

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ И КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

БОТОВ С. В., РУСОВ В. А., ООО «ДИМРУС», ПЕРМЬ

Комплектные распределительные устройства и кабельные линии (КРУ и КЛ) с рабочим напряжением 6÷20 кВ – основные элементы систем электроснабжения крупных промышленных предприятий. От безаварийной работы этого достаточно дорогого и ответственного электротехнического оборудования во многом зависит экономическая эффективность работы предприятий. Для повышения надежности эксплуатации КРУ и КЛ на предприятиях применяются работающие в онлайн и офлайн режимах диагностические приборы и системы, позволяющие контролировать текущее техническое состояние и оперативно оценивать остаточный ресурс высоковольтного оборудования.

Конечная цель работы всех этих приборов и систем – получение достоверных текущих и прогнозных диагностических заключений, на основании которых будет реализовываться система управления эксплуатацией высоковольтного оборудования по техническому состоянию. Такой организационный подход позволяет минимизировать затраты на сервисные и ремонтные работы без снижения надежности работы системы электроснабжения предприятия.

Несмотря на внешнюю простоту декларируемого принципа управления эксплуатацией оборудования по техническому состоянию практическая реализация этого принципа сталкивается с необходимостью решения сложных технических и технологических задач. Из них можно выделить пять основных:

- обеспечение эффективного контроля текущего технического состояния всего парка контролируемых КРУ и КЛ. Для этого оборудование необходимо оснастить средствами мониторинга и диагностики, обычно системами контроля состояния изоляции по уровню и распределению частичных разрядов для кабельных линий, и оперативного контроля электромеханического состояния для коммутационных аппаратов. Наиболее ответственное и дорогое оборудование оснащается системами непрерывного мониторинга, техническое состояние остального оборудования контролируется переносными приборами и системами в режиме периодического мониторинга;
- концентрация всей собранной информации о текущем техническом состоянии оборудования должна производиться на общем сервере управления эксплуатацией оборудования. Для этого на сервере должна интегрироваться

информация от всех систем мониторинга, используемых на предприятии, информация о всех выполненных в режиме офлайн дополнительных обследованиях, а также информация о проведенных ремонтных и наладочных работах. Сервер управления эксплуатацией КРУ и КЛ должен быть частью общей информационной системы предприятия;

- определение текущего технического состояния КРУ и КЛ должно производиться с использованием двух видов диагностики: параметрической и экспертной. Наиболее простой вид диагностики – параметрическая, основанная на сравнении текущих значений контролируемых параметров с нормированными пороговыми значениями. Экспертная диагностика предназначена для выявления дефектных состояний, которые уже привели или могут привести к ухудшению технического состояния оборудования. Параметрическая диагностика эффективна для текущей оценки технического состояния оборудования, а экспертные алгоритмы ориентированы на оценку изменения состояния на будущих этапах эксплуатации, когда выявленные дефекты, продолжая развиваться, будут ухудшать техническое состояние;
- для прогнозирования развития технического состояния оборудования должны использоваться математические модели, также называемые цифровыми двойниками. Изменение технического состояния всего оборудования в процессе эксплуатации происходит по двум сценариям – нормальному и аномальному. Нормальное происходит по мере постепенного износа и старения оборудования. Возникновение и развитие дефектов является специфическим процессом, который непредсказуемо ускоряет ухудшение состояния. Влияние дефектных состояний приво-

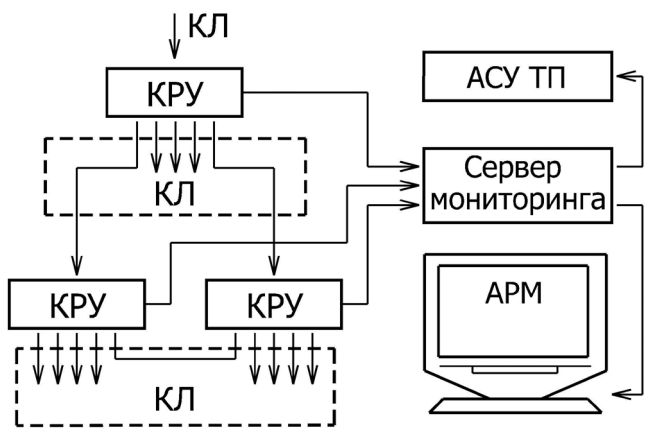


Рис. 1. Структура технических и программных средств комплексной системы мониторинга КРУ и кабельных линий

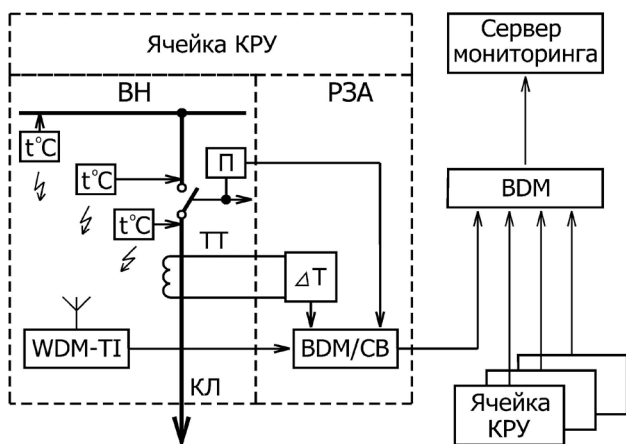


Рис. 2. Технические средства мониторинга коммутационного оборудования в ячейках КРУ

дит к аномальному изменению технического состояния оборудования. Для прогнозирования изменения состояния КРУ и КЛ на будущих этапах эксплуатации оборудования используются адаптивные математические модели, в которых параметры цифрового двойника оборудования корректируются автоматически. Цель адаптации – учет влияния выявленных экспертной системой дефектов и особенностей эксплуатации;

- информация об итогах работы экспертного ядра системы мониторинга и управления обслуживанием предоставляется персоналу в двух видах – при помощи различных экранных форм на мониторе персонального компьютера и в виде отчетных справок, автоматически создаваемых экспертной системой по запросу пользователя. Эта информация предназначена для того, чтобы помочь персоналу формировать эффективные управляющие воздействия, определяющие параметры дальнейшей эксплуатации, а также необходимость применения сервисных и ремонтных работ.

Наличие информации об оборудовании, сконцентрированной на общем сервере, позволяет перейти от управления обслуживанием отдельных ячеек КРУ и кабельных линий к управлению эксплуатацией и обслуживанием технологической цепи передачи электроэнергии. основополагающим принципом при таком управлении эксплуатацией

КРУ и КЛ является поиск и устранение «слабого звена» в технологической цепи. В этом случае ремонтные и сервисные воздействия планируются в минимальном объеме, достаточном только для повышения технического состояния «слабого звена» до уровня не ниже других элементов в технологической цепи, в которую он входит. Общая организационная структура системы управления эксплуатацией кабельных линий и КРУ с рабочим напряжением 6÷20 кВ предприятия приведена на рис. 1.

Для контроля технического состояния высоковольтного оборудования используется несколько типов систем непрерывного мониторинга основных технических и технологических параметров. Эти системы позволяют контролировать наиболее важные эксплуатационные параметры КРУ и КЛ. Все системы непрерывного диагностического мониторинга, предназначенные для контроля технического состояния высоковольтного оборудования, устанавливаются непосредственно в помещениях распределительных устройств.

Контроль технического состояния высоковольтного коммутационного оборудования и самих ячеек КРУ в общей системе мониторинга производится на основании нескольких диагностических методов, использующих разные первичные параметры:

- определение технического состояния и расчет остаточного коммутационного и механического ресурса выключателей фидерных и секционных ячеек;
- контроль технического состояния изоляции шин КРУ и всего высоковольтного оборудования внутри ячеек;
- оперативное измерение текущей температуры соединительных шин КРУ и контактов выключателей при помощи беспроводных датчиков.

Оперативный контроль технического состояния высоковольтных кабельных линий производится на основании анализа первичных эксплуатационных параметров и использования нескольких диагностических методов и математических моделей:

- определение текущего технического состояния и остаточного ресурса изоляции высоковольтной кабельной линии, концевых и соединительных муфт по наличию и уровню частичных разрядов;
- определение типа дефектов в изоляции, которые являются источниками частичных разрядов, оценка степени опасности этих дефектов для дальнейшей эксплуатации КЛ;
- автоматическая локация места возникновения дефектов по длине кабельной линии, проводимая без отключения рабочего напряжения.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КОММУТАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЯЧЕЙКАХ КРУ

Размещение первичных датчиков и приборов систем мониторинга высоковольтных выключателей в ячейках КРУ показано на рис. 2. Центральное устройство системы контроля и диагностики коммутационного оборудования КРУ – прибор марки BDM, внешний вид которого показан на рис. 3. Информация о техническом состоянии всех контролируемых коммутационных аппаратах собирается и отображается на экране этого прибора. При необходимости вся диагностическая информация о состоянии ячеек передается на общий сервер управления эксплуатацией КРУ и

КЛ, где используется для подготовки планов проведения ремонтных и сервисных работ.

К центральному прибору системы мониторинга марки BDM подключаются локальные диагностические приборы марки BDM/CB, показанные на рис. 4. Эти приборы располагаются в релейных отсеках ячеек КРУ, в которых предполагается проводить контроль технического состояния высоковольтных выключателей.

Подключение приборов BDM/CB к центральному прибору BDM производится последовательно при помощи одного сигнального кабеля, по которому передается напряжение питания для локальных устройств и производится информационный обмен. К одному центральному диагностическому прибору марки BDM может быть подключено до 20 локальных диагностических приборов контроля коммутационного оборудования BDM/CB.

Для контроля параметров технического состояния высоковольтного выключателя в каждой ячейке КРУ к прибору BDM/CB подключаются датчики контроля параметров работы привода «П», предназначенные для регистрации и анализа токов управляющих соленоидов. Для контроля времени срабатывания выключателя, разновременности срабатывания контактов фаз ΔT , а также учета мощности, отключаемой выключателем, к прибору BDM/CB подключаются сигналы от фазных измерительных трансформаторов тока ТТ.

При помощи прибора марки BDM/CB производится регистрация технологических параметров выключателя в момент каждой коммутации. Для проведения дополнительного анализа состояния выключателей в программное обеспечение прибора BDM/CB встроена специализированная экспертная диагностическая программа.

При помощи этой экспертной программы в приборе в автоматическом режиме решаются несколько практически важных задач:

- на основании анализа основных зарегистрированных параметров коммутаций определяется текущее техническое состояние контролируемого выключателя;
- создается адаптивная математическая модель контролируемого выключателя, его цифровой двойник, учитывающий особенности конструкции и эксплуатации;
- производится определение величины остаточного ресурса выключателя, коммутационного и электромеханического.

Для контроля температуры контактов выключателей и соединительных шин в системе мониторинга BDM используются беспроводные датчики температуры марки BDM/T. Такие датчики устанавливаются на токоведущих шинах рядом с контактами выключателей и контактным способом измеряют температуру в месте установки.

Особенностью датчиков контроля температуры марки BDM/T является их полностью беспроводное исполнение. Это позволяет безопасно монтировать датчики на токоведущих шинах, находящихся под высоким напряжением.

Для питания встроенной электроники датчика BDM/T, предназначенной для измерения температуры и передачи информации, используется энергия внешнего электромагнитного поля, наводимого вокруг токоведущей шины при протекании по ней рабочего тока промышленной частоты.



Рис. 3. Центральный прибор BDM системы мониторинга коммутационного оборудования КРУ



Рис. 4. Прибор BDM/CB для мониторинга высоковольтных выключателей

Информацию о температуре контролируемых точек датчики передают по беспроводному каналу связи на приемник марки WDM-TI, установленный в высоковольтном отсеке ячейки КРУ. При помощи одного приемника можно принимать информацию от 16 датчиков температуры, установленных в одной ячейке. Приемник WDM-TI подключается к локальному диагностическому прибору BDM/CB, который использует температуру контактов выключателя в своих диагностических алгоритмах.

Приемник информации от беспроводных датчиков марки WDM-TI имеет два конструктивных исполнения: с графическим экраном и без экрана. При использовании версии с экраном информацию о температуре контролируемого оборудования можно просмотреть «на месте», цветом выделяются температуры зон, в которых наблюдается превышение заданных пороговых значений.

Итоговая информация о состоянии выключателя и температуре контактов и шин в ячейке КРУ передается от прибора BDM/CB по интерфейсу связи RS-485 в центральный прибор BDM системы мониторинга КРУ, в котором интегрируется вся информация о состоянии контролируемых выключателей. Информация визуализируется на графическом экране прибора и сохраняется в памяти. Далее вся информация об остаточном ресурсе оборудования ячейки КРУ передается на общий сервер системы мониторинга и управления эксплуатацией высоковольтного оборудования.



Рис. 5. Беспроводной датчик BDM/T и приемник сигналов WDM-T1 для контроля температуры контактов выключателя и токоведущих шин

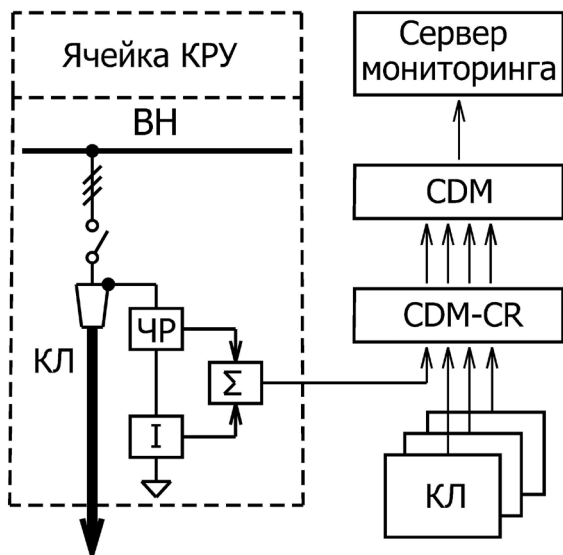


Рис. 6. Технические средства мониторинга высоковольтных кабельных линий

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Состав и расположение технических средств системы диагностического мониторинга высоковольтных кабельных линий показаны на рис. 6.

Первичные датчики, предназначенные для контроля частичных разрядов и токов «ЧР» и токов утечки в экране «I», представляют собой кольцевые трансформаторы тока. Сердечник датчика контроля частичных разрядов изготавливается из высокочастотного феррита, а для датчика тока промышленной частоты используется сердечник из электротехнической стали. Оба первичных датчика располагаются в высоковольтном отсеке КРУ рядом с контролируемым кабелем. Датчики монтируются на проводнике (шине) заземления экрана кабельной линии.

Сигналы с обоих первичных датчиков, высокочастотный и низкочастотный, суммируются в модуле «Σ». Полученный комплексный сигнал по коаксиальному кабелю передается в модуль контроля токов утечки марки CDM-CR, который предназначен для контроля токов утечки промышленной частоты в экранах кабельных линий. Модуль располагается в помещении КРУ, так как длина сигналь-

ных коаксиальных кабелей от датчиков не может быть больше 50–80 метров.

В приборе CDM-CR производится разделение высокочастотных и низкочастотных сигналов: токи утечки экранов КЛ промышленной частоты регистрируются, а высокочастотные импульсы частичных разрядов передаются для дальнейшей обработки и анализа в прибор марки CDM.

Прибор марки CDM-CR, показанный на рис. 7, в общей системе мониторинга состояния высоковольтных КЛ предназначен не только для контроля токов утечки. Он имеет дополнительное диагностическое назначение: в нем реализована функция рефлектометра, при помощи которого можно контролировать состояние КЛ под рабочим напряжением. Для этого в прибор встроен генератор тестовых импульсов, параметры которых (амплитуда и длительность) могут программно регулироваться по командам с прибора CDM.

Встроенный генератор импульсов CDM-CR по сигналу с прибора CDM оперативно подключается к выбранной КЛ. Генератор начинает посылать тестовые импульсы в датчик частичных разрядов, расположенный на шине заземления экрана кабеля, который будет наводить импульсы в контролируемой КЛ.

Этот датчик одновременно является также и приемником импульсов, для чего он через схему развязки подключен к входному каналу прибора CDM, при помощи которого будет зарегистрирован и тестовый сигнал, и все отраженные импульсы, пришедшие из кабельной линии. После статистической обработки получается рефлектограмма кабельной линии, зарегистрированная под рабочим напряжением.

При помощи этой рефлектограммы можно проводить стандартную локацию места возникновения дефектов в КЛ. Использование рефлектограмм расширяет диагностические возможности системы мониторинга высоковольтных КЛ, так как позволяет выявлять дефекты типа «водяные деревья в изоляции», возникающие обычно вблизи соединительных и концевых муфт. Этот дефект развивается при повреждении внешней оболочки кабеля и попадании под нее воды, которая под воздействием высоких напряжений проникает в изоляцию кабеля. Оперативная диагностика «водяных деревьев» при помощи рефлектограмм очень важна, так как при использовании метода контроля частичных разрядов такой дефект не выявляется.

Высокочастотные импульсы частичных разрядов из прибора CDM-CR передаются в базовый прибор марки CDM, который предназначен для мониторинга технического состояния изоляции кабельных линий, подключенных в одном КРУ. Внешний вид прибора показан на рис. 8. В зависимости от размеров контролируемого КРУ может быть выбрана необходимая модификация системы CDM, которая может быть использована для мониторинга от 6 до 45 кабельных линий.

В приборе системы CDM контроль технического состояния высоковольтной изоляции кабельных линий, соединительных и концевых муфт, осуществляется с использованием метода регистрации и анализа частичных разрядов. Этот метод имеет максимально высокую чувствительность и эффективность для диагностики большинства дефектов в кабельных линиях с изоляцией любого типа.

К достоинствам системы мониторинга кабельных линий CDM можно отнести следующее:

- многоканальное исполнение измерительного прибора CDM, что позволяет получить минимальную стоимость комплекса диагностического оборудования, приведенную к одной контролируемой кабельной линии;
- для повышения достоверности работы в приборе CDM реализовано большое количество методов отстройки импульсов частичных разрядов от импульсов высокочастотных помех. Эти средства, практически подтвердившие свою эффективность, работают в составе аппаратных средств и программных алгоритмов;
- в программное обеспечение прибора CDM входит экспертная система, которая позволяет определять тип дефекта в изоляции, являющегося источником частичных разрядов, определяется степень развития дефекта и оценивается степень его опасности;
- возникновение в зоне дефекта импульсов ЧР достаточно большой амплитуды позволяет реализовать в экспертном ПО еще один метод онлайн локации места дефекта, базирующийся на контроле времени прихода вторичного импульса, отраженного от противоположного конца кабельной линии;
- на основании оценки технического состояния КЛ по результатам параметрической и экспертной диагностики строится адаптивная математическая модель кабельной линии. По параметрам этой модели определяется остаточный ресурс КЛ, формируется график сроков и объемов проведения сервисных и ремонтных работ;
- установка датчиков частичных разрядов на проводнике заземления экрана кабельной линии в высоковольтном отсеке КРУ дополнительно позволяет контролировать состояние изоляции выключателя и соединительных шин в ячейке.

Система CDM предназначена для контроля параметров изоляции кабельных линий и работает полностью в автоматическом режиме. Объемы внутренней памяти прибора хватает для хранения замеров частичных разрядов в течение достаточно длительного времени. Полученная информация и диагностические заключения оперативно передаются в систему АСУ ТП более высокого уровня.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Центральный элемент комплексной системы мониторинга технического состояния, диагностики дефектов и управления эксплуатацией комплекса высоковольтного оборудования КРУ и КЛ – единый АРМ мониторинга.

Он включает в себя:

- выделенный сервер хранения информации с программным обеспечением INVA, решающий все вопросы по получению, хранению и обработке первичной информации. При помощи программного обеспечения INVA автоматически создаются технологические документы, на основании которых персонал станции формирует оптимальные управляющие воздействия на эксплуатацию, определяет сроки и объемы необходимых ремонтных работ для высоковольтного оборудования;
- локальные сетевые и WEB программные решения для просмотра информации из базы данных АРМ о состоянии роторного оборудования специалистами различных служб станции. Такой просмотр предусматривает для разных специалистов различный уровень информационного допуска,

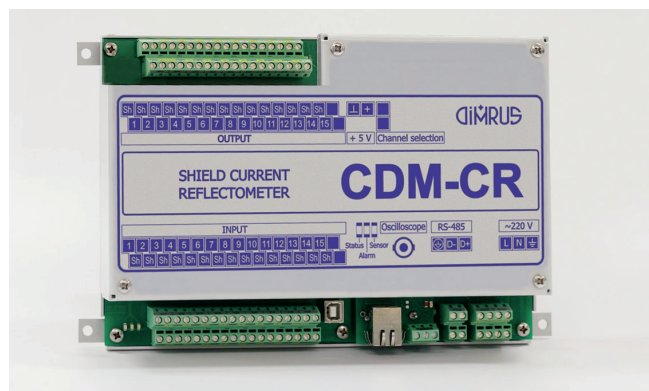


Рис. 7. Прибор CDM-CR для контроля токов утечки в экранах кабельных линий и регистрации РЕФЛЕКТОГРАММ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ



Рис. 8. Прибор марки CDM-15 для мониторинга 15 высоковольтных кабельных линий

в зависимости от технологических и функциональных приоритетов и решаемых задач;

- расширенный режим работы со специалистами службы управления эксплуатацией электротехнического оборудования. Формирование справок о необходимости, сроках и объемах проведения работ по дополнительному контролю оборудования, ремонтных и наладочных работах.

Информация из базы данных и результаты работы экспертной части программного обеспечения INVA доступны не только пользователям локальной сети станции. Она может быть интегрирована в другие технологические и организационные уровни управления эксплуатацией оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено программно-техническое решение для практической реализации системы диагностики, оценки технического состояния и определения остаточного ресурса КРУ и КЛ комплекса высоковольтного оборудования 6÷20 кВ промышленного предприятия.

Результаты работы предлагаемой системы – конкретные рекомендации по управлению эксплуатацией оборудования и определению сроков и объемов необходимых ремонтных и сервисных воздействий на контролируемое оборудование.

Внедрение предлагаемой системы является практической реализацией на промышленном предприятии управления обслуживанием высоковольтного оборудования по техническому состоянию.