

При помощи оптических линий связи в «КМК-500/2» происходит сбор информации с «промежуточных» шкафов «КМК-500/3» и ее передача в главный шкаф системы мониторинга. Для повышения информативности регистрация сигналов в шкафах «КМК-500/2» синхронизируется по оптической линии или по сигналам системы GPS.

Промежуточный шкаф системы мониторинга марки «КМК-500/3» используется для контроля состояния соединительных муфт и смежных с ними участков кабельной линии. Шкаф монтируется непосредственно на линии, рядом с контролируемыми муфтами.

В шкафу системы мониторинга марки «КМК-500/3» монтируются приборы контроля состояния муфт, например, типа «ADM». Для контроля состояния изоляции рядом расположенных участков кабельной линии используются приборы типа «CDR», регистрирующие импульсы частичных разрядов при помощи высокочастотных трансформаторов тока типа «RFCT».

При необходимости в шкафу «КМК-500/3» также могут быть установлены измерительные приборы типа «CLM», «ПАРМА» с трансформаторами тока для контроля емкостных токов в экранах, хотя необходимость их установки на переходных пунктах транспозиции экранов кабельной линии не очевидна.

На рисунке 8 приведена наиболее полная схема установки датчиков и измерительных приборов в шкафу «КМК-500/3», смонтированном на пункте транспозиции экранов. На каждой фазной муфте монтируется по одному акустическому датчику, что позволяет контролировать частичные разряды в изоляции.

На рисунке на каждой соединительной муфте показано по два высокочастотных датчика тока марки «RFCT», установленных на поводках заземления двух соединительных кабелей. Два датчика нужны для того, чтобы была возможность определить, в изоляции какого кабеля возникли частичные разряды – «слева» или «справа» от

муфты. Такая функция полезна для диагностики и реализуется в приборе марки «CDR», но требует увеличенного количества датчиков.

Сложностью установки измерительных датчиков на муфтах и поводках заземления экранов, в пунктах транспозиции экранов, в которых защитное заземление осуществляется через ограничители перенапряжения, является то, что в переходных режимах напряжение на экранах может достигать величины десятка киловольт. Поэтому к изоляции датчиков частичных разрядов и подключенных к ним сигнальных кабелей предъявляются достаточно жесткие требования.

На рисунке 9 приведена принципиальная схема системы мониторинга, в которой использованы шкафы всех трех типов.

Питание измерительных приборов распределенной системы мониторинга, смонтированных в шкафах «КМК-500/3», обычно производится по специально проложенной вдоль контролируемого кабеля линии питания. Если проложить такую линию нет возможности, то используются специализированные локальные блоки питания «PST», основанные на использовании модифицированных (разъемных) трансформаторов тока. Эти трансформаторы тока монтируются поверх оболочки кабельной линии или на шинах заземления экранов кабелей.

При малых значениях емкостных токов энергия для работы измерительных приборов постепенно накапливается в блоках питания «PST» до величины, достаточной для проведения полного замера параметров и передачи информации в систему «КМК». При необходимости блоки питания «PST» дополняются солнечными панелями, которые повышают эффективность работы измерительных приборов системы мониторинга, проведения измерений и анализа параметров кабельной линии.

Итоговая эффективность работы системы мониторинга кабельных линий в значительной степени зависит от использованного в ней специализированного программного обеспечения. Чем больше в этом программном обеспечении будет реализовано автоматизированных экспертных алгоритмов и функций, тем выше будет практическая значимость работы всей системы мониторинга.

Кроме того, использование эффективной экспертной (диагностической) системы на верхнем уровне системы мониторинга всегда повышает достоверность получаемых диагностических заключений. С экономической точки зрения одинаково эффективные системы мониторинга могут быть получены двумя путями – путем увеличения количества первичных датчиков и средств первичной обработки сигналов, или же за счет использования экспертной системы, максимально полно анализирующей исходную информацию. Чем более наукоемким и практически ориентированным будет экспертное ядро системы мониторинга кабельных линий, тем меньше может быть стоимость поставки датчиков и других технических средств за счет уменьшения их общего количества.

В состав системы мониторинга кабельных линий «КМК-500» входит программное обеспечение марки «iNVA-КМК», которое включает в себя набор специальных подпрограмм:

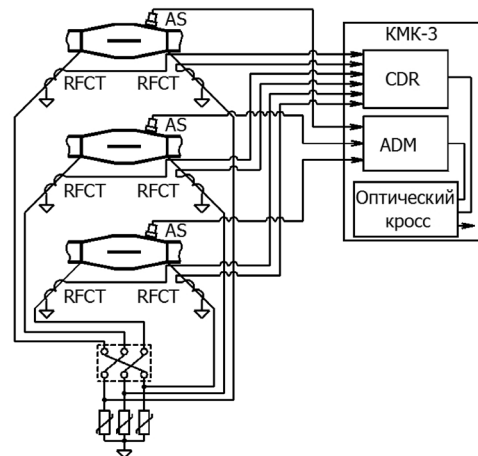


Рис. 8. Функциональная схема соединений в шкафу марки «КМК-500/3»

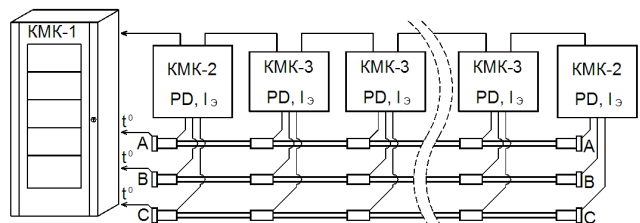


Рис. 9. Структура максимальной системы мониторинга трех фаз кабельной линии, включающей в себя три метода контроля и диагностики

- подпрограмму для синхронизации процессов регистрации первичных сигналов во всех измерительных приборах, модуль сбора информации с удаленных диагностических датчиков и приборов системы мониторинга;
- подпрограмму обработки, визуализации, хранения и архивации первичной информации и результатов работы экспертной диагностической системы по оценке технического состояния кабельной линии. Данная подпрограмма находится в центральном компьютере системы мониторинга в шкафу «КМК-500/1»;
- автоматизированную экспертную программу «КМК-Expert», формирующую комплексное диагностическое заключение о техническом состоянии линии и выявленных дефектах, получаемое на основе первичной и уже обработанной информации от всех приборов комплексной системы мониторинга. На основании частных диагностических заключений, получаемых в отдельных приборах, в «КМК-Expert» формируется итоговое диагностическое заключение о состоянии всех кабельных линий. Такие рекомендации экспертной программы могут быть использованы для формирования управляющих воздействий на эксплуатацию, обслуживание и ремонт контролируемых кабельных линий;
- набор современных протоколов (МЭК 61850) и интерфейсов для обмена информацией с системой АСУ-ТП, обеспечивающих работу в условиях объекта с высоким уровнем внешних помех. Для организации каналов связи предпочтение отдается оптоволоконным линиям связи, наименее подверженным влиянию высокочастотных помех и импульсных перенапряжений.