

Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов с литой изоляцией с рабочим напряжением 6÷10 кВ



Рис. 1. Система мониторинга TDM-10S для контроля сухих трансформаторов 10 кВ с литой изоляцией.

Силовые трансформаторы с литой изоляцией обмоток находят все большее практическое применение. Наряду с наличием существенных достоинств, эксплуатация таких трансформаторов выявила также ряд специфических проблем, связанных с конструктивным исполнением обмоток.

Используемый для изоляции обмоток сухих трансформаторов эпоксидный компаунд вследствие воздействия повышенных температур и механических воздействий может растрескиваться, что в конечном итоге может завершиться пробоем изоляционных промежутков в обмотках и аварийным выходом трансформатора из эксплуатации.

Для своевременного выявления и контроля скорости развития возникающих в изоляции обмоток трансформатора опасных дефектов необходимо контролировать два наиболее важных параметра: рабочую температуру обмоток трансформатора, а также возникновение и развитие в обмотках высокочастотной разрядной активности, которая практически всегда

сопровождает возникновение дефектов в монолитной изоляции.

Для проведения непрерывного контроля этих параметров фирмой DIMRUS разработаны две диагностические системы: система мониторинга марки TDM-10S для оперативного контроля технического состояния силовых распределительных трансформаторов 6÷10 кВ с литой изоляцией, а также более сложная и эффективная система марки TDM-35S для мониторинга силовых трансформаторов с рабочим напряжением 35 кВ.

Система TDM-10S для мониторинга технического состояния трансформаторов с литой изоляцией с рабочим напряжением 6-10 кВ.

Система мониторинга марки TDM-10S предназначена для оперативного контроля технического состояния и управления эксплуатацией силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6÷10 кВ и литой эпоксидной изоляцией обмоток.



Рис. 2. Датчик BA-2 для контроля разрядной активности в сухих трансформаторах.

Для проведения экспертной оценки текущего технического состояния и выявления дефектов в сухих силовых трансформаторах в системе мониторинга марки TDM-10S используются несколько взаимодополняющих диагностических методов. Для работы каждого метода в системе мониторинга используются специализированные первичные датчики.

- Контроль состояния литой эпоксидной изоляции обмоток трансформатора на основании регистрации и анализа разрядной активности в дефектных зонах. Для этой цели в системе мониторинга используется направленная электромагнитная антенна (датчик) закрытого исполнения марки BA-2, которая располагается внутри защитного кожуха трансформатора. Внешний вид датчика частичных разрядов BA-2 (электромагнитной антенны) показан на рисунке 2. Канал измерения и обработки импульсов разрядной активности в приборе устроен так, что с его помощью регистрируются не только классические частичные разряды, имеющие сравнительно небольшую амплитуду, но также и более мощные искровые процессы

в дефектных зонах изоляции обмоток трансформатора, которые возникают уже на более поздних стадиях

развития дефектов в эпоксидной изоляции и предшествуют аварийному пробое. Важным достоинством использования датчика разрядной активности марки ВА-2 в системах мониторинга является то, что он работает в сверхвысокочастотном диапазоне, поэтому имеет хорошую чувствительность и высокую помехозащищенность.

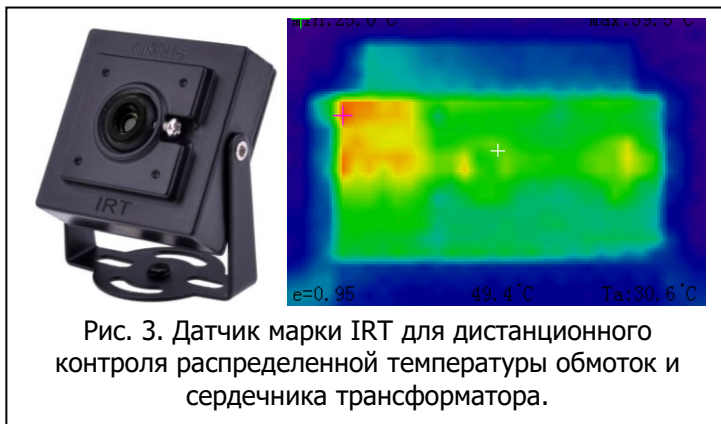


Рис. 3. Датчик марки IRT для дистанционного контроля распределенной температуры обмоток и сердечника трансформатора.

- Регистрация и анализ температурных режимов работы трансформатора. Для этой цели в системе мониторинга TDM-10S используется датчик марки IRT, предназначенный для дистанционного контроля распределения температуры обмоток и сердечника трансформатора, показанный на рисунке 3. По своим функциям датчик IRT представляет собой простейший тепловизор с разрешением 24*36 зоны, чего вполне достаточно для определения и локализации наиболее нагретой точки обмоток и сердечника контролируемого трансформатора.

Линейные размеры элементарных зон контроля температуры обмоток определяются удалением датчика от трансформатора так как стандартный угол измерения для этого датчика составляет 110 угловых градусов. Вместо дистанционного датчика контроля температуры обмоток марки IRT в состав поставки системы мониторинга марки TDM-10S может быть включен обычный контактный датчик типа Pt-100, но в этом случае эффективность работы системы мониторинга температурных режимов обмоток и сердечника существенно снизится, так как этим датчиком будет контролироваться температура только одной точки трансформатора.



Рис. 4. Датчик IFCT-5 для контроля тока нагрузки.

- Контроль нагрузки трансформатора в процессе работы производится при помощи кольцевого трансформаторного датчика тока марки IFCT-5, который монтируется на проводниках вторичных цепей измерительных трансформаторов тока. При таком включении он не оказывает никакого влияния на работу ТТ. Внешний вид датчика IFCT-5 приведен на рисунке 4. Знание текущей нагрузки трансформатора позволяет более корректно оценивать ее влияние на температурные режимы работы обмоток и сердечника и выявлять признаки дефектных состояний.

- Контроль температуры и влажности окружающей среды. На основании использования этих параметров в системе мониторинга оценивается эффективность охлаждения обмоток трансформатора, корректно диагностируются поверхностные загрязнения и локальные повреждения литой изоляции обмоток трансформатора. Совместный учет нагрузки трансформатора, температуры обмоток, температуры и влажности воздуха и интенсивности разрядных процессов позволяет оперативно строить цифровую модель старения компаундной изоляции обмоток трансформатора, определять ее остаточный ресурс.

- Контроль вибрационных процессов в трансформаторе. Датчик вибрации устанавливается на нижней части сердечника трансформатора, что дает возможность проводить оперативную диагностику состояния конструкции трансформатора, выявлять наличие ослаблений и механических дефектов различной природы. Эта информация также учитывается при определении остаточного ресурса трансформатора. Поставка датчика вибрации является опцией для системы мониторинга TDM-10S.

Установка прибора и датчиков системы TDM-10S на трансформаторе

Прибор системы мониторинга TDM-10S устанавливается рядом с контролируемым силовым трансформатором. Все первичные датчики системы мониторинга монтируются рядом с контролируемым трансформатором, и только опциональный датчик вибрации монтируется непосредственно на самом трансформаторе. Это значительно упрощает установку системы мониторинга TDM-10S. При монтаже необходимо использовать максимально короткие сигнальные кабели от датчиков до прибора для уменьшения влияния возможных электромагнитных помех и перенапряжений.

Дистанционный датчик температуры марки IRT монтируется внутри защитного кожуха трансформатора так, чтобы он мог непосредственно, не через защитную сетку, контролировать температуру

обмоток всех трех фаз и сердечника трансформатора с литой изоляцией. Для этого он устанавливается по центру трансформатора, расстояние от датчика до обмоток трансформатора должно составлять примерно 40% от ширины трансформатора. Рядом с датчиком температуры IRT устанавливается электромагнитная антенна ВА-2, предназначенная также для дистанционной регистрации разрядной активности, направляемая на обмотки контролируемого трансформатора.

Кольцевой датчик тока нагрузки трансформатора марки IFCT-5 монтируется на проводнике вторичной цепи измерительного трансформатора тока. При помощи информации от этого датчика рассчитывается температура наиболее нагретой внутренней части обмотки, что важно для контроля остаточного ресурса твердой изоляции обмоток.

Датчик климата (температуры и влажности окружающего воздуха) при монтаже системы на месте дополнительно подключать к прибору не нужно. Еще при изготовлении на заводе он сразу же монтируется на корпусе прибора в отдельном кабельном вводе (чувствительный элемент датчика немного выступает из корпуса кабельного ввода) и уже подключен к плате измерительного прибора.

Передающая антенна выбранного при заказе системы мониторинга беспроводного интерфейса связи (по выбору это может быть или Bluetooth, или LoRa) также заранее монтируется в верхней части корпуса измерительного прибора и не требует подключения при помощи внешней кабельной линии.

Внешние интерфейсы системы TDM-10S.

Как и все системы мониторинга силовых трансформаторов 6-35 кВ производства фирмы ДИМРУС, система TDM-10S после монтажа легко интегрируется в информационную АСУ-ТП подстанции или предприятия при помощи встроенных интерфейсов передачи информации:

- Гальванически изолированный проводной интерфейс марки RS-485. Этот промышленный защищенный интерфейс связи обладает удовлетворительной скоростью передачи информации и хорошей помехозащищенностью, но требует прокладки по подстанции линии связи.
- Стандартный беспроводной интерфейс марки Bluetooth. Особенно удобен этот интерфейс при автономном использовании системы мониторинга, когда информация о текущем состоянии трансформатора не передается в общую систему АСУ-ТП, а будет периодически считываться персоналом предприятия при проведении обходов оборудования с использованием стандартного смартфона или планшета с соответствующим программным обеспечением. Антенна этого интерфейса связи монтируется на верхней стороне корпуса прибора системы мониторинга в защитном колпачке.
- Беспроводной интерфейс связи марки LoRa (опция). При помощи этого интерфейса информация может передаваться на большое расстояние, достигающее нескольких километров. Вторым достоинством интерфейса LoRa является использование в нем двойного шифрования информации.

Для отображения информации о текущем состоянии контролируемого трансформатора «на месте эксплуатации» на крышке корпуса прибора TDM-10S установлены три цветных светодиода, отображающие работоспособность системы мониторинга и текущее техническое состояние контролируемого трансформатора – норма, тревожное состояние, предаварийное состояние. Соответствующий светодиод загорается экспертной системой мониторинга после проведения оценки текущего технического состояния трансформатора.

Измерительный прибор системы мониторинга TDM-10S поставляется в герметизированном защитном металлическом корпусе, показанном на рисунке 1. Прибор монтируется рядом с контролируемым трансформатором, обычно на наружной поверхности защитного кожуха. Прибор системы TDM-10S может быть смонтирован и внутри защитного кожуха трансформатора, но в этом случае будет сложнее обеспечить необходимый температурный режим работы встроенной электроники прибора и организовать надежную работу беспроводных интерфейсов связи для передачи информации в систему АСУ-ТП.

Комплект поставки системы мониторинга марки TDM-10S.

1	Прибор TDM-10S в защитном корпусе	1
2	Электромагнитная сверхвысокочастотная антенна ВА-2	1
3	Дистанционный датчик температуры IRT	1
4	Контактный датчик температуры Pt-100 (опция)	1
5	Устройство контроля тока нагрузки IFCT-5	1
6	Устройство контроля температуры окружающей среды Pt-100	1
7	Устройство контроля влажности воздуха SHm-1	1
8	Датчик вибрации (опция)	1

9	Комплект соединительных кабелей для датчиков	1
10	Комплект технической документации	1

Технические параметры системы TDM-10S.

	Параметр	Значение
1	Напряжение ВН контролируемого трансформатора, кВ	6 ÷ 10
2	Контроль тока нагрузки трансформатора в цепи ТТ, А	5
3	Диапазон контролируемой температуры, град	-55 ÷ +150
4	Диапазон контролируемых разрядных импульсов, dBm	-60 ÷ -8
5	Диапазон контролируемой вибрации сердечника трансформатора, Гц	10 ÷ 1000
6	Размеры корпуса прибора системы мониторинга, мм	225*200*88
7	Масса прибора в сборе, кг	2
8	Рабочая температура, град	-40 ÷ +60
9	Напряжение питания, В (AC/DC)	110÷240
10	Потребляемая мощность, не более, Вт	5

Функции диагностической и предиктивной аналитики, реализованные в системах марки TDM-10S и TDM-35S для мониторинга сухих трансформаторов.

Для организации диагностического мониторинга сухих трансформаторов с литой изоляцией фирма DIMRUS производит системы мониторинга двух марок, которые различаются количеством первичных датчиков, используемых для регистрации технологических параметров трансформатора.

Как следствие системы различаются информативностью и достоверностью получаемых результатов.

Перечень контролируемых системами мониторинга параметров приведен в таблице.

Система	Тип, рабочее напряжение ВН, технологическая значимость трансформатора	Контролируемые параметры трансформатора					
		Ток нагрузки	Температура	Разрядная активность	Температура и влага воздуха	Вибрация	Управление охлаждением
		1	2	3	4	5	6
TDM-10S	Трансформаторы с рабочим напряжением 6-10 кВ с литой изоляцией	1	1	1	1	1	-
TDM-35S	Ответственные и мощные трансформаторы 10-35 кВ с литой изоляцией	1	4	3 ⁽¹⁾	1	1	2 ⁽²⁾

Примечания к таблице:

(1) - контроль и локация мест разрядной активности при помощи трех СВЧ антенн;

(2) – реализация алгоритма управления двумя группами вентиляторов обдува.

Эти системы мониторинга предназначены для диагностического мониторинга трансформаторов с литой изоляцией и различаются количеством первичных датчиков и их типом.

В результате, системы, с одной стороны, с различной точностью оценивают состояние трансформатора, а с другой стороны, как следствие, они различаются по стоимости. Чем больше количество используемых датчиков и сложнее система, тем она дороже.

Перечень наиболее часто встречающихся локальных дефектных состояний силовых трансформаторов с литой изоляцией, выявляемых встроенной диагностической экспертной системой, приведен в таблице.

№	Дефектное состояние	№ параметров (из табл. выше)	Достоверность	
			TDM-10S	TDM-35S
1. Изоляция обмоток трансформатора				
1.1.	Учет естественного старения изоляции обмоток на основании контроля наработки трансформатора.	1	++	++
1.2.	Контроль температурных превышений, их величины и длительности, приводящих к ускоренному старению изоляции обмоток.	2	++	++
1.3.	Выявление локальных дефектов в литой изоляции обмоток по частичным разрядам.	3	+	++
1.3.	Определение типа выявленных дефектов в изоляции, оценка степени их развития, опасности для дальнейшей эксплуатации трансформатора.	3, 4	+	++
1.4.	Контроль поверхностного загрязнения изоляции обмоток трансформатора.	3, 4	+	++
2. Сердечник трансформатора				
2.1.	Контроль целостности блоков эпоксидной изоляции фазных обмоток по спектру вибрационного сигнала.	5	++	++
2.2.	Контроль усилия прессовки сердечника трансформатора по спектру вибрационного сигнала.	5	++	++
2.3.	Контроль наличия короткозамкнутых контуров в сердечнике трансформатора.	2, 5	++	++
3. Состояние конструктивных элементов трансформатора				
3.1.	Контроль целостности конструкции трансформатора по спектрам вибрационных сигналов.	5	++	++
3.2.	Контроль наличия зон перегрева в трансформаторе по градиенту температуры зон обмоток.	2, 5	+	+
4. Управление эксплуатацией и ремонтами трансформатора				
4.1.	Контроль текущего технического состояния трансформатора по параметрам цифрового двойника.	1 - 5	+	++
4.2.	Определение скорости ухудшения технического состояния, оценка остаточного ресурса трансформатора.	1 - 5	++	++
4.3.	Планирование сроков и объемов проведения сервисных и ремонтных работ.	1 - 5	++	++

Достоверность выявления дефектных состояний контролируемого трансформатора в таблице иллюстрируется следующим образом:

(++) – достаточно высокая достоверность диагностических заключений;

(+) – сравнительно невысокая достоверность диагностических заключений.

Наиболее важным результатом работы систем мониторинга серии TDM-S является информация по возможности дальнейшей эксплуатации и оптимальных сроках проведения ремонтных и сервисных работ.

Для каждой из трех контролируемых подсистем трансформатора - для изоляционной системы, для сердечника трансформатора и для его конструкции в экспертном программном обеспечении системы мониторинга строятся адаптивные математические модели развития технического состояния, часто называемые цифровыми двойниками оборудования.

Итоговая математическая модель всего трансформатора, его цифровой двойник, комплексно строится на основе объединения параметров локальных моделей контролируемых подсистем трансформатора с литой изоляцией.