

Мониторинг технического состояния и управление эксплуатацией ячеек КРУ 6÷35 кВ с вакуумными выключателями

1. Введение

Для повышения эффективности работы распределительной высоковольтной подстанции 6÷35 кВ, в состав которой практически всегда входит комплексное распределительное устройство (КРУ), необходимо использовать современные средства оперативного контроля и диагностики технического состояния всего высоковольтного оборудования подстанции, в том числе коммутационного.

Оптимальная система непрерывного контроля и диагностики состояния ячеек КРУ должна быть ориентирована не только на проведение диагностики и оценки технического состояния оборудования, но и, в основном, на организацию эффективной эксплуатации коммутационного оборудования по текущему техническому состоянию.

Поскольку КРУ является узловой частью комплекса высоковольтного оборудования всех цепей транзита электроэнергии в рамках подстанции, то и управление эксплуатацией коммутационного оборудования подстанции должно быть синхронизировано с условиями работы всего другого высоковольтного оборудования, обеспечивающего электроснабжение конкретных потребителей.

Широкое использование высоковольтных камер с вакуумной изоляцией улучшило коммутационные возможности и надежность работы ячеек, но привело к тому, что больший вклад в общую аварийность КРУ стали вносить проблемы и дефекты в других элементах и подсистемах ячеек. Например, сравнительно более частыми причинами выхода из строя стали локальные перегревы соединений шин, проблемы в высоковольтной изоляции шин, выключателей и подключенных кабельных линий, а также общее ухудшение технического состояния конструктивных элементов ячейки.

Это привело к тому, что к современным системам мониторинга коммутационных ячеек КРУ стали предъявляться расширенные функциональные требования, так как оптимальная по составу и функциям система мониторинга должна контролировать техническое состояние не только самого выключателя, но и состояние других, на первый взгляд менее важных, подсистем.

2. Технические особенности организации диагностического мониторинга ячеек КРУ

По сравнению с другим высоковольтным оборудованием подстанций алгоритм работы систем мониторинга коммутационных ячеек имеет отличительные особенности. Самые главные из них:

- Выключатель, установленный в ячейке КРУ, работает только в короткие отрезки времени, когда происходит коммутация нагрузки. Поэтому максимум диагностической информации система непрерывного мониторинга должна получать в момент регистрации процесса переключений.

- Заранее неизвестны условия, в которых будет происходить следующая коммутация выключателя. Поэтому, потенциально, один и тот же выключатель может неоднократно успешно отключить номинальные токи нагрузки, но выйти из строя при первой же коммутации токов короткого замыкания. Поэтому при оценке остаточного ресурса выключателя приходится ориентироваться на самый тяжелый режим включения-отключения токов короткого замыкания нагрузки.

- Система диагностического мониторинга коммутационной ячейки, как уже указывалось выше, должна контролировать техническое состояние не только выключателя, но и других подсистем ячейки, которые потенциально могут явиться причиной аварийного выхода оборудования из эксплуатации. В соответствии с этим и итоговый коэффициент технического состояния ячейки должен включать в себя параметры состояния этих подсистем.

- Сравнительно невысокая стоимость коммутационной ячейки, по сравнению с другим высоковольтным оборудованием, формирует очень жесткие требования к структуре поставляемого диагностического оборудования. Для получения реального экономического эффекта от внедрения системы непрерывного контроля ячейки цена поставки технических средств системы мониторинга и диагностики должна быть минимизирована.

3. Обзор методов и средств, применяемых для диагностики ячеек КРУ

В этот обзор включены только те методы, которые работают в режиме «on-line» и практически применимы для оперативной диагностики и оценки технического состояния коммутационных ячеек КРУ, которые по соотношению «информативность/цена поставки» могут быть использованы в системах непрерывного мониторинга ячеек КРУ.

Диагностические средства, включенные в этот обзор, соответствуют определенным требованиям:

- Из обзора исключены «экзотические методы диагностики», которые потенциально хотя и имеют высокую информативность и достоверность, но реальная цена их поставки может быть соизмеримой или даже превышать цену всей ячейки.
- Вторым ограничением для выбора доступных методов диагностики ячеек КРУ является их техническая способность контролировать состояние сложного энергетического оборудования, самая ответственная часть которого находится под высоким рабочим напряжением.
- В-третьих, важным требованием для выбора оптимальных диагностических методов является наличие в них нормативных или устоявшихся критериев оценки технического состояния. Если таких жестких критериев качества в методе нет, то должна быть, как минимум, возможность адаптивного формирования их значений в процессе эксплуатации.

Рассмотрение доступных методов диагностики проведем применительно к различным подсистемам коммутационной ячейки КРУ.

3.1. Высоковольтный вакуумный выключатель

Для контроля технического состояния выключателя, установленного в ячейке КРУ, функционально состоящего из нескольких отдельных подсистем, необходимо использовать несколько диагностических методов, результаты работы которых должны дополнять друг друга.

Максимально эффективные результаты могут дать следующие методы контроля выключателя:

- Метод контроля временных параметров работы выключателя, таких как время коммутации, разновременность работы по фазам, время фиксации контактов и т. д. Для определения этих важных параметров выключателя комплексно используются несколько методов диагностики: контроль формы изменения токов управления выключателем, контроль формы изменения фазных токов нагрузки в процессе коммутации, контроль динамических (вибрационных) процессов работы выключателя.
- Контроль состояния главных контактов в вакуумных камерах выключателя. Для оценки их состояния анализируются графики изменения фазных токов нагрузки выключателя, полученные с высоким временным разрешением. На этих графиках непосредственно в момент включения и отключения нагрузки можно выявить признаки ухудшения состояния контактов.
- Контроль состояния вакуума в коммутационных камерах выключателя. Прямой контроль глубины вакуума в современных камерах, особенно под рабочим напряжением, практически невозможен, но косвенно этот параметр можно оценивать, анализируя длительность дуговых процессов в камерах при отключении нагрузки. Естественно, что интенсивность дуговых процессов в вакуумной камере сильно зависит от величины коммутируемого камерой тока и его реактанса, но в системе мониторинга это влияние можно учесть при комплексном контроле параметров.

3.2. Контроль состояния контактов и соединений в высоковольтных шинах

Эта составляющая общей диагностики состояния ячейки позволяет оценить температуру подвижных контактов, при помощи которых выключатель подключается к системе шин, и самого выключателя, а также и состояние стационарных контактных соединений высоковольтных шин внутри ячейки и в шинном отсеке. Поскольку соединительные шины в ячейке находятся под высоким напряжением, то контроль их температуры возможен только или с использованием бесконтактных дистанционных пирометров, или при помощи установки контактных датчиков температуры, которые получают питание от токов нагрузки ячейки и передают информацию в систему мониторинга по беспроводным каналам связи. Конструктивно и экономически выгоднее использовать беспроводные датчики температуры.

3.3. Состояние высоковольтной изоляции в ячейке

Практически единственным эффективным способом контроля состояния высоковольтной изоляции ячеек КРУ под рабочим напряжением является использование метода регистрации и анализа частичных разрядов. Этот метод имеет высокую чувствительность и может диагностировать дефекты в изоляции на ранних стадиях их развития. Достоинством метода является возможность одновременно контролировать состояния изоляции шин, выключателя и даже отходящей кабельной линии. При переводе измерительной схемы контроля частичных разрядов в режим пониженной чувствительности появляется возможность контролировать наличие в ячейке более мощных дуговых разрядов, т. е. реализовать функции дугового мониторинга внутри ячейки.

3.4. Техническое состояние конструктивных элементов ячейки

Причиной выхода из строя коммутационной ячейки может быть и возникновение проблем в конструкции, в основном это относится к ослаблениям болтовых и сварных соединений. Такие дефекты в ячейке могут выявляться при использовании метода вибрационного контроля, в котором анализируются динамические удары в приводе выключателя и параметры возникающих после них затухающих колебаний в элементах конструкции ячейки.

В приведенной ниже таблице приведен перечень четырех наиболее ответственных подсистем высоковольтной ячейки с вакуумным выключателем, для контроля технического состояния которых используются шесть различных методов экспертной диагностики, перечень которых приведен в столбцах

таблицы. Данные методы выбраны из условий максимальной применимости для контроля коммутационных ячеек с вакуумными выключателями при минимальных материальных затратах.

№	Контролируемая подсистема коммутационной ячейки КРУ	Диагностические методы					
		Контроль токов управления	Контроль фазных токов нагрузки	Температурный мониторинг	Контроль состояния изоляции	Контроль дуговых процессов	Вибрационные процессы
1	Состояние вакуумного выключателя	+	+	+	+	+	+
2	Контроль состояния соединительных шин		+	+	+	+	
3	Контроль высоковольтной изоляции				+	+	
4	Состояние конструкции ячейки						+

Из таблицы видно, что применимость и универсальность разных методов экспертной диагностики методов существенно различается. Для разных функциональных подсистем ячейки используются различные наборы диагностических методов. Интегрирование экспертной информации от этих методов позволяет оперативно определять текущее техническое состояние контролируемой подсистемы, а в итоге и всей коммутационной ячейки КРУ.

Полученная таким образом экспертная оценка технического состояния обязательно должна дополняться результатами проведения параметрической диагностики, основанной на сравнении параметров нормированных эксплуатационных значений (общего количества выполненных коммутаций и суммарной отключенной выключателем мощности) с паспортными значениями этих параметров, обычно предоставляемых заводом-изготовителем.

4. Прогнозирование сроков проведения ремонтных работ

Определение текущего технического состояния ячейки КРУ является первой и очень важной функцией для работы системы диагностического мониторинга. Для реализации этой функции в программном обеспечении мониторинга используется специализированное экспертное ядро, которое позволяет оперативно выявлять признаки дефектных состояний в контролируемом оборудовании. Экспертное ядро системы мониторинга в своей работе использует математические модели и образы наиболее часто встречающихся дефектных состояний, которые были созданы практическими экспертами или были получены с использованием нейронных сетей.

Еще более актуальной для службы эксплуатации оборудования является информация о практической возможности и сроках дальнейшей безаварийной эксплуатации контролируемого оборудования. Наличие информации такого уровня позволяет реализовать на практике наиболее эффективную систему эксплуатации и ремонтов высоковольтного оборудования по техническому состоянию. Эта система на основании определенного экспертной системой текущего технического состояния и результатов работы алгоритмов предиктивной аналитики конкретно указывает персоналу, когда (по времени) надо проводить ремонт или обслуживание оборудования, состав (объем) этих ремонтных работ.

Прогнозирование сроков безаварийной работы ячейки КРУ, как и любого другого сложного оборудования, возможно только при использовании в экспертном программном обеспечении системы мониторинга динамических математических моделей контролируемого оборудования. Эти модели должны описывать изменение параметров контролируемой ячейки в процессе эксплуатации. Достаточно часто такие математические модели называются цифровыми двойниками оборудования, так как при их создании подразумевается получение максимально подробной аналогии физических и математических процессов в реальном объекте и в его цифровом аналоге.

Целевая функция создания цифрового двойника (математической модели) ячейки КРУ предполагает последовательное решение четырех основных экспертных задач, связанных с эксплуатацией оборудования:

- Оценка текущего технического состояния оборудования с выявлением признаков наиболее часто встречающихся дефектных состояний, с описанием степени развития этих дефектов и определением их эксплуатационной опасности.
- Прогнозирование изменения технического состояния ячейки на будущих этапах эксплуатации как при отсутствии в ней признаков дефектных состояний (это нормальный или эволюционный износ оборудования ячейки), так и при наличии в ней выявленных признаков дефектных состояний (анормальный или ускоренный износ ячейки).
- Автоматизированное планирование оптимальных сроков и объемов проведения ремонтных и сервисных работ с последующей оперативной оценкой качества выполненных ремонтных работ.

- Включение результатов работы системы мониторинга ячеек КРУ, особенно рекомендаций по комплексному управлению эксплуатацией высоковольтного оборудования, в единое информационное поле цифровой подстанции.

Оптимальный по функциям цифровой двойник любого высоковольтного оборудования обычно представляет собой самонастраивающуюся математическую модель, коэффициенты и параметры которой учитывают наиболее важные процессы в контролируемом оборудовании.

Автоматическая корректировка (адаптация) параметров этой модели производится для учета меняющихся условий работы оборудования. Это позволяет своевременно и максимально точно учесть:

- Изменение условий эксплуатации контролируемой ячейки КРУ, параметров ее нагрузки.
- Возникновение в ячейке признаков дефектных состояний, выявляемых экспертной системой.
- Скорость саморазвития выявленных дефектных состояний, возможность генерации и развития новых дефектных признаков.

В результате адаптации для каждой контролируемой ячейки формируется уникальная цифровая модель. Использование такой практически ориентированной модели каждой ячейки, которой соответствует уникальный цифровой двойник, является обязательным условием для решения вопросов оптимального управления эксплуатацией высоковольтного оборудования КРУ.

5. Система марки СВМ для мониторинга ячеек КРУ с вакуумными выключателями

В соответствии с вышеописанными требованиями к диагностическим средствам определения технического состояния коммутационных ячеек фирмой ДИМРУС была разработана и производится система диагностического мониторинга марки СВМ, предназначенная для управления эксплуатацией ячеек КРУ с вакуумными выключателями.

Все технические и программные средства мониторинга и диагностики системы СВМ реализованы в трех составных технических элементах, это:

- Главный модуль системы мониторинга СВМ.
- Дополнительный диагностический модуль СВМ/PD.
- Комплект беспроводных датчиков температуры марки BDM/T.

5.1. Главный модуль системы мониторинга марки СВМ



Главный модуль системы мониторинга СВМ

В главном модуле системы СВМ технически реализована функция контроля состояния вакуумного выключателя ячейки. В модуле регистрируются токи включения – отключения выключателя и фазные токи нагрузки, которые измеряются при помощи трех трансформаторных датчиков тока марки RFCT-5, включаемых (одеваемых) на проводники вторичных цепей измерительных трансформаторов тока.

Главный модуль СВМ является верхним экспертным уровнем всей системы мониторинга, в нем формируется итоговое комплексное заключение о техническом состоянии контролируемой ячейки. Из модуля

в систему АСУ-ТП цифровой подстанции передается готовая информация, на основании которой принимаются решения о необходимости и сроках проведения ремонтных работ.

Модуль передает как первичную, так и итоговую диагностическую информацию на панельный компьютер, который может быть установлен на лицевой панели ячейки, и (или) непосредственно в систему АСУ-ТП цифровой подстанции по проводному интерфейсу RS-485.

Главный модуль системы мониторинга СВМ имеет техническую возможность передавать, по запросу, зашифрованную информацию по беспроводному интерфейсу Bluetooth на смартфон или планшет, имеющийся у оперативного персонала подстанции. Эта функция передачи информации о текущем состоянии контролируемой ячейки особенно актуальна при локальном монтаже системы мониторинга КРУ, когда стационарные каналы связи не используются.

Модуль СВМ конструктивно выполнен в металлическом негерметичном корпусе, который предназначен для монтажа на DIN рейке в релейном отсеке ячейки. Габаритные размеры модуля СВМ составляют 70*82*165 мм, рабочий диапазон температур от -40 до +60 градусов. Питание модуля осуществляется от переменного или оперативного постоянного тока. От главного модуля получает питание дополнительный диагностический модуль СВМ/PD.

5.2. Дополнительный диагностический модуль марки CBM/PD



Диагностический модуль CBM/PD

Диагностический модуль CBM/PD системы мониторинга CBM устанавливается в высоковольтном отсеке вакуумного выключателя ячейки и предназначен для решения трех диагностических задач:

- Контроль состояния высоковольтной изоляции соединительных шин, самого выключателя, а также отходящих кабельных линий, к которым подключена нагрузка, по наличию и параметрам частичных разрядов.
- Оперативный сбор текущей информации от беспроводных датчиков температуры марки BDM/T, установленных на шинах и контактах в высоковольтном отсеке ячейки КРУ. Датчики контролируют оперативные изменения температур, связанных с протекающими токами и переходными сопротивлениями.
- При помощи технических средств дополнительного диагностического модуля CBM/PD производится электромагнитная и оптическая регистрации интенсивности и длительности дуговых процессов, возникающих в высоковольтном отсеке контролируемой ячейки КРУ как во время коммутаций, так и на интервалах времени между ними.

Диагностический модуль CBM/PD монтируется в высоковольтном отсеке контролируемой ячейки на боковой стенке ячейки и подключается к главному модулю системы мониторинга при помощи кабеля типа «витая пара», по которому подается напряжение питания модуля и передается вся необходимая информация.

Модуль конструктивно выполнен в герметичном металлическом корпусе размером 35*150*170 мм. На верхней части корпуса модуля в стандартных кабельных вводах располагаются три высокочастотные антенны, предназначенные: для регистрации частичных разрядов в высоковольтной изоляции, для контроля дуговых процессов в ячейке и для связи с беспроводными датчиками температуры.

На лицевой крышке модуля CBM/PD располагается встроенный оптический датчик, предназначенный для регистрации светового излучения от локальных дуговых процессов, которые могут возникнуть в высоковольтном отсеке на высоковольтных шинах контролируемой ячейки.

Достоинством конструкции диагностического модуля CBM/PD является то, что все первичные датчики, кроме беспроводных датчиков температуры BDM/T, располагаются внутри корпуса модуля и при монтаже системы мониторинга не требуют дополнительного монтажа и подключения. Такое конструктивное исполнение диагностического модуля значительно упрощает и облегчает первичный монтаж оборудования системы мониторинга ячеек КРУ.

5.3. Беспроводные датчики контроля температуры BDM/T



беспроводной датчик температуры марки BDM/T

Беспроводные датчики марки BDM/T устанавливаются на поверхности высоковольтных шин ячейки, вблизи подвижных контактов, служащих для подключения выключателя, и даже на контактных выводах вакуумных камер. Датчики температуры BDM/T предназначены для оперативного контроля температурного состояния соединений в высоковольтной силовой цепи ячейки под рабочим напряжением.

В одной ячейке, в соответствии с требованиями Заказчика, в разных точках системы шин и контактов коммутационной ячейки, может быть смонтировано от одного до пятнадцати и даже более беспроводных датчиков температуры.

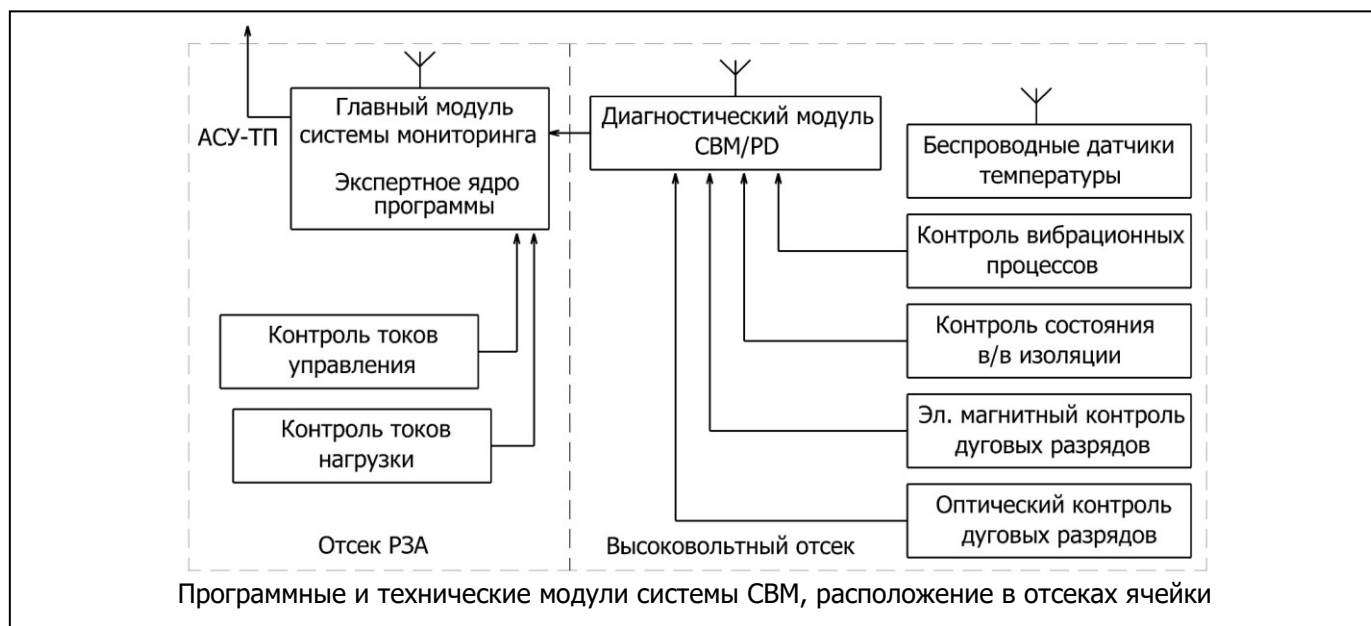
Информация беспроводных датчиков температуры BDM/T оперативно передается в диагностический модуль CBM/PD, или же непосредственно в главный модуль системы мониторинга CBM, по беспроводному интерфейсу Bluetooth. Беспроводные приемники информации есть в каждом модуле.

Датчик температуры BDM/T конструктивно выполнен в силиконовом герметичном корпусе размером 37*25*51 мм. Для надежного монтажа на токопроводящей шине с датчиком поставляется специализированный универсальный комплект крепления.

Диапазон рабочих температур высоковольтных шин и контактов, которые можно контролировать при помощи беспроводных датчиков марки BDM/T, составляет от -40 до +130 градусов. Ограничение по максимальной температуре связано с работоспособностью встроенной электроники датчиков.

Питание встроенной электроники датчиков температуры производится от внешних магнитных полей рассеяния, наводимых вокруг шин токами нагрузки. Минимально датчики начинают работать, измерять

температуру и передавать информацию по беспроводному интерфейсу датчики могут при протекании по контролируемым шинам токов нагрузки от 5 А.



5.4. Общая структура технических и программных средств системы CBM

Состав и расположение технических и программных средств системы CBM для мониторинга коммутационной ячейки КРУ приведена на схеме.

Такой набор технических, программных и экспертных решений полностью соответствует всем приведенным выше условиям и параметрам для эффективной системы мониторинга коммутационной ячейки, оснащенной вакуумным выключателем.

5.5. Монтаж технических средств системы мониторинга CBM для нескольких коммутационных ячеек в составе КРУ с рабочим напряжением 6÷35 кВ

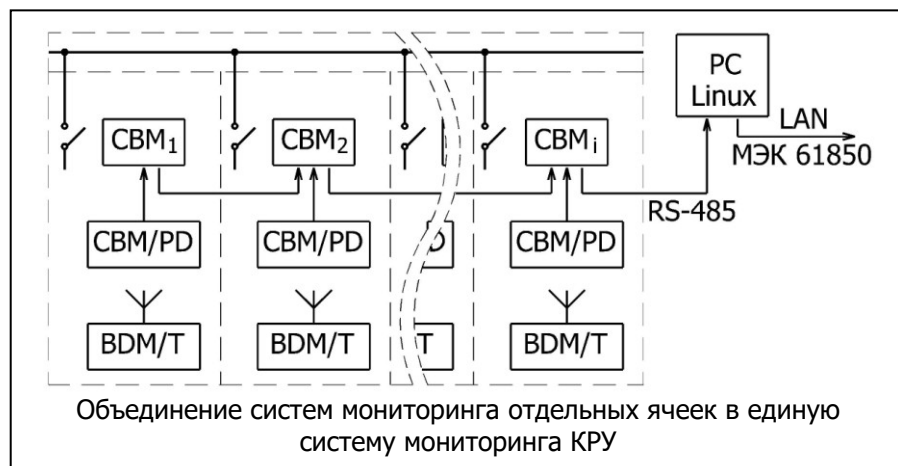
Беспроводные датчики температуры марки BDM/T при помощи дополнительных крепежных элементов монтируются внутри ячейки на токоведущих шинах в критических местах, где возможно локальное повышение температуры из-за увеличения переходных сопротивлений. Необходимое количество датчиков температуры, устанавливаемых в одной ячейке, зависит от особенностей конструкции ячейки и требований технического задания на систему мониторинга.

Датчики получают питание от токов, протекающих в шинах. При монтаже датчиков необходимо их главную ось ориентировать в направлении протекания рабочих токов по контролируемой токоведущей шине.

Текущую информацию о измеренной температуре датчики BDM/T передают по беспроводному интерфейсу Bluetooth в диагностический модуль CBM/PD или в главный модуль системы CBM, который также оснащен приемником беспроводной информации.

Возможное количество датчиков температуры в одной ячейке не ограничено и определяется только техническим заданием на поставку системы мониторинга КРУ.

Диагностические модули марки CBM/PD монтируются в высоковольтных отсеках ячейки, рядом с

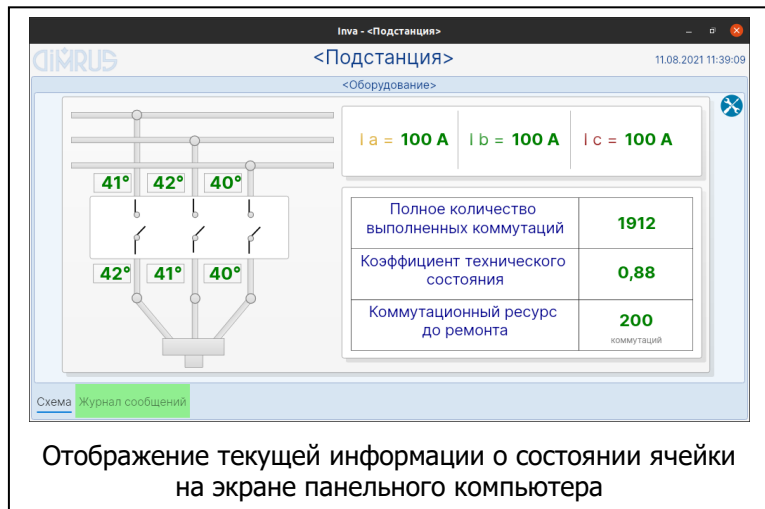


выключателем, обычно на одной из боковых стенок. Функционально эти диагностические модули собирают информацию от беспроводных датчиков температуры BDM/T и служат для контроля наличия в контролируемой ячейке частичных и дуговых разрядов.

Главные модули системы мониторинга марки CBM располагаются в релейных отсеках ячеек и обычно монтируются на общей DIN рейке. К главным модулям мониторинга по локальному проводному интерфейсу RS-485 подключаются

диагностические модули СВМ/PD.

Главные модули системы мониторинга отдельных ячеек интегрируются в единую систему мониторинга КРУ при помощи последовательного подключения к общему панельному компьютеру мониторинга секции шин с активным экраном 10". Технически подключение модулей производится при помощи отдельного проводного интерфейса связи марки RS-485.



На центральном панельном компьютере комплексной системы мониторинга всего КРУ устанавливается специализированное программное обеспечение управления эксплуатацией марки СВМ-INVA. Это ПО предназначено для сбора от главных модулей систем мониторинга ячеек, архивации и отображения на экране информации о состоянии всех контролируемых коммутационных ячеек КРУ.

Если в системе мониторинга отдельной коммутационной ячейки КРУ предполагается использовать автономный панельный компьютер, подключенный к главному модулю СВМ и отображающий диагностическую информацию только об этой контролируемой ячейке, то он использует экран меньшего

размера с диагональю не более 7".

5.6. Особенности программного обеспечения системы мониторинга ячеек КРУ

Программные и технические средства системы мониторинга марки СВМ отвечают всем необходимым требованиям по обеспечению совместимости и информационной безопасности, предъявляемым к оборудованию современной цифровой подстанции.

Основные особенности программного обеспечения системы мониторинга коммутационных ячеек КРУ, обеспечивающие защиту информации:

- Передача информации от датчиков температуры контактов и шин в диагностический модуль СВМ/PD производится по беспроводному интерфейсу Bluetooth с использованием защитного шифрования.
- Панельный компьютер системы мониторинга с установленным на нем программным обеспечением марки СВМ-INVA работает под управлением операционной системы Linux.
- Вся собранная системой мониторинга первичная и полученная экспертная информация о техническом состоянии контролируемых ячеек КРУ передается из панельного компьютера на сервер цифровой подстанции по протоколу связи МЭК 61850.
- При необходимости информацию о состоянии контролируемой ячейки оперативный персонал подстанции может «просмотреть на месте» при помощи переносного планшета или смартфона, связавшись с главным модулем системы СВМ ячейки по шифрованному беспроводному каналу Bluetooth.

Заключение

Система СВМ является оптимальным решением для организации диагностического мониторинга и управления эксплуатацией ячеек КРУ с рабочим напряжением 6÷35 кВ.

Достоинствами системы мониторинга марки СВМ являются следующие особенности:

- Для контроля состояния ячейки использован минимальный набор удобных для монтажа датчиков.
- Применены современные микропроцессорные и коммуникационные решения.
- Диагностическая эффективность СВМ обусловлена наличием многоуровневой экспертной системы.
- Использование адаптивных цифровых моделей позволяет управлять эксплуатацией ячейки.