

## Мониторинг и диагностика силовых трансформаторов с литой изоляцией с рабочим напряжением 6-35 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.

### **1. Система TDM-10S для мониторинга силовых 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 ВА-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 ВА-2, которая располагается внутри защитного кожуха трансформатора. Внешний вид датчика частичных разрядов ВА-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.

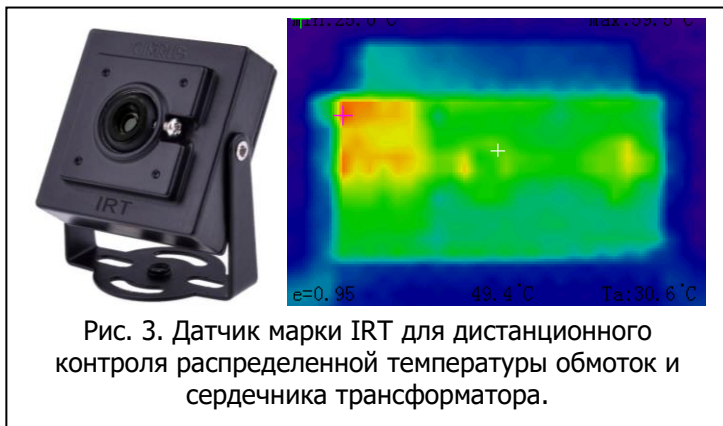


Рис. 3. Датчик марки IRT для дистанционного контроля распределенной температуры обмоток и сердечника трансформатора.

- 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, dVm	-60 ÷ -8
5	Диапазон контролируемой вибрации сердечника трансформатора, Гц	10 ÷ 1000
6	Размеры корпуса прибора системы мониторинга, мм	200*170*77
7	Масса прибора в сборе, кг	2
8	Рабочая температура, град	-40 ÷ +65
9	Напряжение питания, В (AC/DC)	110÷240
10	Потребляемая мощность, не более, Вт	5

## 2. Система TDM-35S для мониторинга сухих силовых трансформаторов с рабочим напряжением 10-35 кВ.

Система диагностического мониторинга марки TDM-35S предназначена для оперативного контроля технического состояния и управления эксплуатацией силовых распределительных трансформаторов 10÷35 кВ с сухой (литой) изоляцией.



Рис. 5. Система мониторинга марки TDM-35S в защитном корпусе для наружной установки рядом с трансформатором.

Эта система мониторинга является, по сравнению с системой TDM-10S, более эффективной благодаря использованию расширенного набора первичных датчиков и реализации в программном обеспечении более информативных диагностических методов оценки технического состояния контролируемого трансформатора.

Для этого в системе TDM-35S используется несколько диагностических методов:

- Контроль нагрузочных режимов работы трансформатора при помощи трансформаторного датчика IFCT-5 (см. рисунок 4).

- Регистрация температурных режимов работы трансформатора при помощи дистанционного датчика марки IRT (см. рисунок 3), описанного выше применительно к системе мониторинга TDM-10S. В качестве опции в системе TDM-35S могут быть

использованы от одного до четырех контактных датчиков температуры марки Pt-100. В любом случае система температурного мониторинга TDM-35S позволяет не только контролировать температуру обмоток трех фаз и магнитопровода трансформатора, но и управлять работой системы охлаждения трансформатора. При превышении температурой обмоток заданных пороговых значений прибор системы TDM-35S может последовательно включать выходные реле управления двумя группами вентиляторов охлаждения трансформатора.

- Контроль состояния изоляции обмоток трансформатора на основании регистрации и анализа частичных разрядов в диапазоне СВЧ (УHF) при помощи электромагнитных антенн марки BA-2 (см. рисунок 2). Диагностические алгоритмы экспертной системы в программном обеспечении TDM-35S позволяют определить тип дефекта в изоляции, оценить степень опасности выявленного дефекта для дальнейшей эксплуатации трансформатора. Используемые в системе технические средства диагностики могут частично локализовать место возникновения дефекта, анализируя разницу во времени прихода импульса частичного разряда к разным датчикам.

- Анализ режимов работы силового трансформатора с учетом температуры и влажности окружающей среды за счет использования комплексного датчика позволяет оценить эффективность работы системы охлаждения трансформатора, прогнозировать уменьшение остаточного ресурса изоляции.

- Контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации. Вибрационный датчик системы мониторинга обычно устанавливается на нижней раме магнитопровода трансформатора, рядом с сердечником. На основании анализа интегральных параметров и спектров вибрационных сигналов во встроенной экспертной системе диагностируются различные электромеханические дефекты в конструкции трансформатора.

Расширенный в системе TDM-35S набор контролируемых параметров трансформатора, по сравнению с системой TDM-10S, позволяет более корректно определять остаточный ресурс компаундной изоляции обмоток и рассчитывать оптимальное время проведения ремонтов всего трансформатора.

### Установка диагностического оборудования системы мониторинга TDM-35S на трансформаторе.

Прибор системы мониторинга TDM-35S устанавливается рядом с контролируемым трансформатором. Все первичные датчики системы TDM-35S монтируются непосредственно на трансформаторе. При монтаже системы необходимо использовать максимально короткие сигнальные кабели от датчиков до прибора для уменьшения электромагнитных помех.

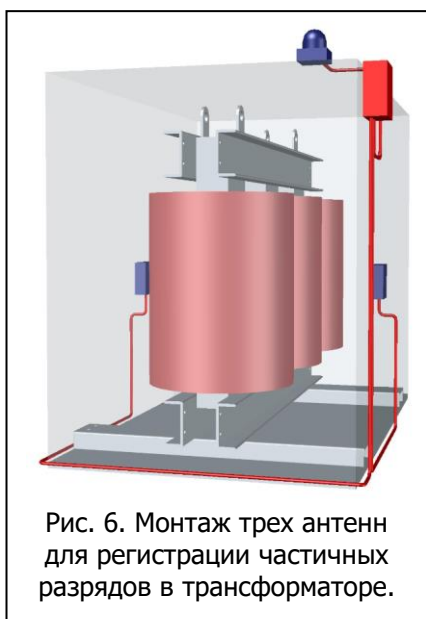


Рис. 6. Монтаж трех антенн для регистрации частичных разрядов в трансформаторе.

В зависимости от конструкции силового трансформатора с сухой изоляцией существуют особенности монтажа первичных датчиков. В наибольшей мере эти особенности касаются выбора мест для установки датчиков частичных разрядов СВЧ диапазона частот, при помощи которых контролируется состояние литой компаундной изоляции и проводится локация мест возникновения дефектов.

Две направленные электромагнитные антенны СВЧ диапазона марки ВА-2 располагаются с двух сторон трансформатора с литой изоляцией. Они направляются на обмотки трансформатора, для чего крепятся внутри защитного ограждения трансформатора или на дополнительных стойках.

Третья СВЧ антенна марки ВА-1, имеющая ненаправленную чувствительность, располагается сверху защитного ограждения и предназначена для регистрации внешних импульсов электромагнитных помех. Синхронное сравнение параметров импульсных сигналов с трех антенн позволяет системе контроля частичных разрядов максимально

корректно отстраиваться от внешних высокочастотных помех и даже проводить пространственную локацию мест возникновения дефектов в изоляции.

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 части обмотки, что важно для прогнозирования остаточного ресурса твердой изоляции обмоток трансформатора.

### Внешние интерфейсы связи системы TDM-35S.

Как и все другие системы производства фирмы ДИМРУС, предназначенные для организации непрерывного диагностического мониторинга силовых распределительных трансформаторов 6-35 кВ, система марки TDM-35S легко интегрируется в информационную среду цифровой подстанции или предприятия при помощи трех встроенных в нее цифровых интерфейсов передачи информации:

- Гальванически изолированный интерфейс RS-485. Этот проводной защищенный интерфейс связи обладает удовлетворительной скоростью передачи информации, но требует прокладки по подстанции информационных кабельных линий связи. Этот интерфейс всегда реализован в приборе.

- Беспроводной интерфейс связи марки Wi-Fi. Особенно удобен этот интерфейс при автономном использовании системы мониторинга, когда информация о текущем состоянии трансформатора будет периодически считываться персоналом при обходах оборудования с использованием смартфона или планшета. Антенна этого интерфейса беспроводной связи монтируется на верхней стороне корпуса прибора системы мониторинга.

- Вместо интерфейса Wi-Fi, имеющего достаточно ограниченный радиус работы, особенно в условиях промышленного предприятия, в приборе системы мониторинга марки TDM-35S может быть смонтирован беспроводной интерфейс марки LoRa, который может передавать информацию в систему АСУ-ТП на расстояние в несколько километров. Вторым достоинством этого интерфейса связи является наличие двойного шифрования передаваемой информации.

Для отображения информации о режимах работы системы мониторинга и о текущем техническом состоянии трансформатора в приборе системы TDM-35S установлены информационные элементы индикации и релейные устройства сигнализации:

- Три цветных ярких светодиода на крышке прибора, отражающие техническое состояние трансформатора – норма, тревожное состояние, предаварийное.

- Информационный экран для сообщений о критических значениях контролируемых параметров и выявленных дефектах трансформатора.

- Два сигнальных реле, отображающие информацию о текущем статусе системы мониторинга и выявлении предаварийных технических состояний контролируемого трансформатора.

Для управления системой охлаждения трансформатора в системе дополнительно установлены два реле, предназначенные для управления вентиляторами системы охлаждения трансформатора в зависимости от температуры обмоток.

#### Особенности монтажа прибора TDM-35S.

Стандартно измерительный прибор системы мониторинга TDM-35S поставляется в герметизированном защитном металлическом корпусе, показанном на рисунке 5. В таком конструктивном исполнении прибор системы мониторинга может быть смонтирован рядом с контролируемым трансформатором в условиях производственного цеха или подстанции без дополнительной защиты.

Если предполагается монтировать систему мониторинга на территории открытой подстанции, то необходимо предусматривать использование шкафа наружного исполнения для защиты оборудования от внешних климатических воздействий. В этом случае для самого прибора нет необходимости использовать герметизированный корпус, достаточно применить более дешевый сборный металлический корпус.

#### Комплект поставки системы мониторинга марки TDM-35S.

1	Прибор TDM-35S в защитном корпусе	1
2	Электромагнитные сверхвысокочастотные антенны ВА-2 и ВА-1	2+1
3	Дистанционный датчик температуры IRT	1
4	Контактный датчик температуры Pt-100 (опция)	до 4
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-35S.

	Параметр	Значение
1	Напряжение ВН контролируемого трансформатора, кВ	10 ÷ 35
2	Контроль тока нагрузки трансформатора в цепи ТТ, А	5
3	Выходное (входное) напряжение трансформатора, В	220
4	Диапазон контролируемой температуры обмотки, град	-55 ÷ +150
5	Диапазон контролируемых разрядных импульсов, dVn	-70 ÷ 0
6	Диапазон контролируемой вибрации сердечника трансформатора, Гц	10 ÷ 1000
7	Количество реле управления системой охлаждения трансформатора	2
8	Размеры корпуса прибора для электроники, мм	280*210*100
9	Масса прибора в сборе, кг	3,5
10	Рабочая температура, град	-40 ÷ +65
11	Напряжение питания, В (AC/DC)	110÷240
12	Потребляемая мощность, Вт	10

### 3. 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 <sup>(1)</sup>	1	1	2 <sup>(2)</sup>

Примечания к таблице:

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

<sup>(2)</sup> – 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
<b>1. Изоляция обмоток трансформатора</b>				
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	+	++
<b>2. Сердечник трансформатора</b>				
2.1.	Контроль целостности блоков эпоксидной изоляции фазных обмоток по спектру вибрационного сигнала.	5	++	++
2.2.	Контроль усилия прессовки сердечника трансформатора	5	++	++

	по спектру вибрационного сигнала.			
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.