

## Мониторинг и диагностика маслонеполненных силовых трансформаторов и трансформаторов с литой изоляцией с напряжением 6÷35 кВ

Силовые трансформаторы с рабочим напряжением 6÷35 кВ являются наиболее массовыми в системах электроснабжения промышленных предприятий и бытовых потребителей. Одним из эффективных путей повышения общей надежности электроснабжения потребителей является установка на силовых трансформаторах систем диагностического мониторинга, однако для трансформаторов 6÷35 кВ это делается неоправданно редко.

Можно выделить две основные причины отсутствия на таких трансформаторах оперативных систем мониторинга, и обе связаны с их сравнительно невысокой стоимостью:

- Замена аварийного трансформатора производится достаточно оперативно, даже собственными силами эксплуатационного и ремонтного персонала. Часто аналогичный трансформатор есть в резерве, а при отсутствии резерва его можно быстро приобрести у поставщиков, что также минимизирует общий ущерб от таких аварий.

- Для экономически эффективного использования систем мониторинга их стоимость должна быть значительно (в разы) меньше стоимости оборудования, которое они контролируют. По этой причине использование традиционных систем мониторинга, предназначенных для силовых трансформаторов от 110 кВ и выше, для трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ экономически неоправданно.

Для обеспечения экономически эффективного внедрения систем контроля трансформаторного оборудования 6÷35 кВ в режиме постоянного мониторинга могут найти применение только такие системы, которые будут соответствовать следующим критериям:

- Низкая стоимость поставки технических средств системы мониторинга, обусловленная минимально возможным количеством первичных датчиков.

- Простота и низкие затраты на монтаж системы мониторинга, оперативная организация каналов связи для передачи информации в систему АСУ-ТП предприятия.

- Использование в составе встроенного программного обеспечения набора экспертных программ, предназначенных для диагностики дефектов и определения технического состояния трансформатора.

- Применение в составе программного обеспечения адаптивных математических моделей трансформатора (цифровых двойников), позволяющих: осуществлять прогнозирование развития технического состояния, управлять эксплуатацией трансформаторов, планировать оптимальные сроки и объемы сервисных и ремонтных работ.

### **1. Технические особенности силовых трансформаторов напряжением 6÷35 кВ, определяющие требования к системам диагностического мониторинга**

При создании систем диагностического мониторинга в первую очередь необходимо учитывать конструктивные и эксплуатационные особенности силовых трансформаторов 6÷35 кВ, отличающие их от трансформаторов более высоких классов напряжения. Эти особенности можно разделить на две группы, одна из которых снижает стоимость систем мониторинга без снижения эффективности их работы, а вторая, наоборот, повышает ее.

Технические особенности трансформаторов 6÷35 кВ, позволяющие снизить функциональные требования к системам мониторинга, упростить их, уменьшить стоимость технических средств:

- У трансформаторов 6÷35 кВ высоковольтные вводы имеют более простую конструкцию, что обеспечивает их меньшую аварийность. Кроме того, у таких вводов обычно отсутствуют измерительные выводы (ПИН), что делает практически невозможным техническую реализацию систем оперативного мониторинга и диагностики технического состояния вводов.

- В таких трансформаторах обычно не устанавливаются устройства РПН, предназначенные для регулирования выходного напряжения под нагрузкой. Это тоже позволяет снизить стоимость системы мониторинга, так как стоимость технических средств, предназначенных для контроля РПН трансформатора, достаточно велика.

- Более низкий уровень напряжений в обмотках трансформаторов 6÷35 кВ уменьшает напряженность электрических полей в изоляционной системе, снижает вероятность появления и количество «чисто электрических» пробоев изоляции. На первый план по аварийности в таких трансформаторах выходят повреждения изоляции, которые в основе своей обусловлены тепловыми процессами, которые обычно проще контролировать.

Особенности силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ, которые обычно приводят к техническому усложнению и увеличению стоимости систем диагностического мониторинга. В силу

специфических особенностей таких трансформаторов иногда приходится даже использовать другие, специфические методы диагностики:

- В первую очередь это касается возможности использования систем контроля растворенных газов. Стоимость самых дешевых диагностических систем контроля растворенных газов составляет несколько сотен тысяч рублей, что соизмеримо со стоимостью трансформаторов 35 кВ, и может быть даже больше стоимости трансформаторов 6-10 кВ. Поэтому реально применение систем контроля растворенных газов в трансформаторах 6÷35 кВ не дает экономического эффекта. По этой причине для таких трансформаторов для диагностики состояния изоляционной системы обычно ограничиваются контролем влагосодержания в масле бака трансформатора и в твердой изоляции.

- Все более широкое распространение сухих трансформаторов с литой изоляцией требует использования в системах мониторинга новых методов контроля. Надежная работа трансформаторов с литой изоляцией реально может быть обеспечена только за счет оперативного контроля температурных и разрядных процессов в изоляции обмоток.

- Более сложно в сухих трансформаторах решается вопрос с определением скорости старения и остаточного ресурса компаундной изоляции. Если в маслонаполненных трансформаторах достаточно контролировать температуру бака, общие параметры масла и (интегральное) влагосодержание в бумажной изоляции, то для литой изоляции наибольшую опасность представляют локальные дефекты компаунда. Возникновение этих дефектов сопровождается разрядами различного уровня. Интенсивность этих разрядов определяется многими параметрами: нагрузкой трансформатора, температурой обмотки, влажностью охлаждающего воздуха и т. д.

- Достаточно часто на системы мониторинга трансформаторов 6÷35 кВ возлагаются функции, которые для трансформаторов более высоких классов напряжения реализуются в отдельных подсистемах. Это касается, например, контроля технологических режимов работы трансформатора, текущего теплового контроля и даже управления системой охлаждения. Это, с одной стороны, повышает стоимость технических средств самой системы диагностического мониторинга, но в итоге снижает общую стоимость поставки и владения трансформатором.

- При монтаже систем мониторинга обычно приходится дополнительно прокладывать информационные линии для передачи информации в центр управления эксплуатацией оборудования. В условиях действующих предприятий такие работы могут быть достаточно затратными и трудоемкими. Для исключения использования дорогих проводных линий связи возможно применение современных беспроводных каналов для передачи информации. В этом случае приходится увеличивать стоимость прибора системы мониторинга для того, чтобы уменьшить стоимость монтажа системы.

## **2. Системы диагностического мониторинга производства фирмы ДИМУС для силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ**

Фирмой ДИМУС разработаны и производятся четыре системы мониторинга, предназначенные для контроля силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ. Технические параметры этих систем (диагностические возможности и стоимость поставки) выбраны из условия обеспечения максимальной экономической эффективности работы.

### **2.1. Система TDM-10 для мониторинга маслонаполненных трансформаторов 6÷35 кВ**

Система мониторинга TDM-10 предназначена для оперативного контроля и диагностики маслонаполненных силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6-10 кВ. При помощи этой компактной системы мониторинга и диагностики осуществляется оперативный контроль технического состояния силовых трансформаторов, производится оценка остаточного ресурса.

Система TDM-10 в режиме непрерывного мониторинга контролирует 6 основных параметров технического состояния силового трансформатора:

- Температура масла в баке трансформатора. На основании этого важного эксплуатационного параметра в системе мониторинга определяется нагрузочная способность трансформатора, рассчитывается остаточный ресурс изоляции.

- Влагосодержание в масле бака. Этот параметр во многом определяет электрическую прочность масла, влияет на возможность работы трансформатора при низких температурах.

- Уровень масла в баке – параметр эксплуатационной защиты.

- Разрядная активность внутри бака, которая возникает при наличии проблем в изоляционной системе трансформатора.

- Вибрация в баке трансформатора - это параметр, который связан с техническим состоянием механических элементов конструкции трансформатора.

- Давление внутри бака трансформатора.



Рис. 1. Внешний вид прибора системы мониторинга TDM-10

Первичная и итоговая информация о техническом состоянии трансформатора из системы TDM-10 оперативно передается в единую систему АСУ-ТП предприятия, которая осуществляет мониторинг всего высоковольтного электротехнического оборудования, управляет работой ремонтных и сервисных служб предприятия.

Для передачи информации о техническом состоянии трансформатора в АСУ-ТП предприятия в системе мониторинга TDM-10 предусмотрены три стандартных интерфейса передачи данных:

- Проводной гальванически изолированный интерфейс связи марки RS-485. При помощи этого интерфейса можно передавать информацию в АСУ-ТП, проводить настройку режимов работы TDM-10, проводить специализированные разовые измерения параметров работы трансформатора. Интерфейс применяется при создании комплексной системы контроля высоковольтного оборудования подстанции.

- Беспроводной интерфейс связи марки Bluetooth, предназначенный для передачи данных на смартфон, планшет, переносной компьютер, для управления режимами работы системы

TDM-10. Дальность работы такого беспроводного интерфейса составляет десятки метров. Этот интерфейс обычно используется при автономном монтаже системы мониторинга, когда информация о состоянии трансформатора периодически считывается из прибора в смартфон с дополнительным программным обеспечением при периодических обходах оборудования эксплуатационным персоналом.

- Беспроводной интерфейс связи марки LoRa (LoRaWAN). При помощи этого интерфейса информация может передаваться на большие расстояния, достигающие нескольких километров. Вторым достоинством интерфейса LoRa является использование в нем двойного шифрования информации. Самым существенным недостатком интерфейса LoRa является его низкая пропускная способность: одна посылка информации может содержать в себе только несколько десятков байт. Обычно это может быть только интегральная информация о техническом состоянии контролируемого трансформатора.

В минимальной конфигурации прибор всегда оснащается беспроводным интерфейсом Bluetooth. При необходимости в приборе могут быть установлены технические средства для дополнительных интерфейсов – проводного RS-485 и беспроводного LoRa.



Рис. 2. Монтаж TDM-10 на крышке бака с использованием переходного устройства

При заказе системы TDM-10 пользователю необходимо заранее определиться с необходимым для АСУ-ТП предприятия набором дополнительных интерфейсов связи. В приборе системы мониторинга могут быть установлены проводной интерфейс RS-485 и дополнительно беспроводной интерфейс LoRa. В этом случае интерфейс Bluetooth будет доступен только при открытой крышке прибора (или только на очень близком расстоянии, несколько метров), так как на металлическом корпусе прибора предусмотрено место для антенны только одного беспроводного интерфейса.

Конструктивно прибор системы мониторинга TDM-10 представляет собой единый металлический корпус, показанный на рисунке 1. В верхней части в отдельном герметичном металлическом корпусе располагается электронная часть всей системы мониторинга. Снизу в корпус вводятся кабель питания и кабель проводного интерфейса связи RS-485. В третьем (пластиковом) кабельном вводе в корпусе располагается антенна выбранного пользователем интерфейса беспроводной связи.

В нижней цилиндрической части корпуса прибора из нержавеющей стали, которая вводится внутрь бака трансформатора, находятся все первичные датчики, предназначенные для контроля параметров трансформатора. Длина цилиндрической части корпуса зависит от конструкции герметизирующего узла и особенностей посадочного места на крышке трансформатора.

Прибор системы мониторинга TDM-10 монтируется

непосредственно на верхней крышке бака трансформатора. Для этих целей может использоваться или штатная горловина для заливки масла с посадочным узлом, или специальный переходной фланец с герметизирующим узлом, устанавливаемый на любой технологической крышке на баке. Конструкция переходного узла для монтажа прибора на крышке бака зависит от особенностей конструкции трансформатора. Пример конструкции приведен на рисунке 2.

Установка переходного узла на верхней крышке бака трансформатора 10 кВ обычно производится без слива масла на отключенном трансформаторе. Любой монтаж и демонтаж измерительного прибора TDM-10 в переходный узел производится оперативно также без слива масла за счет использования шарового крана и уплотняющего узла в верхней части монтажного узла.

После монтажа прибора подключение и включение в работу системы мониторинга TDM-10 осуществляется просто и оперативно. Все первичные датчики системы мониторинга находятся в цилиндрической части корпуса прибора, они введены в масло трансформатора и уже подключены к измерительной схеме. Необходимо только подать питание на прибор. Для этого нужно подключить два провода к выводам вторичной обмотки трансформатора – к фазе и нейтральной точке вторичной обмотки. Включение и выключение системы мониторинга в этом случае будет происходить автоматически при включении и отключении контролируемого трансформатора.

Если работа системы TDM-10 предполагается в автономном режиме с использованием только беспроводных интерфейсов связи, то необходимо подключить только кабель питания. Если предполагается подключение TDM-10 к системе АСУ-ТП при помощи проводного интерфейса RS-485, то необходимо подключить также и информационный кабель.

Для расширения диагностических функций и возможностей системы мониторинга марки TDM-10 на контролируемый трансформатор может быть смонтирован дополнительный модуль расширения марки TDM-10/U. Этот модуль предназначен для контроля и мониторинга токов нагрузки и напряжений вторичной обмотки трансформатора и в базовую поставку системы мониторинга не входит.



Рис. 3. Блок расширения марки TDM-10/U

Дополнительный измерительный модуль системы мониторинга TDM-10/U монтируется на крышке бака трансформатора рядом с выводами обмотки низкого напряжения. Питается модуль от измеряемого трехфазного напряжения вторичной обмотки трансформатора. Для измерения токов нагрузки трансформатора используются катушки Роговского, которые монтируются вокруг изоляторов выводов вторичной обмотки трансформатора. Информацию о зарегистрированных параметрах работы трансформатора дополнительный модуль передает в основной модуль мониторинга по радио интерфейсу Bluetooth.

Использование модуля расширения для контроля электрических параметров трансформатора увеличивает стоимость системы мониторинга, но дает возможность более эффективно контролировать технологические параметры работы трансформатора. В частности, он позволяет регистрировать перенапряжения и импульсные сквозные токи через трансформатор.

**Достоинства применения системы мониторинга марки TDM-10:**

- Система TDM-10 является максимально эффективным и сравнительно дешевым решением для мониторинга силовых распределительных трансформаторов 6÷35 кВ.
- Использование в TDM-10 беспроводного канала позволяет оперативно собирать информацию в систему АСУ-ТП при помощи стандартного приемника WDM, или периодически контролировать техническое состояние трансформатора во время обходов оборудования при помощи обычного смартфона.

**Технические параметры системы TDM-10**

Параметр	Значение
Напряжение ВН контролируемого трансформатора, кВ	6 ÷ 35
Диапазон контролируемой температуры в баке, град	-40 ÷ +125
Диапазон контроля влагосодержания в масле, ppm	0,63 ÷ 63,69
Перепад уровня масла в баке, мм	50
Разрядная активность в баке трансформатора, dBm	-60 ÷ -8
Вибрация в баке, G	4
Размеры корпуса прибора Д*Ш*В, мм	400*150*80
Масса прибора, кг	1,5
Рабочая температура, град	-40 ÷ +85
Напряжение питания, В (АС)	110/220
Потребляемая мощность, не более, Вт	5



## 2.2. Система марки TDM-35 для диагностического мониторинга маслонаполненных трансформаторов 35 кВ

Система диагностического мониторинга TDM-35 предназначена для контроля технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов 35 кВ. По сравнению с системой мониторинга марки TDM-10, эта система является более эффективной благодаря использованию дополнительных датчиков и более совершенной экспертной системы, используемой для оценки технического состояния и диагностики дефектов трансформатора.

Для контроля текущего технического состояния трансформаторов в системе TDM-35 реализовано несколько диагностических методов, результаты работы которых дополняют друг друга:

- Регистрация и анализ температурных режимов работы трансформатора.
- Контроль влагосодержания в масле бака трансформатора.
- Контроль влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора.
- Регистрация и анализ разрядных процессов внутри бака трансформатора.
- Контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации.
- Контроль уровня масла в баке трансформатора по принципу защитного реле.

Датчики для регистрации этих важных параметров трансформатора конструктивно объединены в единый модуль, который вводится внутрь бака трансформатора через верхнюю крышку.

Дополнительно к датчикам, находящимся внутри бака трансформатора, к измерительному прибору системы TDM-35 подключаются два внешних датчика. Это датчик тока нагрузки трансформатора и комплексный датчик контроля температуры и влажности окружающей среды.



Рис. 4. Система TDM-35 для мониторинга маслонаполненных трансформаторов 35 кВ

При помощи адаптивного цифрового двойника трансформатора, параметры которого получаются уникальными для каждого контролируемого системой трансформатора, в программном обеспечении системы мониторинга TDM-35 выполняется оценка текущего технического состояния, оперативная диагностика дефектов, осуществляется математическое прогнозирование развития технического состояния трансформатора на будущих этапах эксплуатации.

Результатом работы экспертной части программного обеспечения является:

- Информация о текущем техническом состоянии контролируемого трансформатора в целом и его отдельных подсистем.
- Перечень тревожных и предаварийных превышений контролируемых параметров, выявленных системой мониторинга за выбранный пользователем период времени.
- Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, определение скорости старения изоляции обмоток.
- Оценка эффективности работы системы охлаждения, учитывающая возникновение внутри бака трансформатора дополнительных зон нагрева.
- Список всех диагностированных экспертной системой признаков дефектных состояний трансформатора с оценкой степени их опасности.

Завершающим итогом работы экспертных алгоритмов программы мониторинга является создание акта текущего технического состояния трансформатора с рекомендациями по

особенностям его дальнейшей эксплуатации, необходимости проведения дополнительных обследований, сервисных и ремонтных работ.

Вся информация о техническом состоянии трансформатора из системы TDM-35 передается в централизованную систему АСУ-ТП предприятия, для чего в системе предусмотрено использование трех стандартных интерфейсов передачи данных:

- Проводной гальванически изолированный интерфейс связи марки RS-485. При помощи этого интерфейса можно передавать информацию в АСУ-ТП, проводить настройку режимов работы TDM-35, проводить специализированные разовые измерения параметров работы трансформатора.

- Беспроводной интерфейс связи марки Bluetooth, предназначенный для передачи данных на смартфон, планшет, переносной компьютер, управлять режимами работы системы мониторинга. Эффективная дальность работы этого беспроводного интерфейса составляет десятки метров.

- Беспроводной интерфейс связи марки LoRa (LoRaWAN). Достоинством этого интерфейса связи является то, что информация может передаваться на большое расстояние, достигающее нескольких километров. Вторым преимуществом интерфейса LoRa является использование в нем двойного шифрования информации.

При заказе системы TDM-35 пользователю необходимо заранее определиться с необходимым для АСУ-ТП набором интерфейсов связи. В приборе системы мониторинга может быть установлен проводной интерфейс RS-485 (он может быть или не быть) и дополнительно один беспроводной интерфейс: Bluetooth или LoRa (необходимо выбрать один из двух). Информация о конфигурации интерфейсов связи должна быть известна на момент заказа диагностического оборудования.

Конструкция измерительного прибора системы мониторинга TDM-35 аналогична конструкции прибора системы TDM-10. В верхней герметизированной части корпуса прибора располагается вся электронная часть системы мониторинга. В нижней цилиндрической части корпуса, которая вводится внутрь бака (по диаметру она аналогична прибору TDM-10), находятся измерительные датчики.

Измерительный прибор системы мониторинга TDM-35 монтируется на верхней крышке бака трансформатора. Для этого используется специальный переходной фланец с герметизирующим узлом, который по конструкции и размерам аналогичен переходному узлу для установки прибора TDM-10, показанный на рисунке 2. Переходный узел устанавливается на любой технологической крышке, имеющейся на поверхности бака трансформатора. В основе герметизирующего узла лежит шаровой кран с проходным отверстием DN не менее 30 мм.

Для первичного монтажа переходного узла (как минимум шарового крана) необходимо слить масло в баке трансформатора до уровня верхней крышки бака и осуществить монтаж переходного фланца. В дальнейшем монтаж и демонтаж измерительного прибора системы мониторинга TDM-35 может производиться даже без частичного слива масла.

Если нет возможности смонтировать измерительный прибор системы TDM-35 на верхней крышке бака трансформатора, то его можно смонтировать на боковой поверхности бака. В этом случае система мониторинга сохранит свою работоспособность и функциональные возможности, но некорректно будет работать функция лишь защитного реле минимального уровня масла в баке.

Проводной монтаж при установке измерительного прибора системы TDM-35 не требует больших затрат. Поскольку все основные датчики параметров трансформатора объединены в общий блок, который на этапе монтажа уже введен в масло бака трансформатора, к измерительному прибору системы необходимо подключить четыре кабельные линии:

- Кабель питания AC/DC.
- Кабель от датчика марки IFCT-5 для контроля тока нагрузки трансформатора.
- Кабель линии связи, если в системе будет использован проводной интерфейс RS-485.
- Кабель для подключения датчика температуры и влажности окружающего воздуха.

Антенна выбранного беспроводного интерфейса связи (Bluetooth или LoRa) монтируется на корпусе прибора на заводе и не требует для подключения кабельной линии.

### Технические параметры системы TDM-35

Параметр	Значение
Напряжение ВН контролируемого трансформатора, кВ	10 ÷ 35
Величина тока нагрузки трансформатора (в цепи ТТ), А	0 ÷ 5
Выходное (входное) напряжение трансформатора, В (АС)	110/220
Диапазон контролируемой температуры бака, град	-40 ÷ +125
Влагосодержание в масле бака трансформатора, ppm	0,63 ÷ 63,69
Влагосодержание в твердой изоляции, %	0 ÷ 10
Диапазон контролируемых разрядных импульсов, dBm	-60 ÷ -8
Диапазон контролируемой вибрации в баке, Гц	10 ÷ 1000
Уровень срабатывания реле уровня масла в баке, мм	±20
Размеры корпуса прибора для электроники Ш*Г*В, мм	400*200*170
Размеры корпуса с встроенными датчиками D*H, мм	30*250
Масса прибора в сборе, кг	2,5
Рабочая температура, град	-40 ÷ +85
Напряжение питания, В (АС)	110÷240
Потребляемая мощность, не более, Вт	5

### 2.3. Система мониторинга TDM-10S для сухих трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ с литой изоляцией

Система мониторинга марки TDM-10S предназначена для оперативного контроля технического состояния силовых трансформаторов 6÷35 кВ с сухой (литой) изоляцией.

Для контроля текущего технического состояния трансформаторов с литой изоляцией в системе TDM-10S используются следующие диагностические методы:

- Контроль нагрузки трансформатора при помощи датчика тока марки IFCT-5.
- Регистрация и анализ температурных режимов работы трансформатора. Для этого используется датчик температуры Pt100.
- Контроль состояния изоляции обмоток трансформатора на основании регистрации и анализа разрядной активности в обмотках трансформатора. Для этого используется направленный датчик регистрации высокочастотных импульсов, располагаемый внутри защитного кожуха трансформатора, направленный на обмотки. При наличии высокого уровня внешних высокочастотных помех при помощи этого датчика корректно будут регистрироваться не только частичные разряды, имеющие небольшую амплитуду, а также более интенсивные разрядные процессы в дефектных зонах изоляции обмоток трансформатора, которые будут превышать уровень помех.
- Контроль температуры и влажности окружающей среды. На основании использования этого параметра в системе мониторинга дополнительно оценивается эффективность охлаждения трансформатора, более 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 строить модели старения компаундной изоляции, определять ее остаточный ресурс.
- Контроль вибрации трансформатора. Датчик вибрации, устанавливаемый на нижней части сердечника трансформатора, 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.



Рис. 5. Система мониторинга TDM-10S для контроля сухих трансформаторов с литой изоляцией

#### Установка TDM-10S на трансформаторе

Прибор системы мониторинга TDM-10S устанавливается рядом с контролируемым силовым трансформатором с литой изоляцией. Все первичные датчики монтируются непосредственно на контролируемом трансформаторе или рядом с ним. При монтаже необходимо использовать максимально короткие сигнальные кабели от датчиков до прибора для уменьшения влияния электромагнитных помех.

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 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 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.

- Беспроводной интерфейс связи марки LoRa. 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 крышке корпуса прибора TDM-10S установлены три цветных светодиода, отображающие работоспособность системы мониторинга и текущее техническое состояние контролируемого трансформатора – норма, тревожное состояние, предаварийное состояние.

Сам измерительный прибор системы мониторинга TDM-10S поставляется в герметизированном защитном металлическом корпусе, показанном на рисунке 5. Прибор монтируется рядом с контролируемым трансформатором на наружной поверхности защитного кожуха. Это делается для того, чтобы обеспечить минимальную длину соединительных линий от внешних датчиков контроля параметров трансформатора.

Измерительный 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.

#### Технические параметры системы TDM-10S

Параметр	Значение
Напряжение ВН контролируемого трансформатора, кВ	6 ÷ 10
Контроль тока нагрузки трансформатора в цепи ТТ, А	5
Диапазон контролируемой температуры, град	-55 ÷ +150
Диапазон контролируемых разрядных импульсов, dBm	-60 ÷ -8
Размеры корпуса прибора для электроники Ш*Г*В, мм	200*170*77
Масса прибора в сборе, кг	2
Рабочая температура, град	-40 ÷ +85
Напряжение питания, В (AC/DC)	110÷240
Потребляемая мощность, не более, Вт	5

#### 2.4. Система TDM-35S для мониторинга сухих трансформаторов с литой изоляцией и рабочим напряжением 6÷35 кВ

Система диагностического мониторинга марки TDM-35S (предыдущая версия этой системы выпускалась под торговой маркой TDM-S) предназначена для оперативного контроля технического состояния силовых трансформаторов 6÷35 кВ с сухой (литой) изоляцией. Эта система является, по сравнению с TDM-10S, более эффективной благодаря использованию расширенного набора первичных датчиков и использования более информативных методов диагностики технического состояния контролируемого трансформатора.

Для контроля текущего технического состояния трансформаторов в системе TDM-35S используется несколько диагностических методов:

- Контроль нагрузочных режимов работы трансформатора.
- Регистрация температурных режимов работы трансформатора. Для этого в системе мониторинга используется от одного до четырех датчиков температуры. Это позволяет, в максимальной конфигурации, контролировать температуру обмоток трех фаз и магнитопровода 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 (UHF). Диагностические алгоритмы 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 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.



Рис. 6. Система TDM-35S в защищенном корпусе для наружной установки рядом с трансформатором

TDM-35S монтируются непосредственно на трансформаторе. При монтаже системы необходимо использовать максимально короткие сигнальные кабели от датчиков до прибора для уменьшения электромагнитных помех.

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.

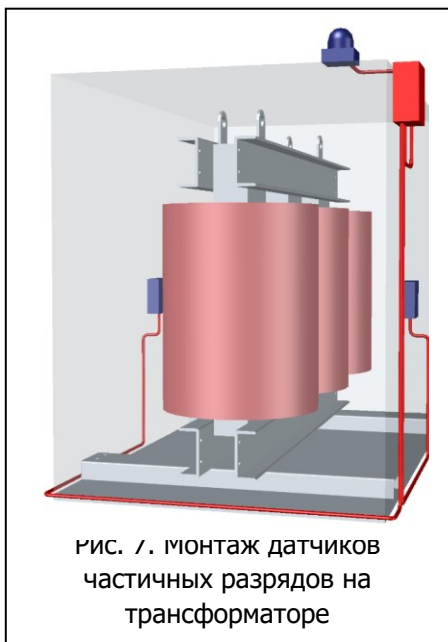


рис. 7. монтаж датчиков частичных разрядов на трансформаторе

трансформаторов 6÷35 кВ система TDM-35S легко интегрируется в информационную среду цифровой подстанции или предприятия при помощи трех встроенных 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.

- Контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации. Вибродатчик обычно устанавливается на нижней раме сухого трансформатора. На основании анализа интегральных параметров и спектров вибрационных сигналов во встроенной экспертной системе диагностируются электромеханические дефекты в конструкции трансформатора.

Расширенный, по сравнению с системой TDM-10S, набор контролируемых параметров трансформатора позволяет более корректно определять остаточный ресурс компаундной изоляции обмоток и всего трансформатора в целом.

### Установка TDM-35S на трансформаторе

Прибор системы мониторинга TDM-35S устанавливается рядом с контролируемым трансформатором. Все первичные датчики системы

Две направленные электромагнитные антенны СВЧ диапазона марки ВА-2 располагаются с двух сторон сухого 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 располагается сверху защитного ограждения и предназначена для регистрации импульсов помех. Синхронное сравнение параметров импульсных сигналов с трех антенн позволяет системе контроля частичных разрядов максимально корректно отстраиваться от внешних высокочастотных помех и проводить локацию мест возникновения дефектов.

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 ДИМУС для организации диагностического мониторинга силовых

• 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.



Рис. 8. Конструктивное исполнение прибора TDM-35S для монтажа внутри защитного шкафа

### Особенности монтажа прибора TDM-35S

Стандартно измерительный прибор системы мониторинга TDM-35S поставляется в герметизированном защитном металлическом корпусе, показанном на рисунке 6. В таком конструктивном исполнении система может быть смонтирована 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 более дешевого сборного металлического корпуса, показанного на рисунке 8.

### Технические параметры системы TDM-35S

Параметр	Значение
Напряжение ВН контролируемого трансформатора, кВ	10 ÷ 35
Контроль тока нагрузки трансформатора в цепи ТТ, А	5
Выходное (входное) напряжение трансформатора, В	220
Диапазон контролируемой температуры обмотки, град	-55 ÷ +150
Диапазон контролируемых разрядных импульсов, dVn	-70 ÷ 0
Диапазон контролируемой вибрации в баке, Гц	10 ÷ 1000
Размеры корпуса прибора для электроники Ш*Г*В, мм	280*210*100
Масса прибора в сборе, кг	3
Рабочая температура, град	-40 ÷ +85
Напряжение питания, В (AC/DC)	110÷240
Потребляемая мощность, Вт	10

## **2.5. Особенности и выбор систем мониторинга фирмы ДИМРУС для маслонаполненных и сухих силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ**

**2.5.1.** Преимущества использования диагностического оборудования серии TDM производства фирмы DIMRUS для организации мониторинга сухих и маслонаполненных трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ:

- Оптимальный по составу набор датчиков контроля параметров трансформатора, обеспечивающий достоверную оценку технического состояния при сравнительно низкой стоимости поставки технических средств системы мониторинга.

- Встроенный в программное обеспечение системы мониторинга набор экспертных и прогнозных алгоритмов, обеспечивающий необходимую достоверность и эксплуатационную эффективность при минимуме исходных параметров.

- Конструкция технических средств систем мониторинга, максимально упрощающая практический монтаж датчиков и прибора на контролируемом оборудовании.

- Использование современных проводных и беспроводных интерфейсов связи, позволяющих оперативно и максимально дешево интегрировать информацию от локальных систем мониторинга в общую АСУ-ТП предприятия.

**2.5.2.** Необходимая достоверность и практическая направленность результатов работы систем мониторинга серии TDM достигается, не за счет увеличения количества контролируемых параметров, увеличивающих стоимость технических средств, а за счет эффективного использования в программном обеспечении универсальных математических моделей, учитывающих особенности трансформаторов 6÷35 кВ, адаптивных цифровых двойников трансформаторов.

Цифровые двойники силовых трансформаторов 6÷35 кВ, описывающие их эксплуатационные параметры, в TDM состоят из трех основных составляющих.

- Во-первых, это универсальное программное обеспечение для оценки технического состояния, работающее на основе фиксированных и синтезированных параметров технического состояния отдельных подсистем и всего трансформатора. Фиксированные пороги качества, как например, пороговые значения для рабочей температуры трансформатора, известны не для всех диагностических методов. В большинстве случаев приходится использовать синтезированные параметры и соответствующие им пороги состояния, полученные в результате экспертной оценки возможностей используемых диагностических методов.

- Во-вторых, это формализованная экспертная система, которая позволяет оперативно диагностировать дефектные состояния с учетом особенности конструкции каждого трансформатора. Такие системы обычно создаются или на основе экспертных знаний, или при помощи самообучающихся систем различного вида. Экспертные алгоритмы для программного обеспечения TDM созданы на основе практически подтвержденных экспертных знаний.

- В-третьих, важным элементом цифрового двойника трансформатора является адаптивная математическая модель, учитывающая изменение его технического состояния в процессе эксплуатации с учетом выявленных признаков дефектных состояний. Эта алгоритмическая составляющая цифрового двойника обеспечивает оптимальное планирование объемов и сроков проведения сервисных и ремонтных работ с трансформаторами.

При помощи используемых в системе TDM уникальных алгоритмов автоматической адаптации параметров цифровой двойник каждого трансформатора получается уникальным. Учет эксплуатационных особенностей каждого трансформатора позволяет более корректно проводить оценку текущего технического состояния, оперативную диагностику дефектов и осуществлять математическое прогнозирование развития технического состояния трансформатора на будущих этапах эксплуатации.

Результатом работы экспертной части программного обеспечения системы мониторинга, базирующейся на использовании цифрового двойника трансформатора, является:

- Информация о текущем техническом состоянии контролируемого трансформатора в целом и его отдельных подсистем.

- Список диагностированных экспертной системой признаков дефектных состояний трансформатора с оценкой степени их опасности.

- Перечень тревожных и предаварийных превышений контролируемых параметров, выявленных системой мониторинга за выбранный пользователем период времени.

- Завершающим итогом работы экспертных алгоритмов цифрового двойника является автоматически сформированный акт о состоянии с расчетным коэффициентом текущего технического состояния всего трансформатора и его отдельных подсистем. При необходимости этот акт дополняется рекомендациями по дальнейшей эксплуатации трансформатора, необходимости проведения дополнительных обследований, об оптимальных сроках и объемах проведения сервисных и ремонтных работ. Этот акт формируется в программном обеспечении INVA на основании информации, полученной от локальной системы мониторинга

серии TDM для трансформаторов 6÷35 кВ. Программное обеспечение INVA устанавливается на центральном АРМ управления обслуживания высоковольтного оборудования.

**2.5.3.** Сводная таблица контролируемых параметров систем мониторинга для силовых трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ:

Система	Тип, рабочее напряжение ВН, технологическая значимость трансформатора	Контролируемые параметры трансформатора									
		Ток нагрузки	Температура трансформатора	Влага в масле	Влага в твердой изоляции	Уровень масла	Разрядная активность	Температура и влага воздуха	Давление в баке	Вибрация	Управление охлаждением
TDM-10	Маслонаполненные трансформаторы 6-10 кВ	-	1	1	-	1	1	-	1 <sup>(1)</sup>	1	-
TDM-35	Маслонаполненные трансформаторы 35 кВ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-
TDM-10S	Сухие трансформаторы 6-10 кВ	1	1 <sup>(2)</sup>	-	-	-	1	1	-	1 <sup>(3)</sup>	-
TDM-35S	Сухие трансформаторы 6÷35 кВ	1	4	-	-	-	3 <sup>(4)</sup>	1	-	1	2 <sup>(5)</sup>

Примечания к таблице:

- (1) - дополнительная опция системы мониторинга;
- (2) - по заказу система TDM-10S может быть поставлена с 2 датчиками температуры;
- (3) - дополнительная опция системы мониторинга;
- (4) - контроль и локация мест разрядной активности при помощи трех СВЧ (UHF) антенн;
- (5) - две температурные ступени с реле для включения вентиляторов обдува трансформатора.

Краткая информация о первичных параметрах, контролируемых разными системами, приведенная в таблице, достаточна для того, чтобы провести предварительный выбор системы мониторинга для маслонаполненных или сухих трансформаторов с рабочим напряжением 6÷35 кВ. Критериями для определения количества необходимых первичных параметров являются информативность и стоимость поставляемой системы мониторинга.

Окончательный выбор диагностического оборудования делается после уточнения и согласования требований Заказчика к результатам работы системы диагностического мониторинга.

Для максимально эффективного использования результатов работы систем серии TDM в целях управления эксплуатацией и обслуживанием силовых трансформаторов необходимо дополнительно приобретать комплект программного обеспечения INVA. Это комплексное программное обеспечение реализует функции управления обслуживанием трансформаторного и другого высоковольтного оборудования на уровне АСУ-ТП всего предприятия.

Программное обеспечение INVA необходимо устанавливать на компьютере (сервере) АРМ мониторинга оборудования предприятия. Программное обеспечение INVA будет собирать информацию от локальных систем мониторинга по проводным и беспроводным интерфейсам связи RS-485, Bluetooth и LoRa, и формировать необходимые единые документы и графики, предназначенные для управления эксплуатацией и ремонтами всего высоковольтного оборудования предприятия.



**Приложение 1.**
**Признаки дефектных состояний маслонаполненных силовых трансформаторов, диагностируемые системами мониторинга марки TDM-10 и TDM-35**

**П.1.1.** Для организации диагностического мониторинга маслонаполненных силовых трансформаторов фирма DIMRUS производит две системы мониторинга, параметры которых приведены в таблице П.1.1.

Таблица П.1.1.

Система	Тип, рабочее напряжение ВН, технологическая значимость трансформатора	Контролируемые параметры трансформатора								
		Ток нагрузки	Температура трансформатора	Влага в масле	Влага в твердой изоляции	Уровень масла	Разрядная активность	Температура и влага воздуха	Давление в баке	Вибрация
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
TDM-10	Маслонаполненные трансформаторы 6-10 кВ	-	1	1	-	1 <sup>(1)</sup>	1	-	1 <sup>(2)</sup>	1
TDM-35	Маслонаполненные трансформаторы 10-35 кВ	1	1	1	1	1 <sup>(1)</sup>	1	1	1	1

Примечание к таблице:

<sup>(1)</sup> – защитная функция системы мониторинга.

<sup>(2)</sup> – дополнительная опция для системы мониторинга TDM-10.

Эти системы мониторинга предназначены для диагностического мониторинга маслонаполненных силовых трансформаторов и различаются количеством первичных датчиков и их типом.

В результате системы, с одной стороны, имеют различную достоверность получаемых диагностических заключений, а с другой стороны они различаются по стоимости. Чем больше количество датчиков и сложнее система, тем она дороже.

**П.1.2.** Перечень наиболее часто встречающихся локальных дефектных состояний силовых маслонаполненных трансформаторов, выявляемых встроенной диагностической экспертной системой, приведен в таблице П.1.2.

Таблица П.1.2.

№	Дефектное состояние	Параметры из табл. П.1.1	Достоверность	
			TDM-10	TDM-35
<b>1. Изоляция обмоток трансформатора</b>				
1.1.	Контроль электрической прочности масла в баке трансформатора по наличию растворенной воды.	2, 3	++	++
1.2.	Контроль влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора.	2, 3, 4	-	++
1.3.	Учет естественного старения изоляции обмоток на основании контроля наработки трансформатора.	1	++	++
1.4.	Контроль температурных превышений, приводящих к ускоренному старению изоляции обмоток.	1, 2	+	++
1.5.	Выявление локальных дефектов в изоляционной системе трансформатора по частичным разрядам.	6, 7	+	+
1.6.	Определение типа выявленных дефектов в изоляции, оценка степени их развития, опасности для дальнейшей эксплуатации трансформатора.	6, 7	+	+
<b>2. Сердечник трансформатора</b>				
2.1.	Контроль усилия прессовки сердечника трансформатора по спектру вибрационного сигнала.	1, 9	++	++
2.2.	Контроль наличия короткозамкнутых контуров в сердечнике трансформатора.	1, 2, 6, 9	++	++

3. Состояние конструктивных элементов трансформатора				
3.1.	Контроль целостности конструкции трансформатора по спектрам вибрационных сигналов.	9	++	++
3.2.	Определение эффективности охлаждения трансформатора по температурам бака, воздуха и току нагрузки.	1, 2, 7	-	++
4. Управление эксплуатацией и обслуживаем трансформатора				
4.1.	Контроль текущего технического состояния трансформатора по параметрам цифрового двойника.	1 – 9	+	++
4.2.	Определение скорости ухудшения технического состояния, оценка остаточного ресурса трансформатора.	1 – 9	++	++
4.3.	Планирование сроков и объемов проведения сервисных и ремонтных работ.	1 - 9	++	++

Достоверность выявления дефектных состояний контролируемого трансформатора в таблице П.1.2. иллюстрируется следующим образом:

- (++) – достаточно высокая достоверность;
- (+) – сравнительно невысокая достоверность.

Для каждой из трех контролируемых подсистем трансформатора: для изоляционной системы, для сердечника трансформатора и для его конструкции в программном обеспечении системы мониторинга строятся локальные математические модели.

Итоговая математическая модель трансформатора (его цифровой двойник) комплексно строится на основе объединения параметров локальных моделей подсистем трансформатора.

## Приложение 2.

### Признаки дефектных состояний силовых трансформаторов с литой изоляцией, диагностируемые системами мониторинга марки TDM-10S и TDM-35S

**П.2.1.** Для организации диагностического мониторинга сухих трансформаторов с литой изоляцией фирма DIMRUS производит системы мониторинга двух марок, конфигурации технических средств которых приведены в таблице П.2.1.

Таблица П.2.1.

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

Примечания к таблице:

<sup>(1)</sup> - по заказу система TDM-10S может быть поставлена с 2 датчиками температуры;

<sup>(2)</sup> - дополнительная опция системы мониторинга;

<sup>(3)</sup> - контроль и локация мест разрядной активности при помощи трех СВЧ антенн;

<sup>(4)</sup> - контроль двух температурных порогов с включением 2 групп 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, имеют различную достоверность получаемых диагностических заключений, а с другой стороны они различаются по стоимости. Чем больше количество датчиков и сложнее система, тем она дороже.

**П.2.2.** Перечень наиболее часто встречающихся локальных дефектных состояний силовых трансформаторов с литой изоляцией, выявляемых встроенной диагностической экспертной системой, приведен в таблице П.2.2.

Таблица П.2.2.

№	Дефектное состояние	Параметры из табл. П.2.1	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	+	++

2. Сердечник трансформатора				
2.1.	Контроль усилия прессовки сердечника трансформатора по спектру вибрационного сигнала.	5	++	++
2.2.	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 обмоток с температурой воздуха.	2, 5	+	+
4. Управление эксплуатацией и обслуживанием 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 П.2.2. иллюстрируется следующим образом:

- (++) – достаточно высокая достоверность;
- (+) – сравнительно невысокая достоверность.

Для каждой из трех контролируемых подсистем трансформатора: для изоляционной системы, для сердечника трансформатора и для его конструкции в программном обеспечении системы мониторинга строятся локальные математические модели.

Итоговая математическая модель трансформатора (его цифровой двойник) комплексно строится на основе объединения параметров локальных моделей подсистем трансформатора.