



Диагностические решения в электроэнергетике

Оперативная экспертная оценка технического состояния мощных силовых трансформаторов

Общее описание диагностических и экспертных алгоритмов программного обеспечения INVA системы TDM для мониторинга мощных силовых трансформаторов

Оглавление

1. TDM – комплексный подход к мониторингу и диагностике силовых трансформаторов	3
1.1. Назначение системы TDM:	3
1.2. Технические и программные особенности системы TDM	4
1.3. Текущее техническое состояние трансформатора. Общие определения.	5
2. Программное обеспечение INVA для мониторинга и автоматизированной диагностики состояния трансформаторов.....	7
2.1. Состав и функции программного обеспечения INVA.	7
2.2. Алгоритмы принятия оценочных решений.	9
2.3. Прогнозирование развития состояния трансформатора	10
2.4. Целевое назначение результатов работы экспертной системы диагностики.....	11
3. Первичные и расчетные параметры, используемые в системе TDM	12
3.1. Ранжирование первичных параметров трансформатора.	12
3.2. Критерии выбора набора параметров трансформатора для системы мониторинга.....	12
4. Диагностические алгоритмы и математические модели	13
4.1. Основные диагностические функции модулей системы TDM	13
4.2. Диагностические модели, реализованные в системе TDM.....	14
4.2.1. Модель «Температурное состояние трансформатора»	15
4.2.2. Модель «Влагосодержание в масле и в твердой изоляции трансформатора»	16
4.2.3. Модель «Контроль и анализ растворенных газов в масле».....	17
4.2.4. Модель «Контроль состояния вводов трансформатора»	18
4.2.5. Модель «Контроль и анализ частичных разрядов в изоляции»	19
4.2.6. Модель «Комплексный анализ растворенных газов и частичных разрядов»	20
4.2.7. Модель «Контроль состояния устройства РПН».....	20
4.2.8. Модель «Анализ влияния импульсных перенапряжений»	21
4.2.9. Модель «Вибрационное состояние трансформатора»	21
4.2.10. Модель «Комплексный контроль основных параметров трансформатора»	21
4.2.11. Модель «Оптимальное управление системой охлаждения трансформатора»	22
4.2.12. Модель «Комплексная оценка состояния трансформатора».....	22
4.2.13. Модель «Нагрузочная способность трансформатора»	22
4.2.14. Модель «Оценка влияния состояния трансформатора на работу транзита».....	22
5. Выбор конфигурации системы TDM в зависимости от параметров трансформатора и задач, требующих решения.....	23

1. TDM – комплексный подход к мониторингу и диагностике силовых трансформаторов

Повышение надежности энергообеспечения потребителей в значительной степени зависит от эксплуатационных параметров высоковольтных силовых трансформаторов. Как для вновь вводимых в работу трансформаторов, так и для уже эксплуатируемых, а в особенности для трансформаторов, находящихся в критическом состоянии, это может быть сделано за счет использования систем непрерывного мониторинга и автоматизированной диагностики.

1.1. Назначение системы TDM

Комплексная система мониторинга и диагностики марки TDM (Transformer Diagnostics Monitor), разработанная и производимая российской фирмой «ДИМПУС», предназначена для:

- контроля соответствия текущих параметров работы трансформатора нормативным требованиям;
- проведения автоматизированной экспертной диагностики дефектов и оценки технического состояния трансформатора;
- передачи системой в АСУ-ТП более высокого уровня первичной и обработанной информации для использования в системах контроля состояния технологических узлов и технологических цепочек передачи и преобразования электроэнергии.

Технические и программные особенности системы TDM

- Модульная реализация технических средств системы, когда гибкий набор функционально дополняющих друг друга диагностических модулей позволяет оперативно создавать систему мониторинга трансформатора любой сложности с заданными диагностическими возможностями.

- Единое многоуровневое программное обеспечение INVA, реализующее функции мониторинга и автоматизированной диагностики. Элементы этого ПО устанавливаются в первичных модулях мониторинга, в АРМ трансформатора, АРМ подстанции, АРМ территориального энергетического предприятия. Иерархическая структура ПО INVA позволяет комплексно решать задачи управления эксплуатацией трансформаторов.

- Наличие в программном обеспечении INVA набора эффективных экспертных и диагностических алгоритмов, позволяющих оперативно проводить углубленную оценку технического состояния контролируемого трансформатора.

Организация мониторинга трансформаторов при помощи системы TDM

Модульная структура технических средств TDM основана на общей информационной шине, что позволяет оперативно создавать системы мониторинга и диагностики с необходимыми свойствами. Это позволяет минимизировать экономические затраты потребителей на организацию диагностического мониторинга.

Создание каждой «уникальной» системы мониторинга трансформатора TDM реализуется включением в заказанную поставку соответствующих функциональных модулей. Особенностью TDM является возможность включения в одну систему не только модулей различного типа, но и нескольких модулей одного типа, что удобно при создании «больших систем мониторинга», например, для групповых автотрансформаторов.

Кроме модулей системы TDM, в состав комплексной системы мониторинга могут быть включены любые «внешние» приборы регистрации и контроля параметров масла и растворенных газов и других дополнительных диагностических параметров. Данные от них будут храниться в общей базе данных.

В зависимости от требований технического задания для конкретного контролируемого трансформатора, в состав системы TDM могут входить до 15 диагностических модулей, к которым может быть подключено до 100 первичных датчиков различного типа, измеряющих различные технологические параметры работы.

Достоинством системы TDM является то, что данные всех дополнительных приборов, как и результаты проведенных «off-line» тестов, учитываются при формировании комплексного диагностического заключения о техническом состоянии силового трансформатора.

Результаты параметрического мониторинга и экспертной оценки технического состояния отдельного силового трансформатора имеют значение не только для самого трансформатора, но и для управления эксплуатацией всей цепи передачи и преобразования электроэнергии.

По итогам работы диагностических алгоритмов в программе INVA рассчитывается единый коэффициент технического состояния трансформатора. Этот коэффициент комплексно отражает состояние трансформатора, поэтому его максимально удобно использовать в системах управления эксплуатацией высоковольтного оборудования более высокого уровня.

1.2. Технические и программные особенности системы TDM

Технические решения, принятые при создании системы TDM

В основу разработки всех технических средств системы TDM был положен единый модульный принцип:

- Основной элемент технических средств – отдельный диагностический модуль с набором датчиков.
- Модуль реализует один диагностический метод для контроля всего трансформатора или набор методов для диагностики состояния отдельной подсистемы трансформатора.
- Все модули TDM работают как составные элементы общей системы мониторинга и диагностики.
- Основой для интеграции отдельных модулей в систему является общая информационная шина, проходящая через все модули.
- Информация, регистрируемая одним модулем, по общей шине доступна для использования другими модулями.

В системе TDM реализован комплексный подход к диагностике состояния трансформатора, когда итоговая оценка состояния трансформатора производится на основании обобщающего анализа результатов работы, полученных экспертными программами всех модулей системы.

Конструктивное исполнение системы TDM

Все модули системы TDM рассчитаны на работу в промышленном диапазоне температур от -40°C без использования элементов подогрева.

Стандартно система TDM поставляется в защитном шкафу из нержавеющей стали, в котором монтируются все необходимые модули и устройства. В шкафу устанавливается система подогрева минимального уровня, предназначенная для поддержания необходимой влажности воздуха. Для обеспечения работы системы в экстремальных условиях в шкафу монтируется дополнительная система подогрева или кондиционер, в зависимости от технического задания.

Такое универсальное исполнение системы TDM позволяет монтировать диагностическое оборудование непосредственно рядом с контролируемым трансформатором, уменьшая длину сигнальных кабелей.

Для передачи информации в локальную вычислительную сеть АСУ-ТП более высокого уровня в системе TDM используются оптический кабель или витая «медная» пара. В зависимости от технического задания предусмотрено использование для целей передачи информации в АСУ-ТП и интерфейса RS-485 или радиоканала.

Система TDM – интеллектуальный элемент общей системы Smart Grid

Технические решения системы TDM соответствуют решениям, принятым фирмой «ДИМУС» при создании систем мониторинга другого высоковольтного оборудования, например, для КРУЭ (система GIS-DM), высоковольтных кабельных линий (системы KMK и CDM). Это позволяет эффективно и быстро создавать обобщенные системы мониторинга технологически связанного высоковольтного оборудования, реализуя принцип комплексного мониторинга узла или транзита электроэнергии.

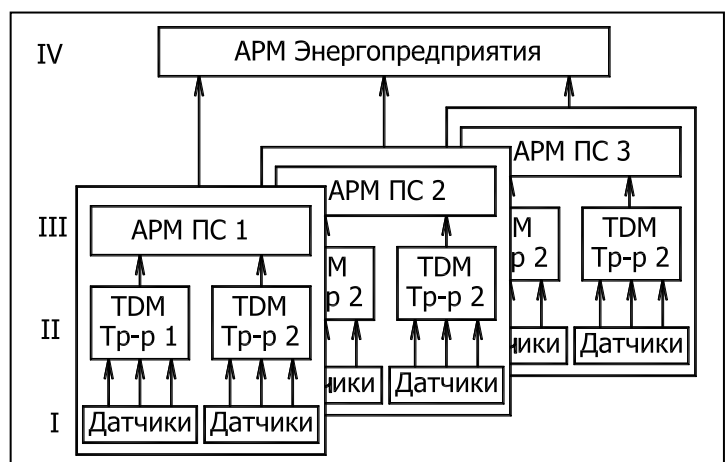
Универсализация систем мониторинга дает возможность оперативно обмениваться первичной информацией между различными системами мониторинга и оценивать состояние всего комплекса высоковольтного оборудования.

Многоуровневая реализация технических и программных средств системы TDM

Программные и технические средства системы TDM обладают иерархической структурой и включают в себя несколько уровней регистрации, обработки информации, мониторинга и диагностики технического состояния трансформатора, выработки и принятия решений.

Стандартная поставка технических и программных средств системы TDM включает в себя до 4 уровней регистрации, обработки информации и принятия решения о техническом состоянии контролируемого трансформатора.

Уровень I (уровень первичных датчиков) – технический уровень сбора исходной информации для мониторинга. Он включает в себя все первичные датчики



системы TDM, а также все установленные на трансформаторе дополнительные датчики и приборы, контролирующие состояние трансформатора.

Уровень II (уровень модулей системы TDM) – технический и программный уровень первичной обработки данных от датчиков, уровень осуществления параметрической диагностики работы трансформатора. Этот уровень диагностики реализован на основе программных возможностей модулей TDM.

Уровень III (диагностический уровень подстанции) – программный уровень комплексной экспертной оценки технического состояния трансформаторов. Представляет собой автоматизированное рабочее место (АРМ). Уровень III технически реализован в виде отдельного шкафа АРМ с компьютером и средствами связи, устанавливаемого в щитовом помещении подстанции.

Уровень IV (диагностический уровень энергопредприятия) – технический и программный уровень визуализации информации о состоянии оборудования всех подстанций энергопредприятия. Представляет собой шкаф - автоматизированное рабочее место (АРМ). При необходимости на этом уровне диагностики производится оценка рисков возникновения дефектов в наиболее ответственном оборудовании. На этом уровне возможно проведение интегральной диагностики влияния состояния трансформатора (трансформаторов) на состояние транзита электроэнергетики.

Уровень V (уровень контроля транзита энергии) – самый высокий уровень интеграции информации от систем мониторинга. Это даже может быть САЦ РОССЕТИ в г. Москва. На этом уровне собирается информация от всех систем мониторинга, установленных в энергосистемах России.

Уровни программного обеспечения INVA

Программное обеспечение INVA, поставляемое с системами TDM для мониторинга трансформаторов, включает в себя базовые математические и диагностические модели для уровней IV, III и частично II. Набор дополнительных экспертных модулей и математических моделей для этих уровней, например, для сравнительной оценки влияния состояния трансформатора на техническое состояние общего транзита энергии (уровень IV) оговаривается при заказе системы отдельно.

Программное обеспечение INVA обеспечивает передачу и интеграцию информации в систему АСУ ТП уровней III и IV с использованием протокола МЭК 60870-5-104. Это позволяет оперативно и безопасно использовать существующие информационные сети заказчика.

Основными задачами, решаемыми при интеграции системы TDM в АСУ ТП, являются:

- Получение в АСУ ТП на уровнях III и IV оперативной информации о состоянии трансформатора в объеме, необходимом для оценки оперативным персоналом текущей ситуации и принятия решений.
- Возможность получения первичной информации о состоянии трансформатора от других подсистем АСУ ТП без использования в TDM дополнительных датчиков.
- Автоматическая синхронизация «внутреннего времени» ПО системы TDM со временем системы АСУ ТП и «глобальным временем».
- Локальный доступ удаленным пользователям к «разрешенным» первичным данным и результатам работы системы TDM с использованием ресурсов АСУ ТП, в том числе WEB — доступ.
- Удаленный контроль правильности функционирования и исправности технических и программных средств системы TDM.

1.3. Текущее техническое состояние трансформатора. Общие определения

Основой для оптимальной, экономически обоснованной стратегии управления эксплуатацией трансформатора является знание его текущего технического состояния.

В разных источниках техническое состояние трансформатора описывается другими, но очень похожими по смыслу параметрами, например, «остаточный ресурс трансформатора», «индекс технического состояния» и т. д. Вне зависимости от формального звучания этих параметров они имеют примерно одинаковый смысл.

На основании анализа расчетного параметра «текущее техническое состояние трансформатора» в программном обеспечении INVA строятся стратегии управления «жизнью трансформатора»: оперативная и стратегическая. В зарубежной литературе для описания стратегии управления эксплуатацией трансформатора используется термин «life management».

В самом общем случае решения задач управления эксплуатацией в этой стратегии должны быть объединены три задачи различного уровня:

- 1 - Принятие оперативных решений о проведении текущих ремонтных и сервисных работ.
- 2 - Определение сроков проведения капитальных ремонтов и модернизаций.

3 - Планирование технически и экономически обоснованных сроков вывода трансформатора из эксплуатации.

В зависимости от глубины периодов планирования управлением эксплуатацией трансформатора необходимо использовать различные наборы первичных параметров, соответствующим образом описывающих состояние трансформатора.

Для принятия решения на первом уровне о проведении оперативных сервисных и ремонтных работ необходимо знание текущего технического состояния трансформатора и информации об имеющихся дефектах.

Для планирования сроков проведения капитальных ремонтов, это второй уровень принятия управляющих воздействий, необходимо дополнительно ориентироваться и на более медленные изменения состояния трансформатора, для чего необходимо рассматривать другие параметры и дефекты трансформатора, возникновение и развитие которых соизмеримо с таким временным интервалом.

На третьем уровне управления жизнью трансформатора, когда решается вопрос о сроках его замены, приходится рассматривать альтернативные вопросы. Необходимо учитывать и возможность эффективного восстановления параметров трансформатора во время альтернативного капитального ремонта и возможность замены трансформатора во время комплексной модернизации подстанции и всего транзита электроэнергии, где трансформатор является одним из многих элементов. Дополнительная информация о необходимости замены трансформатора может быть получена после оценки возможных последствий возрастающих рисков из-за снижения надежности работы «старого» трансформатора, при оценке возрастающей стоимости владения «старым» трансформатором и т.д.

Даже из всего этого простого перечисления особенностей принятия управляющих воздействий, имеющих различную целевую функцию, хорошо видно, что состояние трансформатора должно описываться минимум тремя взаимосвязанными параметрами – текущим, среднесрочным и долгосрочным коэффициентами технического состояния.

При этом не важно, как этот параметр называется в других источниках: или «остаточный ресурс», или «индекс технического состояния», или еще как-нибудь, в него всегда будет «вкладываться» определенный технологический смысл, как мы это делаем при расчетах коэффициента технического состояния трансформатора.

Очень важно то, что все три составляющих коэффициента технического состояния неразрывно связаны между собой, являются тремя частями единого целого. Поэтому нужно говорить о том, что коэффициент технического состояния трансформатора является векторным параметром, вектором, имеющим три проекции на координатные оси «текущего», «среднесрочного» и «долгосрочного» состояния трансформатора.

Каждая из трех осей координат, составляющих вектор технического состояния трансформатора, может быть названа определенным образом:

- Горизонтальная ось X – ось текущего технического состояния трансформатора, отражающая необходимость в оперативном проведении ремонтных и сервисных работ.

- Горизонтальная ось Y – ось среднесрочного технического состояния трансформатора (остаточный ресурс трансформатора до капитального ремонта), отражающая необходимость проведения капитальных ремонтов и модернизаций.

- Вертикальная ось Z – ось коэффициента долгосрочного технического состояния трансформатора (индекса полного технического состояния). Проекция вектора технического состояния на эту ось отражает необходимость проведения полной модернизации или замены трансформатора.

По итогам работы систем мониторинга и диагностики можно только корректно определить коэффициент текущего технического состояния трансформатора – оценить необходимость проведения оперативных ремонтных и сервисных работ.

2. Программное обеспечение INVA для мониторинга и автоматизированной диагностики состояния трансформаторов

Совместно с техническими средствами системы TDM, предназначенными для регистрации и первичной обработки информации, фирмой «ДИМУС» поставляется уникальное программное обеспечение «INVA».

2.1. Состав и функции программного обеспечения INVA

В состав ПО INVA входит набор алгоритмов и программ, решающих вопросы, связанные со сбором первичной информации, ее хранением, экспертной обработкой и формированием итоговых диагностических заключений о состоянии контролируемого трансформатора.

Элементы программного обеспечения INVA работают на разных уровнях реализации системы TDM.

- Модули системы TDM, уровень II.

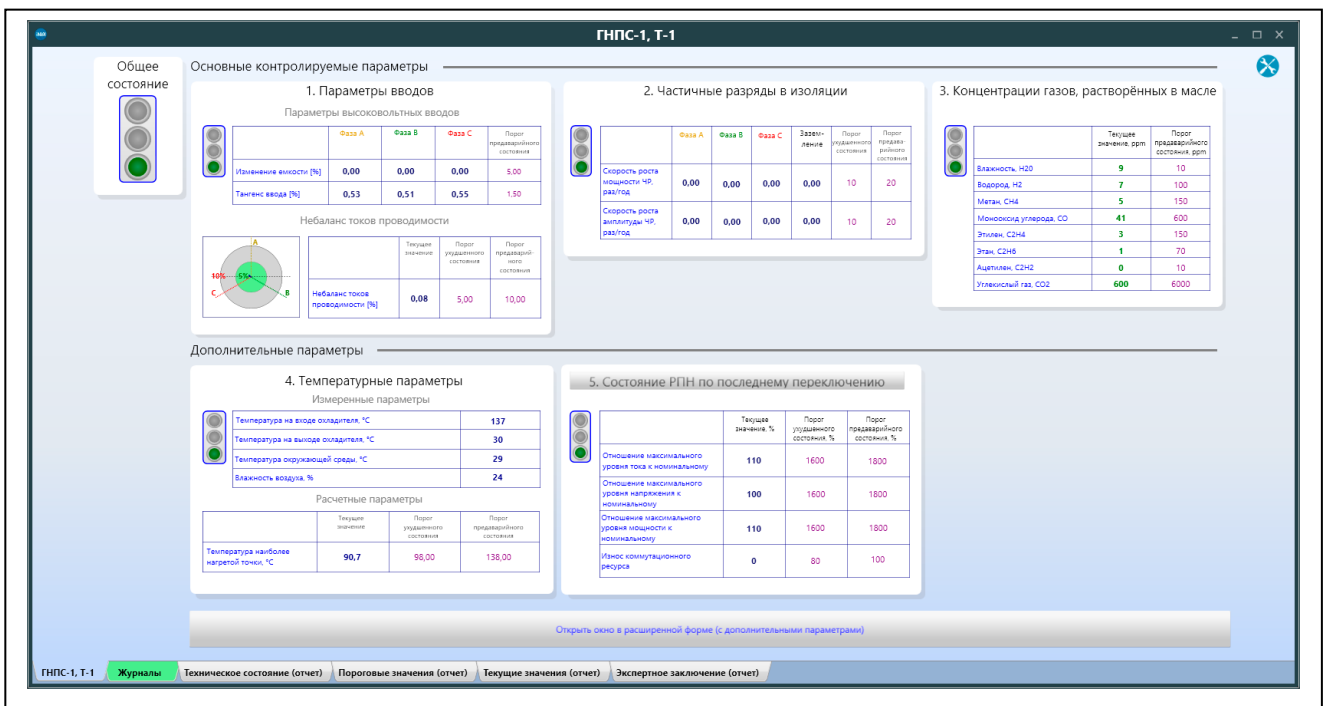
Информация от датчиков сбора первичной информации, смонтированных на трансформаторе, регистрируется, обрабатывается и хранится в необработанном виде в функциональных диагностических модулях. Управление работой каждого модуля производится встроенной программой на микропроцессорном уровне. В этой программе осуществляется основная параметрическая диагностика состояния трансформатора, формируются сигналы о превышении пороговых значений критических параметров.

Основной модуль M0 системы, работающий по сигналам программного обеспечения INVA, управляет работой всех диагностических модулей, собирает от них первичную информацию, интегрирует ее и передает на уровень АРМ подстанции (трансформатора).

В составе каждого модуля системы реализована специализированная экспертная система, результатом работы которой является диагностическое заключение о текущем техническом состоянии контролируемой подсистемы трансформатора.

- АРМ подстанции – основной уровень мониторинга состояния трансформатора, уровень III.

Этот уровень является основным для сбора, визуализации, хранения и экспертной обработки информации о состоянии трансформатора.



Вся необходимая информация о работе трансформатора, как первичная, так и специально обработанная экспертными программами в модулях, отображается на экране компьютера АРМ в цифровом значении и в виде стандартных светофоров состояния - «зеленый», «желтый», «красный», предназначенных для оперативного персонала.

При оценке текущего состояния трансформатора в INVA на уровне АРМ подстанции учитывается информация от дополнительных диагностических приборов (контроль растворенных газов, параметров

энергопотребления и т.д.), а также используется необходимая информация из системы АСУ ТП более высокого уровня.

Специальный диагностический персонал при необходимости может, используя программные средства АРМ трансформатора, проводить углубленный анализ и обработку всей имеющейся информации.

Оценка технического состояния трансформатора

Мониторинг технического состояния и экспертная оценка состояния трансформатора являются основной целью применения систем TDM.

В связи со сложностью и взаимосвязанностью процессов в трансформаторе итоговая диагностическая процедура является многопараметрической, комплексной, поэтому выполняется в программном обеспечении INVA на нескольких алгоритмических уровнях и в несколько этапов.

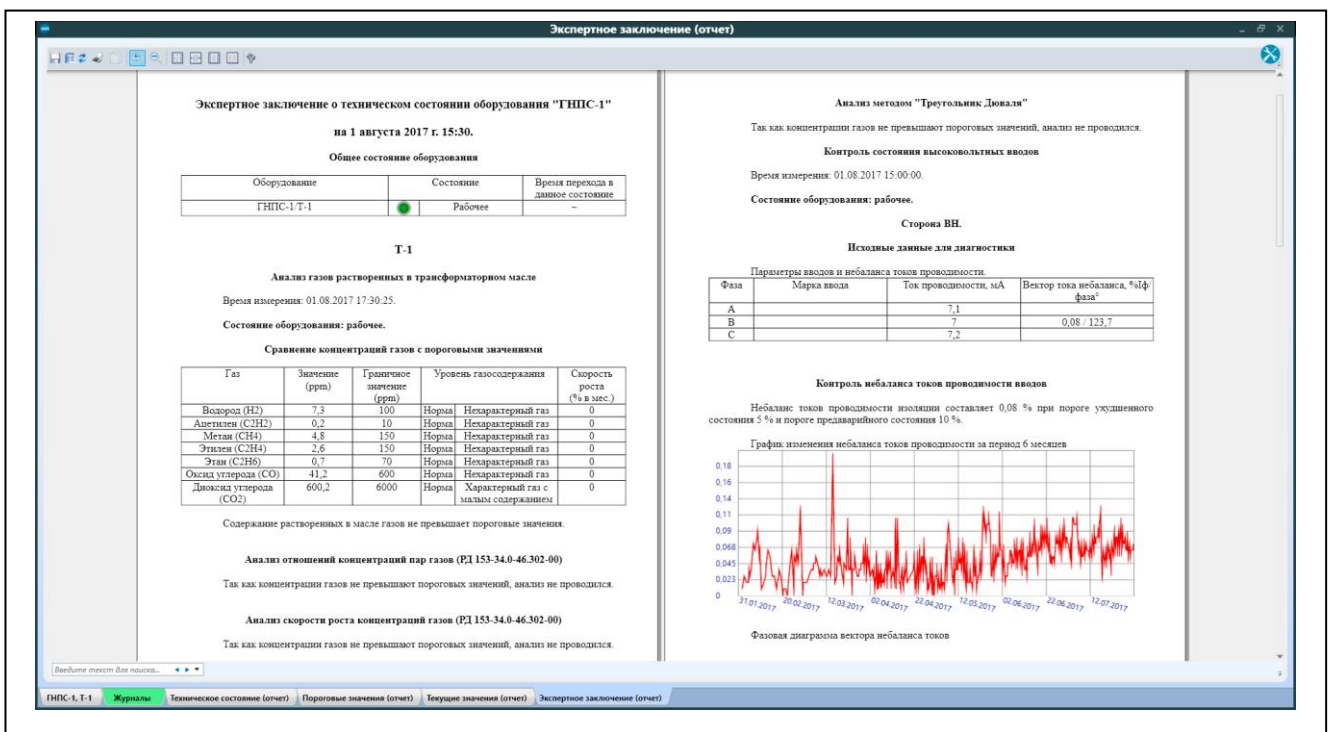
- Оперативная параметрическая оценка состояния трансформатора в основном производится в диагностических модулях TDM и частично в АРМ трансформатора (подстанции). Такая оценка проводится на основании сравнения измеренных величин с пороговыми значениями критических параметров трансформатора, для которых существуют эти значения.

- Экспертная оценка состояния трансформатора и диагностика дефектов.

Для формирования комплексных диагностических заключений в экспертной программе используются сложные диагностические модели, в которых характерные параметры используются от нескольких диагностических моделей отдельных подсистем трансформатора.

Диагностические заключения по несвязанным подсистемам контролируемого трансформатора ранжируются по интенсивности развития выявленных дефектов, по степени их опасности для эксплуатации оборудования. Такие дефекты приводятся в виде простого списка.

На формирование комплексных диагностических заключений оказывают влияние дополнительные встроенные модели: для определения наиболее нагретой точки обмотки, оценка эффективности работы системы охлаждения, комплексного влагосодержания в масле и в твердой изоляции, и т.д.



Формирование отчетов о состоянии и управление эксплуатацией трансформатора

По результатам параметрической и экспертной диагностики программой INVA в автоматическом режиме производится формирование отчетов о состоянии трансформатора. Отчеты представляются в формате Word, что дает возможность экспертам при необходимости уточнять и корректировать информацию.

Созданные отчеты включают в себя данные об информационно важных первичных параметрах трансформатора, сведения о выявленных экспертными алгоритмами дефектах.

В отчетах приводится дополнительная информация, описывающая вероятные сроки развития дефектных состояний до критического уровня. Для этого в программном обеспечении INVA используются

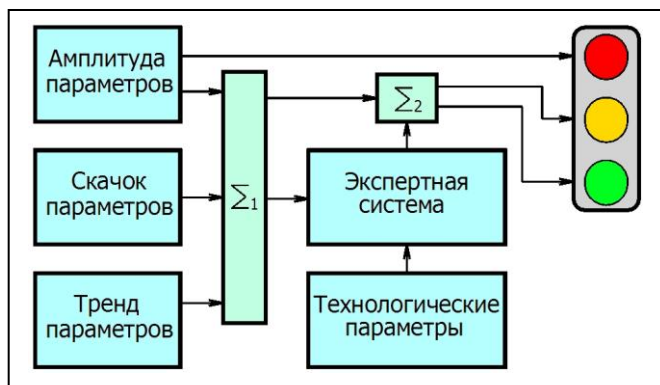
уникальные адаптивные модели развития дефектных состояний. Параметры этих математических моделей оперативно уточняются программой для каждого трансформатора по мере набора информации.

Для удобства анализа состояния трансформатора как элемента узла (подстанции) или составной части транзита энергии, программой INVA рассчитывается обобщенный коэффициент технического состояния трансформатора. Это дает возможность использования результатов работы системы TDM в диагностике типа «поиск слабого звена».

2.2. Алгоритмы принятия оценочных решений

В программном обеспечении модулей системы TDM и в ПО INVA, установленном на уровне подстанции, реализованы комплексная диагностика, включающая в себя параметрическую оценку критических и условно критических параметров. Работу параметрической диагностики дополняет автоматизированная экспертная оценка технического состояния трансформатора на основе математических моделей и алгоритмов.

По результатам работы оперативных алгоритмов комплексной диагностики трансформатора в первую очередь принимается решение о текущем техническом состоянии трансформатора – рассчитывается коэффициент текущего технического состояния трансформатора.



Алгоритм принятия оперативного решения о текущем состоянии трансформатора в системе TDM иллюстрируется рисунком.

Основное влияние на принятие решения об оценке состояния трансформатора имеют значения критических параметров, регистрируемых в модулях системы TDM. Это объясняется тем, что для этих параметров существуют общепринятые нормативные пороговые значения, однозначно оценивающие техническое состояние определенной подсистемы, важной для дальнейшей работы трансформатора. Превышение любым критическим параметром

порога предаварийного состояния фиксируется экспертной системой и отображается на рисунке зажиганием «красной лампы светофора» текущего состояния трансформатора.

Реально в программном обеспечении INVA все происходит сложнее, это не просто зажигание красной лампы светофора, это проведение совокупности технических и алгоритмических процедур, имеющих целью донести важную информацию о возникшем предаварийном состоянии контролируемого трансформатора до эксплуатационного, ремонтного и административного персонала.

Большое значение для формирования оценки состояния трансформатора в системе TDM имеют не только абсолютные значения критических параметров, но и такие изменения, как «скачок параметра» и «тренд параметра». Это происходит при быстрых или медленных изменениях в трансформаторе, и отражает возникновение или развитие дефектных состояний. Возникновение таких ситуаций оценивается экспертной системой как «тревожные состояния» и отображается зажиганием «желтого сигнала» светофора состояния. Желтый свет загорается потому, что это фиксирует тревожные изменения в состоянии трансформатора, но, поскольку абсолютные значения критических параметров еще не достигли предаварийных значений, то «красный свет светофора» загорать еще рано.

Аналогично происходит с ранжированием итогов работы комплексной экспертной системы TDM, реализованной в программном обеспечении модулей и на уровне АРМ трансформатора программном обеспечении мониторинга INVA. На уровне отдельных технических модулей TDM реализованы локальные экспертные системы, анализирующие техническое состояние подсистем трансформатора, а на уровне АРМ происходит интегрирование работы локальных экспертных систем и проводится комплексная экспертная оценка состояния трансформатора.

Итоговое экспертное заключение, автоматически формируемое в системе TDM, позволяет выявить наличие в трансформаторе явных и скрытых дефектных и преддефектных состояний. Все выявленные экспертной системой дефекты обычно являются еще скрытыми (это основное достоинство экспертной системы – возможность выявлять дефекты на самых ранних стадиях их появления и развития) и по уровню своего развития не достигли предаварийного порога, поэтому по итогам работы встроенной экспертизы программой может загораться только «желтый сигнал светофора».

Большое влияние на итоги работы экспертной системы TDM имеет первичная информация двух типов – основные технологические параметры эксплуатации трансформатора и особенности конструкции контролируемого оборудования. Грамотное использование этой информации значительно повышает достоверность заключений экспертной системы.

Как уже сказано выше, красный сигнал светофора может зажечь только превышение предаварийного порога критическим параметром. По определению, при раннем выявлении дефектного и преддефектного состояния трансформатора экспертной системой всегда существует достаточный интервал времени для принятия решения и проведения управляющих воздействий на эксплуатацию трансформатора. Это полностью соответствует основным принципам использования системы управления эксплуатацией оборудования «по техническому состоянию», когда будущие управляющие воздействия на техническое состояние планируются исходя из текущего состояния трансформатора.

2.3. Прогнозирование развития состояния трансформатора

Эффективное управление эксплуатацией трансформатора по итогам работы экспертной программы системы TDM невозможно без использования в ней универсальных алгоритмов прогнозирования, при помощи которых решается главный для эксплуатации вопрос – корректного расчета предстоящих изменений в техническом состоянии трансформатора.

Система управления эксплуатацией трансформатора в составе TDM включает в себя две взаимосвязанные подсистемы – диагностики и прогнозирования. При помощи алгоритмов диагностирования определяется объем будущих необходимых ремонтных воздействий, а при помощи алгоритмов прогнозирования развития этих дефектных состояний рассчитывается время достижения трансформатором пороговых значений технического состояния, т.е. определяется оптимальный срок проведения планируемых ремонтных воздействий.

Достоверность прогнозирования развития дефектных и бездефектных состояний трансформатора в основном зависит от двух параметров – от типа используемой в расчетах математической модели и от того, насколько корректно в этой модели учтены уникальные особенности контролируемого трансформатора. Точнее будет говорить, что достоверность проведения прогнозных расчетов технического состояния в основном зависит от учета особенностей конструкции трансформатора.

Достаточно часто на практике использование несложной математической модели, внешне просто учитывающей реальные технические особенности трансформатора, дает намного лучшие результаты, чем использование сложной и более точной математической модели. Даже если эта модель будет состоять из большого количества «правильных и умных» уравнений, для которых где-то мелким почерком будет сделана маленькая ссылка, что коэффициенты этой модели нужно будет как-то (и кем-то) определить и уточнить, ну а вот тогда-то ...

Самой большой сложностью при создании и использовании математических моделей силовых трансформаторов, впрочем, как и любого другого оборудования, является то, что существует большое количество вариантов и сочетаний, когда на математическую модель бездефектного трансформатора накладываются уникальные модели различных дефектных состояний. При этом процесс «взаимного интегрирования» этих моделей между собой происходит абсолютно по-разному, в зависимости от их комбинаций, и при этом не существует их взаимного простого наложения, перемножения или другого какого-то математически однозначного и интуитивно понятного процесса взаимного объединения. Наоборот, все процессы в общей математической модели трансформатора будут многократно усложняться из-за возникновения новых взаимных связей различного уровня.

Реально выполнимой возможностью учесть все многообразие модификаций бездефектной и дефектной моделей трансформатора является переход от использования стационарной математической модели к использованию в расчетах адаптивной модели, в которых коэффициенты влияния и интегральные коэффициенты модели непрерывно уточняются и модернизируются, по мере поступления оперативной информации о состоянии трансформатора. Такие расчетные модели называются адаптивными потому, что они постоянно и автоматически корректируются, за счет этого учитывая изменение текущего технического состояния трансформатора.

Работа алгоритма адаптации математической модели трансформатора происходит следующим образом. Производится регистрация первичных параметров состояния трансформатора, по этим данным производится экспертная оценка состояния трансформатора и рассчитывается текущий коэффициент технического состояния.

Новое расчетное значение коэффициента технического состояния сравнивается со значением, которое бы получилось при прогнозировании изменения технического состояния относительно прежних данных, полученное с использованием математической модели с предыдущими значениями коэффициентов модели. Если разброс результатов расчетных и полученных значений коэффициента технического состояния будет незначителен, то коэффициенты математической модели остаются неизменными. Если же разница между расчетными и реальными значениями коэффициентов технического состояния превышает допустимый разброс, тогда выполняется процедура уточнения коэффициентов расчетной математической модели с учетом последнего проведенного измерения параметров трансформатора.

После этого выполняется процедура «обратного расчета», когда взяв за основу результаты последнего замера, производится расчет по откорректированной модели значений коэффициента технического состояния трансформатора за предыдущий период времени. Чем точнее будет совпадение полученных данных такого расчета с реальными результатами, особенно на ближайшем временном интервале от последней временной точки, тем точнее работает новая версия адаптированной математической модели трансформатора.

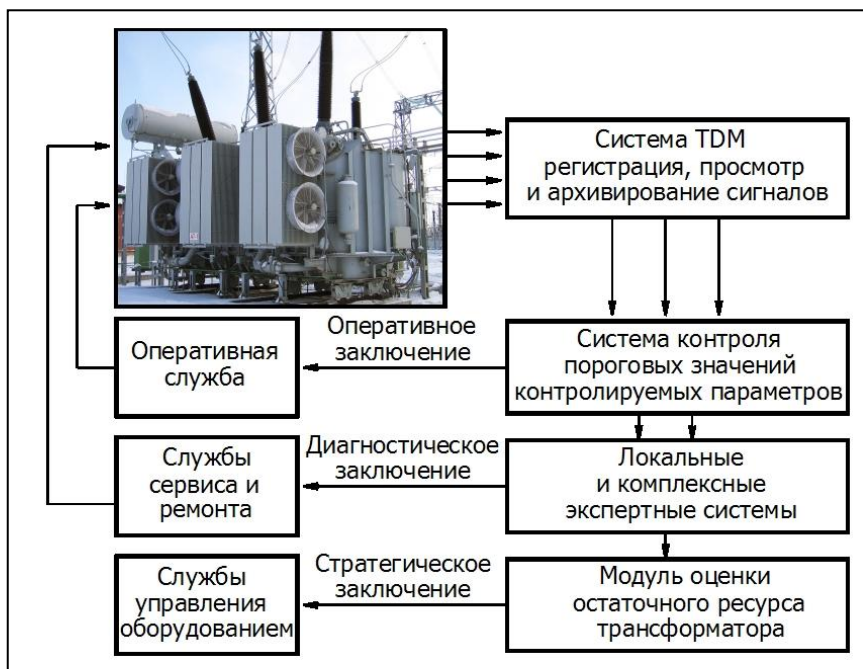
Если при последующих измерениях и расчетах снова появятся отклонения между реальными и расчетными данными коэффициента технического состояния трансформатора, то процедура корректировки коэффициентов расчетной модели повторяется.

При начале работы системы мониторинга для коэффициентов математической модели трансформатора берутся усредненные значения, полученные после итерационного уточнения для других трансформаторов. В процессе работы эти коэффициенты уточняются и максимально корректно описывают реальный контролируемый трансформатор.

2.4. Целевое назначение результатов работы экспертной системы диагностики

Результаты работы экспертного ядра программы мониторинга INVA оперативно отражаются на экране компьютера АРМ подстанции в виде цифровой информации, различных гистограмм, светофоров состояния и т.д. При необходимости эта информация передается на более высокие уровни АСУ-ТП с более обобщенного анализа и визуализации.

Однако для более формализованной организации управления обслуживанием и ремонтами трансформаторов по техническому состоянию необходимо наличие диагностической информации в концентрированном виде, в виде готовых к распечатыванию и использованию в «бумажном виде» отчетов и справок. В идеальном случае эти отчеты должны готовиться к распечатыванию самой экспертной программой, но допускать, при необходимости, их корректировку эксплуатационным персоналом и экспертами, в соответствии с принятым на предприятии документооборотом.



На основании работы экспертного ядра ПО INVA специальной программой формируются оперативные документы, справки и отчеты, предназначенные для использования эксплуатационным персоналом подстанции.

Для создания актуальных документов для ремонтных и сервисных служб дополнительно используются результаты различных «of-line» тестов, дополняющих информацию о текущем техническом состоянии трансформатора. Эти данные вводятся в ПО INVA при помощи специализированной программы.

Для получения стратегических заключений «о дальнейшей судьбе трансформатора» вся выше

перечисленная диагностическая и справочная информация должна быть дополнена информацией о проведенных и планируемых капитальных ремонтах и о стратегических задачах подстанции, на которой установлен контролируемый системой мониторинга трансформатор.

Создание диагностических отчетов для эксплуатационного персонала является базовой функцией системы TDM. Возможность создания и состав ремонтных и стратегических отчетов отдельно оговаривается при заключении договора на поставку системы мониторинга марки TDM, потому что они связаны с особенностями конструкции и эксплуатации каждого конкретного трансформатора.

3. Первичные и расчетные параметры, используемые в системе TDM

3.1. Ранжирование первичных параметров трансформатора

Критические параметры технического состояния контролируемого оборудования (измеренные и расчетные), непосредственно определяющие возможность дальнейшей эксплуатации оборудования.

Эти параметры имеют максимальную значимость и наиболее активно используются в системе управления ремонтами и сервисным обслуживанием.

Условно - критические параметры технического состояния контролируемого оборудования (измеренные и расчетные), косвенно влияющие на возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. Обычно сюда же входят расчетные параметры, полученные на основании работы экспертных систем.

Не критические параметры технического состояния контролируемого оборудования (измеренные и расчетные), не оказывающие прямого влияния на возможность дальнейшей эксплуатации оборудования.

Комплексный параметр текущего технического состояния (ТТС) трансформатора (текущий остаточный ресурс), описывающий состояние трансформатора в момент проведения измерений, определяющий необходимость в проведении оперативных сервисных и ремонтных воздействий.

Комплексный параметр технического состояния трансформатора рассчитывается в основном по критическим параметрам, но с учетом условно критических параметров. Не критические параметры влияют только на долгосрочную оценку состояния трансформатора.

Максимально информативными для организации мониторинга силового трансформатора являются критические параметры, им необходимо отдавать предпочтение при выборе параметров.

3.2. Критерии выбора набора параметров трансформатора для системы мониторинга

Для корректной работы математической модели системы TDM необходимо обеспечивать оптимальный набор первичных сигналов. На основании анализа этих параметров будут работать диагностические алгоритмы.

В рамках существующих технических средств системы TDM, на этапе проектирования, возможно использование различного набора первичных параметров.

- Минимальный набор, при котором вообще возможна работа данной математической модели.
- Оптимальный набор параметров, который обеспечивает получение эффективных результатов при использовании наиболее значимых первичных параметров.
- Максимальный набор, в котором максимально используются все параметры, регистрация которых возможна техническими средствами системы TDM. В этом случае диагностические возможности математических моделей используются полностью.

При выборе набора первичных параметров, которые должны регистрироваться системой TDM для конкретного трансформатора, всегда приходится решать сложную задачу, в которой критерии выбора достаточно размыты.

- Простое увеличение количества регистрируемых технологических параметров трансформатора необоснованно удорожает систему мониторинга. Плюсом в этом случае является то, что теоретически повышается информативность работы системы мониторинга, хотя обычно на практике это малозаметно. Реально информативность системы мониторинга повышается только тогда, когда речь идет о регистрации критических параметров, количество которых ограничено.

- Целевое увеличение количества регистрируемых технологических параметров трансформатора является оптимальным. Критерием оптимальности является формирование пакета входных сигналов для математических моделей, реализованных в программном обеспечении. Это делается с целью обеспечения максимальной эффективности работы экспертных алгоритмов. В этом случае возрастает не просто параметрическая информативность работы системы мониторинга, в значительно большей степени растет ее экспертная информативность, прямо ориентированная на управление эксплуатацией трансформатора.

- Ограничителем «сверху» для количества регистрируемых технологических параметров является цена трансформатора. Если стоимость системы мониторинга превышает порог в $3 \div 5\%$ от стоимости трансформатора, то экономическая эффективность работы такой системы обычно недостаточна для практического использования.

4. Диагностические алгоритмы и математические модели

В программном обеспечении модулей системы TDM и в ПО INVA реализованы многоуровневая параметрическая диагностика и автоматизированная экспертная оценка состояния трансформатора на основе математических моделей и алгоритмов.

Параметрическая диагностика основана на «прямом» контроле значений критических параметров трансформатора, для которых имеются нормативные или рекомендованные пороговые значения.

Оперативная параметрическая диагностика состояния трансформатора в системе TDM строится на анализе трех значений критических параметров:

- Текущие установившиеся значения критических параметров.
- Скачок критических параметров, отражающий быстрые изменения состояния трансформатора.
- Тренд изменения критических параметров, отражающий медленные изменения технического состояния трансформатора.

Диагностика на основе математических моделей предназначена для выявления дефектных и предаварийных состояний контролируемого трансформатора при помощи экспертных алгоритмов. Эта диагностика выполняется с использованием адаптированных к системе TDM эффективных экспертных алгоритмов, реализованных в программном обеспечении системы мониторинга, расположенных на уровнях обработки информации II, III и IV.

4.1. Основные диагностические функции модулей системы TDM

Все технические модули системы TDM подразделяются на две группы:

- Служебные модули (питания, защиты, формирования служебных сигналов).
- Модули регистрации технологических параметров и локальной экспертной обработки информации (уровень II).

Ниже приведен перечень основных модулей регистрации технологических параметров и проведения параметрической диагностики и диагностики на основе математических моделей.

№	Марка	Наименование	Описание функций модуля
1	M0	Главный модуль	Главный технический и программный модуль TDM. Он управляет работой всех диагностических модулей, собирает с них информацию и передает ее на уровень АРМ подстанции.
2	M1	Монитор температуры	Модуль для расширенной регистрации температуры трансформатора и окружающей среды. Позволяет проводить оценку эффективности работы системы охлаждения.
3	M2	Аварийный регистратор	Модуль регистрации переходных и предаварийных режимов работы трансформатора. Позволяет фиксировать броски токов и напряжений обмоток трансформатора.
4	M3	Монитор вводов	Мониторинг технических параметров высоковольтных вводов. Контроль величины тока проводимости, емкости C1, расчет тангенса угла потерь (абсолютного или относительного).
5	M4	Монитор ЧР (ВЧ)	Модуль регистрации частичных разрядов в диапазоне частот 0,1 ÷ 30,0 МГц. Анализ распределения импульсов ЧР, определение типа дефекта в изоляции трансформатора.
6	M4.1	Монитор ЧР (СВЧ)	Модуль регистрации частичных разрядов в диапазоне частот 400 ÷ 1500,0 МГц. Используются встроенные в бак трансформатора датчики, поэтому модуль имеет хорошую помехозащищенность.
7	M5	Монитор РПН	Модуль предназначен для контроля технического состояния устройства РПН трансформатора. Контролирует количество коммутаций по ступеням и процесс коммутации.
8	M6	Монитор ЧР (ультразвук)	Модуль регистрации частичных разрядов в ультразвуковом диапазоне частот 30 ÷ 300 кГц. Позволяет проводить локацию места дефекта внутри бака трансформатора.
9	M7	Монитор вибрации	Регистрация вибрации бака в диапазоне 10 ÷ 1000 Гц. Позволяет оценивать качество прессовки трансформатора.

10	M8	Регистратор импульсных перенапряжений	Модуль регистрации высокочастотных импульсных перенапряжений в сети в диапазоне частот до 10,0 МГц. Оценка влияния перенапряжений на состояние трансформатора.
11	M9	Модуль технологических параметров	Модуль дополнительных входов. Позволяет расширить количество регистрируемых аналоговых и цифровых параметров трансформатора.
12	M10	Монитор Zk	Модуль регистрации токов и напряжений первичной и вторичной обмоток трансформатора, используемых для расчета параметра Zk, оценивающего наличие изменений формы обмоток.
13	TDM-Oil	Регистратор параметров изоляции	Модуль предназначен для комплексной диагностики состояния изоляционных систем трансформатора. Является бюджетным решением для контроля влагосодержания в масле, частичных разрядов, вибрации, температуры.
14	TDM-TR TDM-TS	Управление системой охлаждения	

При создании систем мониторинга с заданными диагностическими свойствами необходимо использовать соответствующие модули регистрации и анализа технологических параметров.

4.2. Диагностические модели, реализованные в системе TDM

Набор из 14 диагностических математических моделей, реализованных в технических и программных средствах системы TDM, приведен в таблице.

№	Диагностическая модель	Назначение математической модели, получаемые результаты
1	Температурное состояние трансформатора	<ul style="list-style-type: none"> - Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки по температуре верхних слоев масла и нагрузке трансформатора. - Расчет старения изоляции по температуре наиболее нагретой точки обмотки и расчетному влагосодержанию твердой изоляции. - Оценка эффективности работы системы охлаждения. - Контроль технического состояния маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения трансформатора.
2	Влагосодержание в масле и в твердой изоляции трансформатора	<ul style="list-style-type: none"> - Контроль текущего влагосодержания в масле трансформатора. - Расчет влагосодержания в масле с учетом предшествующих режимов работы трансформатора. - Расчет влагосодержания в твердой изоляции в местах перегрева. - Определение температуры закипания влаги в твердой изоляции.
3	Контроль и анализ растворенных газов в масле	<ul style="list-style-type: none"> - Определение типа дефектов в трансформаторе по наличию, концентрации и сочетанию растворенных в масле газов.
4	Контроль состояния вводов трансформатора	<ul style="list-style-type: none"> - Расчет параметров основной изоляции высоковольтных вводов (тангенс угла диэлектрических потерь, емкость) и их изменения. - Определение дефектного ввода, определение типа дефекта.
5	Контроль и анализ частичных разрядов в изоляции	<ul style="list-style-type: none"> - Регистрация частичных разрядов в диапазонах HF, UHF и ультразвуковом. - Определение наличия и типа дефектов в изоляции трансформатора. - Локация места возникновения дефекта внутри бака трансформатора.
6	Комплексный анализ растворенных газов и частичных разрядов	<ul style="list-style-type: none"> - Совместный анализ растворенных газов и зарегистрированных частичных разрядов для уточнения диагнозов о состоянии изоляции. - Разделение дефектов внутри бака трансформатора и во вводах.
7	Контроль состояния устройства РПН	<ul style="list-style-type: none"> - Статистический контроль работы РПН. - Расчет перепада температур в основном баке и баке контактора РПН. - Определение механического и электрического износов контактов.
8	Анализ влияния импульсных	<ul style="list-style-type: none"> - Регистрация высокочастотных импульсных перенапряжений. - Оценка воздействия импульсных высокочастотных перенапряжений,

	перенапряжений	выявление изменений состояния трансформатора.
9	Вибрационное состояние трансформатора.	- Определение технического состояния конструкции трансформатора по общему уровню и спектру вибрации на поверхности бака трансформатора. - Оценка качества прессовки магнитопровода и обмоток.
10	Комплексный контроль состояния трансформатора	- Контроль температуры, влагосодержания, частичных разрядов и вибрации в баке трансформатора (разработка для модуля TDM-Oil). - Комплексное оперативное и бюджетное решение для оценки состояния трансформатора.
11	Оптимальное управление охлаждением	- Управление охлаждением трансформатора с минимизацией потерь. - Использование функции «прекулинг» для уменьшения превышений температуры обмоток трансформатора.
12	Комплексная оценка состояния трансформатора	- Комплексная оценка технического состояния трансформатора на основе результатов работы всех диагностических моделей. - Рекомендации по стратегии эксплуатации контролируемого оборудования с учетом требований РД 34.45-51.300-97.
13	Нагрузочная способность трансформатора	- Расчет нагрузочной способности трансформатора по ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91), МЭК 60076-7, МЭК 60076-2. - Допустимые расчетные величины и время перегрузки.
14	Оценка влияния состояния трансформатора на работу транзита	- Определение влияния текущего технического состояния трансформатора на надежность работы технологического транзита энергии (для уровня IV в ПО INVA).

Эти математические (диагностические) модели реализуются на различных уровнях программного обеспечения INVA:

- На уровне III (подстанция) реализуются модели 11, 12 и 14.
- На уровне IV (подстанция) реализуются модели 11, 12 и 14.
- На уровне V (транзит электроэнергии) реализуется модель 14.

4.2.1. Модель «Температурное состояние трансформатора»

Это комплексная математическая модель, в которой всесторонне оцениваются пять важных взаимосвязанных особенностей эксплуатации силового трансформатора, связанные с его температурными режимами работы.

Это:

1 - Особенности влияния работы системы охлаждения трансформатора и других дополнительных факторов на температуру бака.

2 – Расчет или регистрация экстремальных температурных нагрузок на изоляцию обмоток, возникающих в особых зонах, в которых охлаждение наименее эффективно.

3 - Влияние локальных экстремальных и распределенных рабочих температур обмоток на общий срок службы бумажной изоляции трансформатора.

4 - Определение общей эффективности работы системы охлаждения трансформатора, учитывающей дополнительные затраты электроэнергии на работу системы охлаждения.

5 – Стационарный мониторинг и контроль технического состояния электродвигателей маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения.

Все эти диагностические вопросы в математической модели рассматриваются взаимосвязано, как на уровне технических средств (модулей), так и на разных уровнях распределенных программных средств. Результатом этих взаимных связей является повышение диагностической эффективности работы экспертной системы, базирующейся на этой математической модели.

4.2.1.1. Для работы математической модели контроля температурного состояния трансформатора необходимо наличие следующих данных:

- Температура трансформатора вверху и внизу бака.
- Температура окружающей среды.
- Величина текущей нагрузки трансформатора.
- Информация о токах и напряжениях электродвигателей маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения трансформатора.

4.2.1.2. Эти исходные для проведения экспертной оценки первичные данные регистрируются в системе TDM в модулях:

- Модуль M0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам, измерение температур верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора.
- Модуль M1 – регистрация расширенного набора температур бака трансформатора, включая температуру охладителей, контроль токов и мощностей электродвигателей маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения трансформатора.

На основании этих данных в ПО INVA производятся следующие расчеты:

- Определяется температура наиболее нагретой точки обмотки по температуре верхних слоев масла и нагрузке трансформатора (постоянный расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки в соответствии МЭК 60076-7.)
- Производится расчет степени старения изоляции обмоток трансформатора (по температуре наиболее нагретой точки обмотки и расчетному влагосодержанию твердой изоляции).
- Выполняется оценка текущей эффективности работы системы охлаждения. Для этого используются величины разниц температур верха и низа бака трансформатора и температуры бака и окружающей среды. Если датчики температуры установлены на входах и выходах охладителей, то это позволяет оценивать эффективность и их работы.

Интенсивность тепловыделения трансформатора в текущем режиме определяется как сумма потерь холостого хода и потерь короткого замыкания, скорректированных на величину нагрузки трансформатора. В начале работы системой мониторинга рассчитывается и статистически уточняется расчетный коэффициент эффективности работы системы охлаждения. В дальнейшем значение этого коэффициента используется экспертной системой как базовое значение при контроле текущей эффективности работы системы охлаждения.

4.2.1.3. При наличии в составе поставки технических средств системы TDM специализированного модуля марки «M1 Монитор температуры» свойства математической модели температурных режимов работы трансформатора расширяются. Появляется возможность контроля технического состояния маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения трансформатора.

Оперативная оценка состояния маслонасосов и вентиляторов производится по спектру тока, потребляемого каждым электродвигателем.

При помощи этого метода системой диагностируется:

- Наличие длительных, хотя незначительных, перегрузок электродвигателей.
- Определяется состояние подшипников электродвигателей.
- Выявляется износ и наличие повреждений крыльчатки маслонасосов.
- Диагностируется наличие небаланса рабочих колес вентиляторов системы охлаждения, появление которого отрицательно сказывается на ресурсе вентиляторов.

4.2.2. Модель «Влагосодержание в масле и в твердой изоляции трансформатора»

Это очень важная математическая модель, описывающая процессы в изоляционной подсистеме трансформатора. С ее помощью оценивается наличие и концентрация влаги в баке трансформатора, радикально влияющей на изоляционную стойкость масла – основной изоляции трансформатора.

Достоинством используемой в системе TDM математической модели является то, что она комплексно учитывает существование и взаимные фазовые преобразования влаги в масле, которая всегда находится в баке трансформатора в трех различных состояниях. Дополнительный учет особенностей фазовых преобразований влаги дает возможность прогнозировать возникновение критических предаварийных ситуаций, когда влага из неопасных состояний может преобразоваться в опасные, снизив электрическую прочность масла до недопустимого уровня.

При помощи данной математической модели осуществляется:

1 - Контроль текущего влагосодержания в масле трансформатора. Используемые в системах мониторинга трансформаторов датчики регистрируют концентрацию только той части влаги в масле, которая находится в дисперсной фазе. Именно эта влага максимально опасна для работы трансформатора, поэтому ее концентрация особо важна для контроля состояния трансформатора.

Растворенная в масле влага не опасна для трансформатора, а концентрация влаги в твердой изоляции является условно критическим параметром. Влагосодержание в твердой изоляции обычно определяется расчетным путем, хотя и с низкой точностью. Это происходит потому, что существующие датчики контроля влагосодержания в твердой изоляции чаще всего не обладают необходимыми параметрами по точности и особенно соотношением цена – качество.

2 - Расчет влагосодержания (дисперсной фазы влаги) в масле с учетом предшествующих режимов работы трансформатора. В работающем трансформаторе, в зависимости от режима его работы,

происходит перемещение (преобразование) влаги по трем доступным формам - растворенной, дисперсной и влагой в твердой изоляции. В зависимости от предшествующих режимов работы трансформатора возможно возникновение ситуации, когда концентрация дисперсной влаги окажется недопустимо большой, что неизбежно приводит к предаварийному состоянию трансформатора. Это обусловлено разными скоростями преобразования влаги из одного состояния в другое.

С целью предупреждения случаев, когда может произойти резкое повышение концентрации дисперсной влаги в масле трансформатора, в математической модели системы TDM постоянно формируются и анализируются температурные зависимости влагосодержания в масле трансформатора. На основании анализа этих трендов разрабатываются практические рекомендации для исключения случаев возникновения недопустимых режимов работы трансформатора, учитывающие статистически определенные скорости преобразования влаги из одной фазы в другую.

3 - Расчет влагосодержания в твердой изоляции трансформатора производится на основе стабильной во времени модели равновесного состояния концентраций влаги в элементах системы «масло – бумага».

4 – Полученное расчетное значение концентрации влаги в твердой изоляции используется для определения температуры закипания влаги в твердой изоляции.

4.2.2.1. Для эффективной работы математической модели контроля влагосодержания в масле и в твердой изоляции трансформатора необходимо наличие следующих данных:

- Влагосодержание в масле от дополнительного внешнего датчика. Обычно такой датчик входит в состав приборов контроля растворенных газов в масле трансформатора.

- Температура масла в баке трансформатора.

- Температура окружающей среды. Величина этой температуры необходима для определения возможного повышения концентрации дисперсной влаги при охлаждении трансформатора, чаще всего при его отключении.

4.2.2.2. Данные о температурных режимах работы трансформатора регистрируются в модуле M0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам и температур верха и низа бака трансформатора.

Информация о текущем влагосодержании (концентрации дисперсной фазы влаги в масле бака трансформатора) передается в систему TDM при помощи внешнего интерфейса, по которому подключен прибор контроля влагосодержания, обычно объединенный с прибором регистрации растворенных в масле газов.

На основании этих исходных данных в ПО INVA производится оперативная оценка текущих значений изоляционных параметров масла.

Для расширения возможностей математической модели и повышения точности ее работы в экспертной системе постоянно проводятся дополнительные расчеты:

- Статистически уточняются скорости перемещения влаги из одного состояния (фазы) в другое: дисперсное состояние воды – растворенная в масле влага – влага в твердой изоляции.

- Определяется максимально возможная концентрация дисперсной влаги в трансформаторе при «быстром» снижении температуры бака, вплоть до температуры окружающей среды, когда избыток растворенной в масле влаги переходит в дисперсное состояние.

4.2.3. Модель «Контроль и анализ растворенных газов в масле»

В программном обеспечении INVA используется стандартная математическая модель анализа концентраций растворенных газов в масле бака трансформатора и определения типа дефектов в трансформаторе. Использование этой модели не вызывает у практических специалистов больших вопросов, так как все эти алгоритмы известны, общеприняты и имеют нормализованные пороги значений концентраций отдельных газов и их сочетаний.

Диагностические заключения о состоянии трансформатора формируются в экспертной части программного обеспечения мониторинга TDM на основании двух наиболее известных алгоритмов для анализа по наличию и концентрации растворенных газов:

- Анализ концентраций характерных растворенных газов в масле и их комбинаций по методике, принятой в России.

- Анализ концентраций комбинаций наиболее важных растворенных газов при помощи треугольника Дюваля.

4.2.3.1. Для эффективной работы математической модели контроля и анализа растворенных газов в масле необходимо наличие следующих данных:

- Текущие концентрации характерных растворенных газов в масле трансформатора.

- Связь концентраций характерных растворенных газов с технологическими параметрами работы трансформатора.
- Изменение концентраций растворенных газов во времени.
- Температура масла в баке трансформатора.

4.2.3.2. Данные о наличии и составе растворенных в масле газов, необходимые для работы математической модели, в системе TDM регистрируются во «внешних» дополнительных приборах, разработанных и производимых различными диагностическими фирмами, которых в мире присутствует несколько десятков.

Общая информация о таких приборах, которые наиболее часто использовались с системой TDM, приведена в таблице.

Производитель	Марка прибора	Свойства
ИНТЕРА	ИнтеГаз	1 газ + Σ 6 газов + H ₂ O
	7X	7 газов + H ₂ O
	ГИДРОМЕР	2 газа + H ₂ O
Morgan Schaffer	Calisto	1 газ + H ₂ O
	Calisto 2	2 газа + H ₂ O
	Calisto 5	5 газов + H ₂ O
	Calisto 9	9 газов + H ₂ O
MTE	HYDROCAL 1001	Σ 6 газов
	HYDROCAL 1003	2 газа + H ₂ O
	HYDROCAL 1005	4 газа + H ₂ O
	HYDROCAL 1008	7 газов + H ₂ O
KELMAN-GE	MINITRANS	3 газа + H ₂ O
	TRANSFIX	9 газов + H ₂ O
	MULTITRANS	8 газов + H ₂ O
	TAPTRANS	8 газов + H ₂ O
	HYDRAN M2	2 газа + H ₂ O
	GLA 100	2 газа
ДИМРУС	TDM-Oil-4	ЧР + вибрация + H ₂ O
	TDM-Oil-5	1 газ + ЧР + H ₂ O

Эти приборы имеют различные свойства, функциональные возможности и различаются по стоимости практически на порядок. Выбор типа используемого с системой TDM прибора анализа концентраций растворенных газов практически всегда остается за Заказчиком.

Следует учитывать, что в таблице приведен не полный список приборов контроля растворенных газов в масле трансформаторов, присутствующих на рынке, тем более что ежегодно появляются несколько новых и интересных приборов. Поэтому выбор прибора контроля растворенных газов, оптимального по свойствам и цене для конкретного трансформатора, является достаточно сложной задачей, в которой достаточно часто решающими бывают субъективные факторы.

Все необходимые технологические параметры работы трансформатора, используемые для работы математической модели анализа растворенных газов в масле трансформатора и диагностики дефектов, используются программным обеспечением INVA из данных соответствующих технических модулей системы TDM и дополнительных приборов.

4.2.4. Модель «Контроль состояния вводов трансформатора»

Это математическая модель важной подсистемы трансформатора, в которой сочетается контроль критических и условно критических параметров трансформатора, которыми являются параметры технического состояния высоковольтных вводов.

В рамках этой математической модели решаются вопросы:

1 – Защита трансформатора от аварии при пробое изоляционных обкладок во вводе. В большей мере это вопрос РЗА, который может также решаться техническими средствами систем диагностического мониторинга.

2 – Контроль состояния изоляции вводов по токам утечки изоляции вводов (тангенс угла потерь) и частичным разрядам – диагностика дефектов и прогнозирование оптимальных сроков проведения сервисных и ремонтных работ.

4.2.4.1. Для работы модели контроля состояния вводов трансформатора необходимо наличие следующих данных:

- Токи утечки вводов.
- Частичные разряды во вводах и в трансформаторе.
- Температура трансформатора вверху бака.
- Температура окружающей среды.
- Влажность окружающей среды.
- Величина текущей нагрузки трансформатора.

4.2.4.2. Эти исходные для проведения экспертной оценки первичные данные регистрируются в системе TDM в модулях:

- Модуль M0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам, измерение температур верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора, параметры окружающей среды.
- Модуль M3 – регистрация токов утечки вводов, регистрация напряжений с ТН (если они не подключены к модулю M2 – аварийный регистратор).
- Модуль M4 – регистрация частичных разрядов.

На основании этих данных в модуле M3 производятся расчеты:

- Определяются тангенсы углов потерь изоляции вводов (абсолютные или относительные, в зависимости от используемой схемы измерения).
- Рассчитываются величины емкостей C1 вводов, характеризующих наличие замыканий внутренних выравнивающих обкладок внутри вводов.
- Рассчитываются временные, технологические (от температуры) тренды изменения контролируемых параметров вводов.
- Выявляется дефектный ввод и возможный тип дефекта в этом вводе.

4.2.4.3. На программном уровне III (АРМ подстанции) при помощи экспертной системы проводится корреляция полученных диагностических результатов с результатами контроля растворенных газов в масле, полученных от внешнего прибора.

Это дает возможность разделять дефекты внутри бака трансформатора от дефектов во вводах трансформатора.

4.2.5. Модель «Контроль и анализ частичных разрядов в изоляции»

При помощи этой математической модели производится оперативная оценка технического состояния изоляционных систем трансформатора – главной изоляции обмоток, изоляции сердечника трансформатора и изоляции высоковольтных вводов.

Математическая модель работает на основе анализа информации о наличии, комплексной интенсивности и мощности, а также амплитудно-фазном распределении частичных разрядов в изоляции трансформатора.

На основании этой информации:

- 1 – Оценивается текущее состояние изоляции.
- 2 – определяется наличие и тип дефектов в изоляции.
- 3 – выявляются технологические и временные тренды в изменении параметров частичных разрядов.
- 4 – анализируется возможность и продолжительность дальнейшей работы трансформатора исходя из текущего значения параметров изоляции.

4.2.5.1. Для корректной работы системы контроля изоляции трансформатора по частичным разрядам необходимо наличие следующей первичной информации:

- Информации о количестве и параметрах частичных разрядов в изоляции. Для этого необходимо провести регистрацию импульсных сигналов в высокочастотном (HF) и сверхвысокочастотном (UHF) диапазонах частот.
- Для проведения геометрической локализации места возникновения частичных разрядов внутри бака необходима дополнительная информация о частичных разрядах, зарегистрированная при помощи ультразвуковых акустических датчиков.
- Необходима информация о температуре и нагрузке трансформатора, поскольку эти параметры влияют на интенсивность частичных разрядов.

4.2.5.2. Эти исходные для проведения экспертной оценки первичные данные регистрируются в системе TDM в нескольких взаимосвязанных модулях:

- Модуль M0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам, измерение температур верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора.

- Модуль М4 – регистрация частичных разрядов в высокочастотном (HF) диапазоне частот.
- Модуль М4.1 – синхронная регистрация частичных разрядов в баке трансформатора в сверхвысокочастотном (UHF) диапазоне частот.
- Модуль М6 – регистрация частичных разрядов в ультразвуковом диапазоне частот при помощи акустических датчиков.

4.2.5.3. На программном уровне III (АРМ подстанции) при помощи экспертной программы проводятся дополнительная фильтрация помех, разделение и выявление дефектов, оценка прогнозного влияния частичных разрядов на дальнейшую работу трансформатора.

При помощи этой математической модели также проводится оценка корреляции полученных диагностических результатов с результатами контроля растворенных газов в масле, полученных от внешнего прибора.

4.2.6. Модель «Комплексный анализ растворенных газов и частичных разрядов»

Эта математическая модель позволяет разделить частичные разряды во вводах и частичные разряды в баке трансформатора.

Модель включается в работу в том случае, когда по итогам работы модели анализа растворенных газов в масле и (или) модели анализа частичных разрядов в изоляции будет диагностироваться наличие частичных разрядов в трансформаторе.

4.2.6.1. Для работы модели нужны все исходные параметры, которые необходимы для работы моделей 4.2.3. и 4.2.5.

4.2.6.2. Исходные данные для работы модели получаются из:

- Внешнего прибора контроля концентрации растворенных газов в масле бака трансформатора.
- Модуля М0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам, измерение температур верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора.
- Модуля М4 – регистрация частичных разрядов в высокочастотном (HF) диапазоне частот.
- Модуля М4.1 – синхронная регистрация частичных разрядов в баке трансформатора в сверхвысокочастотном (UHF) диапазоне частот.
- Модуля М6 – регистрация частичных разрядов в ультразвуковом диапазоне частот при помощи акустических датчиков.

4.2.6.3. Математическая модель комплексного анализа растворенных газов и частичных разрядов работает на программном уровне III (АРМ подстанции).

4.2.7. Модель «Контроль состояния устройства РПН»

Это математическая модель единственного электромеханического элемента трансформатора, предназначенного для регулирования выходного напряжения под нагрузкой.

Модель предназначена для:

- 1 – Контроля количества коммутаций РПН по всем положениям.
- 2 – Контроля состояния электромеханического привода РПН.
- 3 – Оценки состояния РПН сравнением температур в баке трансформатора и РПН.
- 4 – Контроля вибрационных и акустических параметров РПН в процессе коммутаций.

4.2.7.1. Для работы математической модели контроля состояния РПН трансформатора необходимо наличие следующих данных:

- Текущее положение РПН.
- Ток электродвигателя в процессе коммутации.
- Вибрационные процессы в приводе РПН в процессе коммутации.
- Частичные разряды в баке РПН.
- Температура в баке трансформатора и в баке РПН.

4.2.7.2. Эти исходные для проведения экспертной оценки первичные данные регистрируются в системе TDM в модулях:

- Модуль М0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам, измерение температуры масла в баке трансформатора.
- Модуль М5 – регистрация положения РПН, тока электродвигателя и вибрации в процессе коммутации, частичных разрядов.

4.2.8. Модель «Анализ влияния импульсных перенапряжений»

В разработке.

4.2.9. Модель «Вибрационное состояние трансформатора»

В этой математической модели оценивается техническое состояние трансформатора по вибрационным сигналам, зарегистрированным на поверхности бака.

Контролируются следующие параметры трансформатора:

1 – Наличие механических дефектов и ослаблений в конструкции трансформатора, приводящие к повышению вибрации бака.

2 – Динамические и электромагнитные ударные процессы разной частоты, сопровождающие работу трансформатора.

3 – Ухудшение качества прессовки и крепления активных элементов трансформатора (обмоток, сердечника), способное привести к ограничениям в эксплуатации.

4.2.9.1. Для работы математической модели контроля вибрационного состояния трансформатора необходимо наличие следующих данных:

- Вибрационные сигналы с датчиков на поверхности бака трансформатора.
- Величина нагрузки трансформатора.
- Температура бака трансформатора.

4.2.9.2. Эти исходные для проведения экспертной оценки первичные данные регистрируются в системе TDM в модулях:

- Модуль M0 – регистрация токов нагрузки трансформатора по фазам, измерение температур верхних и нижних слоев масла в баке трансформатора.
- Модуль M7 – регистрация вибрационных сигналов с бака трансформатора.

4.2.9.3. Контроль качества прессовки активных элементов трансформатора (обмоток и сердечника) с использованием математической модели «вибрационное состояние трансформатора» производится на программном уровне III (АРМ подстанции).

4.2.10. Модель «Комплексный контроль основных параметров трансформатора»

Эта интегральная математическая модель оперативного контроля технического состояния трансформатора предназначена для использования с системами мониторинга минимальной конфигурации (и стоимости). Модель позволяет проводить оценку технического состояния трансформатора на основании анализа минимального объема первичной информации.

Модель «комплексный контроль основных параметров трансформатора» используется в том случае, когда необходимо оперативно смонтировать систему мониторинга и контролировать состояние трансформаторов, находящихся в тревожном или предаварийном состоянии. Это также важно и для старых трансформаторов, исчерпавших свой ресурс.

Целевая функция использования такой упрощенной комплексной системы мониторинга отличается от целевой функции систем мониторинга, которые монтируются на новых и хорошо работающих трансформаторах. Для критических трансформаторов не стоит вопрос поиска дефектных состояний, он уже присутствует, поэтому трансформатор и позиционируется как находящийся в критическом состоянии.

Поэтому основной задачей системы мониторинга, установленной на критическом трансформаторе, является оперативный контроль изменений технического состояния, определение критических временных параметров, когда трансформатор обязательно необходимо вывести из эксплуатации для проведения капитального ремонта и даже замены.

Алгоритмы такого управления эксплуатацией критических и имеющих большой срок эксплуатации трансформаторов реализованы в математической модели «комплексный анализ основных параметров трансформатора».

4.2.10.1. Обобщенная оценка трансформатора с использованием математической модели комплексного анализа состояния, по определению, может производиться с использованием практически любого набора данных. Очевидно, что чем больший объем информации будет сосредоточен в первичных данных, тем выше будет достоверность получаемых диагностических заключений.

В состав минимального набора первичной информации, обеспечивающего приемлемую для практики достоверность диагностических заключений, желательно включать не менее одного параметра, описывающего хотя бы четыре из пяти основных, наиболее важных подсистем трансформатора, приведенных ниже.

Это:

1 - Состояние изоляции трансформатора, наличие процессов старения и разрядных процессов. Наиболее эффективно это оценивать по концентрации характерных растворенных газов или по наличию частичных разрядов. С точки зрения оперативности и экономической эффективности использование метода контроля частичных разрядов предпочтительнее.

2 - Эффективность работы системы охлаждения трансформатора. Оценивается по разнице температур бака трансформатора и окружающей среды.

3 - Электрическая прочность масла в баке трансформатора. Лучше всего оценивается по влагосодержанию в масле бака трансформатора.

4 - Состояние высоковольтных вводов трансформатора. Оценка производится по токам проводимости изоляции вводов и производным от них.

5 - Общее техническое состояние конструкции трансформатора, качество крепления обмоток и сердечника. Техническое состояние и наличие динамических ударов в элементах конструкции лучше всего оценивается по вибрационным параметрам.

Если на ухудшение технического состояния трансформатора повлияли дефекты в других подсистемах, например, в РПН трансформатора, то в состав оборудования системы мониторинга необходимо включать модули, которые могут контролировать степень и скорость развития таких дефектов.

4.2.10.2. Исходные для проведения оперативной комплексной оценки состояния трансформатора регистрируются в системе TDM в модулях:

- В модуле M0 и других модулях системы TDM.

- В автономном комплексном модуле TDM-Oil, монтируемом внутри бака трансформатора. При помощи этого модуля контролируется влагосодержание в масле, температура бака, частичные разряды и вибрация.

4.2.10.3. Оперативная оценка технического состояния трансформатора с использованием математической модели «комплексный контроль состояния основных параметров изоляции» реализуется на программных уровнях II (модуль TDM-Oil), а если используется набор диагностических модулей TDM, то оценка производится на уровне III (APM подстанции).

4.2.11. Модель «Оптимальное управление системой охлаждения трансформатора»

Эта комплексная математическая модель системы охлаждения трансформатора, используемая в алгоритмах управления.

Основным отличием является оптимальное управление с учетом минимизации затрат на охлаждение и использование функции «прекуллинг» для снижения перегревов наиболее нагретых точек обмоток трансформатора.

Модель функционирует в составе систем управления охлаждением:

- TDM-TR для трансформаторов 110 кВ.

- TDM-TS для мощных силовых трансформаторов.

4.2.12. Модель «Комплексная оценка состояния трансформатора»

Реализуется на программном уровне III (APM подстанции).

4.2.13. Модель «Нагрузочная способность трансформатора»

Реализуется на программном уровне III (APM подстанции).

4.2.14. Модель «Оценка влияния состояния трансформатора на работу транзита»

Реализуется на программном уровне IV (APM энергопредприятия).

5. Выбор конфигурации системы TDM в зависимости от параметров трансформатора и задач, требующих решения

При выборе конфигурации системы TDM для организации мониторинга силовых трансформаторов необходимо ориентироваться на информацию, приведенную в таблице.

№	Проблема трансформатора	Модули системы TDM										TDM-TS	TDM-Oil	ХАРГ			
		M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9				M10		
1	Отклонение параметров вводов трансформатора	+			+												
2	Разряды и перегревы внутри бака трансформатора	+	+			+									+	+	
3	Повышенные концентрации газов в масле	+				+									+	+	
4	Повышенное влагосодержание в масле	+													+	+	
5	Проблемы, связанные с работой РПН	+					+										
6	Повышенный общий нагрев бака трансформатора	+	+			+		+					+	+	+		
7	Проблемы с элементами системы охлаждения	+	+										+				
8	Повышенная вибрация бака трансформатора	+							+						+		
9	Протекание через трансформатор токов КЗ	+		+					+			+					
10	Наличие в сети ВЧ импульсных перенапряжений	+								+							
11	Работа трансформатора не в номинальном режиме	+	+	+					+		+	+					

В состав таблицы включены все модули системы TDM, система охлаждения трансформатора TDM-TS (TDM-TR), дополнительный модуль TDM-Oil, устанавливаемый внутри бака трансформатора, и внешний прибор (ХАРГ) для контроля концентрации растворенных газов в масле.