

ООО ДИМРУС

**СТРУКТУРА ЭКСПЕРТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ,
РЕАЛИЗОВАННЫХ В СИСТЕМЕ TDM**

ПЕРМЬ

Оглавление

0. Параметрические и экспертные математические модели, используемые в системе TDM для оценки технического состояния трансформатора	3
0.1. Параметрическая диагностика технического состояния силового трансформатора.....	3
0.2. Экспертная оценка с использованием диагностических математических моделей.	4
0.3. Математические модели, используемые в составе экспертного ядра программного обеспечения системы мониторинга марки TDM.	4
1. Параметрические модели TDM для контроля эксплуатационных параметров трансформатора	5
1.1. Контроль коэффициента нагрузки трансформатора.	6
1.2. Контроль временных перенапряжений в питающей сети.	6
1.3. Расчет электрических параметров трансформатора.	7
1.4. Контроль температурных параметров трансформатора.....	7
2. Диагностические модели для расчета дополнительных параметров трансформатора	7
2.1. Анализ сочетаний концентраций растворенных в масле газов.	8
2.2. Математическая модель температурного старения изоляции трансформатора.	9
2.2.1. Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора.	9
2.2.2. Определение скорости старения и остаточного ресурса изоляции.....	10
2.2.3. Оценка допустимой нагрузочной способности трансформатора.	10
2.3. Математическая модель влияния влаги в баке на состояние изоляции трансформатора.	11
2.3.1. Определение влагосодержания в масле и в твердой изоляции обмоток трансформатора.	12
2.3.2. Математическая модель образования пузырьков пара внутри слоев обмотки.....	12
2.3.3. Расчет температуры точки росы в баке трансформатора.	13
3. Экспертные модели расчета коэффициентов технического состояния отдельных подсистем	14
3.1. Контроль технического состояния высоковольтных вводов трансформатора.	14
3.2. Анализ работы устройства РПН трансформатора, оценка технического состояния.	15
3.3. Оценка технического состояния системы охлаждения трансформатора.	16
3.4. Контроль состояния изоляционной системы трансформатора по частичным разрядам.	16
3.5. Регистрация высокочастотных импульсных перенапряжений в питающей сети.	18
3.6. Контроль деформаций формы обмоток трансформатора по величине Z_k	18
3.7. Контроль состояния конструкции трансформатора по вибрации.	19
4. Расчет итогового коэффициента текущего технического состояния трансформатора	20
4.1. Учет влияния трендов и скачков первичных параметров на коэффициенты технического состояния локальных подсистем трансформатора.	20
4.2. Комплексная модель для расчета итогового коэффициента текущего технического состояния.	21
5. Динамическая математическая модель трансформатора для оценки остаточного ресурса и планирования сервисных и ремонтных работ	22
5.1. Особенности создания динамической цифровой модели силового трансформатора.	23
5.2. Определение остаточного ресурса силового трансформатора и планирование сроков проведения сервисных и ремонтных работ.	24
6. Программный симулятор экспертного ядра марки TDM-Эксперт	24

0. Параметрические и экспертные математические модели, используемые в системе TDM для оценки технического состояния трансформатора

Оценка технического состояния силовых трансформаторов, как и любого другого высоковольтного электротехнического оборудования, в системах мониторинга производится на основании комплексного использования двух типов диагностики:

- Параметрической диагностики, основанной на сравнении измеренных значений эксплуатационных параметров с их нормированными значениями, заданными для данного типа оборудования и доступных для измерения. Используемые в этом типе диагностики первичные параметры силового трансформатора должны контролироваться с применением метрологически поверенных измерительных приборов. Параметрическая диагностика наиболее проста для практического использования, но ограничена по набору доступных параметров.

- Экспертный анализ величин эксплуатационных и расчетных параметров и их сочетаний, для которых не разработано нормированных значений. Этот тип диагностики более сложен для практического применения, так как требует использования специализированных математических моделей (формализованных алгоритмов), описывающих совокупность признаков возникновения дефектных ситуаций. Большинство первичных параметров, используемых в таких моделях, носят индикаторное значение, так как более важным является их взаимное сочетание. Поэтому используемые для их контроля измерительные каналы достаточно просто калибровать после изготовления. Основной проблемой использования экспертной диагностики является то, что создание информативных математических моделей является сложной задачей.

Сбалансированное сочетание результатов работы этих двух дополняющих друг друга типов диагностики позволяет достаточно корректно оценивать текущее техническое состояние контролируемого трансформатора.

Третий тип диагностики технического состояния силового трансформатора, используемых в системах мониторинга, предназначен для прогнозирования развития технического состояния трансформатора на будущих этапах его работы и формирования рекомендаций по эффективному управлению эксплуатацией. Основой для такой диагностики служат алгоритмы предиктивной аналитики, позволяющие рассчитывать не только величину остаточного ресурса контролируемого трансформатора, но и определять оптимальные сроки проведения сервисных и ремонтных работ.

0.1. Параметрическая диагностика технического состояния силового трансформатора.

Параметрическая диагностика технического состояния трансформатора является наиболее простой и распространенной для практического применения. Она всегда используется в системах диагностического мониторинга силовых трансформаторов, так как базируется на простом сравнении измеренных значений эксплуатационных параметров с заданными пороговыми значениями этих параметров.

Алгоритмы параметрической диагностики в системах мониторинга силовых трансформаторов чаще всего используются для контроля:

- Электрических параметров трансформатора: различных токов, напряжений, мощностей, сопротивлений.
- Температурных режимов работы трансформатора, связанных с технологическими режимами и работой системы охлаждения.
- Концентраций отдельных характерных газов и их сочетаний в хроматографии.

По итогам проведения оперативной параметрической диагностики контролируемый трансформатор диагностическим (программным) ядром системы мониторинга однозначно относится к одной из трех стандартной категории качества: «нормальное состояние», «ухудшенное состояние» или «предавварийное состояние».

Из-за использования жесткой пороговой амплитудной формализации значений параметров результаты проведения параметрической диагностики обычно имеют недостаточную диагностическую адаптивную информативность, так как показывают наличие уже развитых дефектов.

Вторым, еще более значимым недостатком параметрической диагностики, является ограниченное количество эксплуатационных параметров трансформатора, особенно в режиме онлайн, для которых имеется общепринятое нормирование, в результате чего получаемые диагностические заключения чаще всего не носят комплексного характера.

0.2. Экспертная оценка с использованием диагностических математических моделей.

Максимальное значение для оценки текущего и прогнозного технического состояния силовых трансформаторов в режиме мониторинга имеет использование экспертных диагностических моделей, описывающих как отдельные подсистемы трансформатора, так и его комплексное состояние.

В отличие от параметрической диагностики, констатирующей только факт перехода технического состояния трансформатора (чаще всего его отдельной подсистемы) из одной категории качества в другую, экспертная диагностика, основанная на использовании математических моделей, ориентирована на максимально раннее выявление признаков дефектных состояний, которые (в будущем) могут перевести трансформатор в другую категорию качества.

В системах мониторинга силовых трансформаторов используются два типа математических моделей, различающихся видом диагностических алгоритмов, положенных в основу:

- Математические модели, созданные на основе общепринятых и нормализованных алгоритмов, описывающих работу той или иной подсистемы трансформатора. К ним относятся модели, описывающие расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, остаточного ресурса изоляции, температуры точки росы и т.д.
- Уникальные математические модели, создаваемые для различных подсистем трансформатора, не имеющие стандартизированного математического описания. Чаще всего это математические модели, описывающие техническое состояние высоковольтных вводов трансформатора, состояние устройств РПН, учитывающие наличие и особенности проявления частичных разрядов в изоляции и т.д. Уникальность этих математических моделей заключается в том, что каждый изготовитель системы мониторинга разрабатывает эти модели самостоятельно, используя имеющиеся знания и возможности специалистов-экспертов.

К уникальным математическим моделям системы диагностического мониторинга TDM также относится и адаптивный комплексный цифровой двойник трансформатора, используемый в экспертном ядре программы мониторинга для прогнозирования изменения технического состояния, которое будет происходить на будущих этапах эксплуатации. При помощи этой математической модели осуществляется планирование ремонтных и сервисных работ.

0.3. Математические модели, используемые в составе экспертного ядра программного обеспечения системы мониторинга марки TDM.

Конструктивно система мониторинга марки TDM является комплексной и состоит из набора диагностических модулей, включаемых в состав технических средств на заводе в соответствии с требованиями Заказчика. В результате количество эффективно работающих экспертных математических моделей в каждой конкретной реализации системы получается разным, что определяется использованием различного набора первичных параметров. Чем больше регистрируется первичных параметров (значимых для проведения диагностики), тем выше будет итоговая информативность работы экспертного ядра и всей системы диагностического мониторинга.

Для оценки текущего технического состояния и управления эксплуатацией контролируемого силового трансформатора в системе диагностического мониторинга марки TDM запрограммированы и могут быть практически реализованы все математические модели, предусмотренные документом STO_56947007-29.200.10.011-2008, изменения от 12.12.2019 для реализации АСМД, а также ряд дополнительных математических моделей, разработанных сотрудниками фирмы ДИМУС.

Выбирая при заказе системы мониторинга различный набор диагностических модулей TDM и дополнительных приборов, пользователь может заранее планировать ожидаемый экспертный уровень получаемых диагностических заключений, ориентированных на контроль текущего технического состояния отдельных подсистем и всего трансформатора.

Чем больше первичных диагностических модулей и дополнительных приборов будет включено в состав программного обеспечения системы мониторинга, тем более полными и достоверными будут ее комплексные диагностические заключения.

Итогом работы экспертного ядра системы мониторинга TDM всегда являются автоматически сформированные программным обеспечением (в виде готового отчетного документа) практические рекомендации по текущему техническому состоянию и оптимальному управлению эксплуатацией трансформатора.

В таблице 0.1. приведен полный перечень 22 математических моделей, которые встроены в экспертное ядро системы мониторинга марки TDM. Источниками информации для работы всех параметрических и экспертных моделей служат выходные сигналы из 10 диагностических модулей

системы марки TDM и (или) от дополнительных диагностических приборов и устройств, подключаемых к системе TDM с использованием различных интерфейсов связи.

Таблица 0.1.

№	Модель	Модули системы TDM										Доп. пр.
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	
1. Параметрические модели для контроля эксплуатационных параметров												
1.1.	* Контроль коэффициента нагрузки трансформатора				+							
1.2.	* Временные превышения питающего напряжения			+								
1.3.	* Расчет мощностей трансформатора											+
1.4.	Контроль температурных параметров		+									
2. Диагностические модели для расчета дополнительных параметров трансформатора												
2.1.	* Анализ сочетаний концентраций характерных газов	+										+
2.2.	* Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки	+			+							
2.3.	* Расчет остаточного ресурса твердой изоляции обмоток	+			+							+
2.4.	* Расчет допустимой нагрузочной способности тр-ра	+			+							
2.5.	* Определение влагосодержания в твердой изоляции	+										+
2.6.	* Модель образования пузырьков пара в масле бака	+										+
2.7.	* Модель расчета температуры точки росы в масле бака	+			+							
3. Экспертные модели расчета технического состояния отдельных функциональных подсистем												
3.1.	* Контроль параметров технического состояния вводов	+			+							
3.2.	* Анализ работы устройства РПН, диагностика дефектов						+					
3.3.	* Оценка состояния системы охлаждения и ее элементов		+									
3.4.	* Контроль состояния изоляции по параметрам ЧР					+		+				
3.5.	Импульсные перенапряжения в питающей сети									+		
3.6.	Контроль деформаций обмоток по величине Zk											+
3.7.	Контроль состояния конструкции по вибрации									+		
4. Комплексная экспертная модель для расчета текущего технического состояния трансформатора												
4.1.	* Модель комплексного технического состояния	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4.2.	Учет влияния трендов расчетных параметров	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
5. Цифровая динамическая модель для планирования сервисных и ремонтных работ												
5.1.	Адаптивная цифровая модель трансформатора	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
5.2.	Определение остаточного ресурса трансформатора	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Математические модели, отмеченные в таблице символом (*), используются в экспертной системе TDM в соответствии с действующим СТО на системы мониторинга силовых трансформаторов и базируются на известных диагностических алгоритмах, на которые есть ссылки в соответствующих разделах данного документа.

Остальные математические модели экспертного ядра системы мониторинга TDM являются уникальными, они были дополнительно разработаны сотрудниками фирмы ДИМУС для получения расширенных диагностических заключений системы.

1. Параметрические модели TDM для контроля эксплуатационных параметров трансформатора

Параметрическая диагностика силовых трансформаторов строится на контроле и сравнительном анализе значений эксплуатационных параметров, для которых разработаны нормы и пороговые значения. После сравнения текущих значений параметров с заданными пороговыми значениями силовой трансформатор безальтернативно относится к одной из трех стандартных категорий технического состояния: «нормальное», «ухудшенное» или «предаварийное» состояние. Как правило, эти нормированные параметры трансформатора можно легко контролировать при помощи достаточно простых измерительных приборов.

В современных интеллектуальных системах мониторинга силовых трансформаторов, оснащаемых расширенным набором экспертных и прогнозных алгоритмов, параметрическая диагностика также применяется, но ее роль в итоговых заключениях стала гораздо менее значимой.

Причин такого смещения диагностических акцентов в системах мониторинга при оценке текущего технического состояния силовых трансформаторов и формировании рекомендаций по управлению эксплуатацией несколько, но наиболее важными являются следующие четыре:

- Существует ограниченное количество известных и реально значимых нормированных параметров трансформатора, которые, к сожалению, не полностью отражают все аспекты технического состояния контролируемого оборудования.
- Значительная часть известных нормированных параметров уникальна для разных типов трансформаторов и их отдельных элементов, например, видов систем охлаждения, типов высоковольтных вводов, конструкции переключателей устройств и т. д. Эта достаточно сложная вариативность усложняет практическое использование параметрической диагностики.
- Часть нормированных параметров, величина которых реально связана с техническим состоянием трансформатора, нельзя или очень сложно контролировать в трансформаторе, находящемся под рабочим напряжением. Это исключает возможность использования этих параметров в системах непрерывного мониторинга.
- Зарегистрированное пороговое превышение нормированного параметра в процедуре диагностики однозначно отражает переход трансформатора из одной категории качества в другую. Это не всегда удобно для эксплуатационного персонала, особенно когда происходит переход трансформатора из «ухудшенного» в «предаварийное» состояние, и когда уже нет времени для подготовки к ремонту, а трансформатор обязательно необходимо выводить из эксплуатации.

В системе TDM параметрическая диагностика используется не только как отдельный элемент оценки технического состояния трансформатора, но и как источник дополнительной исходной информации для работы более сложных математических моделей и экспертных алгоритмов. Целью работы этих диагностических алгоритмов является не только оперативная оценка текущего технического состояния трансформатора, но и прогнозирование возможности и сроков его дальнейшей безаварийной эксплуатации.

1.1. Контроль коэффициента нагрузки трансформатора.

Для расчета текущего коэффициента нагрузки трансформатора в программе используется простейшая математическая (расчетная) модель.

Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
Номинальный ток, А I_N → Потребляемый ток, А I_T →	Расчет относительного коэффициента нагрузки трансформатора	K_n

По сути, здесь просто используется только одна расчетная формула. Она приведена здесь в качестве математической модели только потому что этого требуют существующие руководящие документы по созданию систем мониторинга силовых трансформаторов, в которых эта формула названа отдельной математической моделью.

1.2. Контроль временных перенапряжений в питающей сети.

Для учета перенапряжений в питающей сети также используется простая параметрическая (пороговая) математическая модель (по ГОСТ 1516.3, Приложение Б).

Эта математическая модель базируется на регистрации первичных трехфазных напряжений, контролируемых при помощи модуля М2, подключенного к нулевому модулю системы мониторинга TDM.

Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
Напряжение фазы А, В U_A → Напряжение фазы В, В U_B → Напряжение фазы С, В U_C →	Определение времени возникновения в сети перенапряжений, их амплитуды и длительности	$t, \Delta U, \Delta t$

Эти выходные параметры модели могут быть использованы в дальнейшем при анализе признаков возникновения дефектных состояний, которые могут быть диагностированы в изоляционной системе контролируемого трансформатора в процессе дальнейшей эксплуатации.

По сути, это тоже не математическая модель подсистемы трансформатора в классическом ее понимании, реально это стандартный монитор непрерывного контроля величины питающего напряжения в питающей сети (регистратор перенапряжений питающей сети). Эта функция приведена здесь в виде реализованной математической модели только также в соответствии с требованиями существующих нормативных документов.

1.3. Расчет электрических параметров трансформатора.

Весь расчет электрических параметров трансформатора производится при помощи дополнительного прибора ПАРМА, подключенного к нулевому модулю системы мониторинга TDM. Данный метрологически сертифицированный модуль специально предназначен для этой цели.

Входные параметры		Математическая модель	Выходной параметр	
Напряжения и токи обмотки ВН	U_I, I_I →	Контроль напряжений, токов, расчет мощностей в обмотках трансформатора	→	P, Q, S, φ
Напряжения и токи обмотки СН	U_I, I_I →			
Напряжения и токи обмотки НН	U_I, I_I →			

Эти режимные эксплуатационные параметры, используемые в системе мониторинга TDM, могут быть применены в дальнейшем при проведении анализа причин появления различных признаков дефектных состояний в подсистемах контролируемого трансформатора в процессе дальнейшей его эксплуатации.

1.4. Контроль температурных параметров трансформатора.

Эта математическая модель предназначена для контроля и пороговой оценки технического состояния трансформатора по температурным параметрам.

Исходная информация для работы данной диагностической подсистемы берется из модулей M0, M1 и M9 системы TDM, в зависимости от того, какие есть в наличии.

Возможно использование информации и от других систем температурного контроля. Если на трансформаторе смонтирована и подключена к системе TDM дополнительная оптоволоконная система контроля температуры наиболее нагретой точки, то в системе мониторинга регистрируется и используется эта важная информация.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр	
M0	Температура бака, град	Контроль температурных режимов работы трансформатора	→	ΣT_I
M1	Температура воздуха, град			
M9				

При помощи этой математической модели контроля и сравнения эксплуатационных параметров реализуется классическая пороговая параметрическая диагностика технического состояния трансформатора.

Полученная информация используется (может быть использована при наличии соответствующего технического модуля) для управления системой охлаждения трансформатора и в более сложных математических моделях оценки технического состояния трансформатора.

2. Диагностические модели для расчета дополнительных параметров трансформатора

В программном обеспечении системы мониторинга силовых трансформаторов марки TDM для проведения оперативной оценки текущего технического состояния кроме нормированных моделей параметрической диагностики используются еще четыре типа диагностических математических моделей, частично разработанных на основе имеющихся нормативных документов. Все наиболее сложные

комплексные математические модели были разработаны с использованием знаний и результатов работы практических экспертов.

Это:

- Формализованные математические модели, предназначенные для определения интегральных эксплуатационных параметров трансформатора, которые являются сложной функцией нескольких первичных параметров, измеряемых техническими средствами системы мониторинга. Такие модели имеют нормализованную структуру диагностических алгоритмов и обычно базируются на международных и отечественных стандартах и рекомендациях. Перечень и описание этих моделей приведены в разделе 2.

- Экспертные математические модели, при помощи которых рассчитывается текущее техническое состояние локальных подсистем трансформатора. Это, например, состояние устройства РПН, высоковольтных вводов, расчет остаточного ресурса твердой изоляции обмоток трансформатора на основе анализа частичных разрядов, состояние системы охлаждения и т. д. Эти модели чаще всего являются уникальными и большей частью разработаны практическими экспертами. Описание этих диагностических моделей подсистем приведено в разделе 3.

- Комплексная экспертная математическая модель расчета интегрального коэффициента текущего технического состояния трансформатора $K_{ТТС}$, учитывающая результаты параметрической диагностики и техническое состояние всех локальных подсистем трансформатора, а также скорости их изменения во времени. В основе итогового расчета коэффициента $K_{ТТС}$ каждый раз лежит уникальный набор весовых коэффициентов, учитывающих технологическую и диагностическую значимость отдельных подсистем трансформатора. Такая комплексная модель является уникальной, так как учитывает не только технологическую значимость отдельных подсистем трансформатора, но и технические особенности каждой системы диагностического мониторинга. Более подробно эта математическая модель описана в разделе 4.

- Динамическая цифровая модель трансформатора (цифровой двойник трансформатора), автоматически создаваемая в экспертном программном обеспечении системы TDM на основе анализа имеющейся базы данных первичной и аналитической обработанной информации. Результатом работы этой динамической экспертной модели в программном обеспечении является определение остаточного ресурса контролируемого трансформатора и оперативное планирование объемов и сроков проведения ремонтных и сервисных работ. Особенности создания адаптивной динамической модели трансформатора приведены в разделе 5.

В экспертном ядре программного обеспечения системы марки TDM, предназначенной для мониторинга силовых трансформаторов, реализовано несколько различных диагностических математических моделей, относящихся к этим группам. Основная информация об особенностях создания и работы этих экспертных моделей приведена ниже в соответствующих разделах данного описания программного обеспечения системы мониторинга трансформаторов TDM.


В текущем разделе 2 приведено краткое описание математических моделей, предназначенных для определения интегральных эксплуатационных параметров трансформатора и соответствующих коэффициентов технического состояния подсистем трансформатора, которые являются сложной функцией нескольких первичных параметров.

2.1. Анализ сочетаний концентраций растворенных в масле газов.

В состав поставки технических средств системы диагностического мониторинга марки TDM стандартно не входит анализатор концентраций растворенных газов в масле бака трансформатора. В каждом конкретном случае создания системы мониторинга Заказчик сам оценивает необходимость использования такого специализированного устройства, выбирает его марку и фирму производителя. Наиболее значимыми параметрами для такого выбора являются количество контролируемых газов и цена устройства.

Анализатор концентраций растворенных газов устанавливается рядом с трансформатором или непосредственно на его баке. При помощи внешнего интерфейса передачи информации о зарегистрированных концентрациях растворенных газов такой прибор обычно включается в систему АСУ-ТП. В качестве интерфейса передачи информации используется промышленный изолированный интерфейс марки RS-485, которого вполне достаточно для передачи небольшого объема данных.

При использовании системы диагностического мониторинга TDM анализатор концентраций растворенных газов в масле информационно подключается к диагностическому модулю МО, в котором производится анализ соотношений концентраций характерных газов для выявления признаков дефектных состояний при помощи стандартного документа СТО 34.01-23-003-2019.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
Внешние приборы +МО	Концентрации растворенных газов (до 8) в масле бака трансформатора T_I → Влажосодержание в масле бака трансформатора T_I →	Выявление признаков дефектных состояний по СТО 34.01-23-003-2019 Определение коэффициента текущего технического состояния трансформатора на основании анализа концентраций характерных газов	 $K_{ТТС-КГ}$

Стационарные газоанализаторы различных марок, обычно используемые для контроля концентраций газов и работающие совместно с системой TDM, контролируют уникальные наборы газов, растворенных в масле бака трансформатора. По этой причине экспертная математическая модель, при использовании ее для разных приборов, должна при настройке системы автоматически модифицироваться, чтобы в дальнейшем при анализе использовались только практически доступные диагностические правила.

Для этой цели в базе данных экспертной программы системы TDM хранится необходимая информация по техническим параметрам анализаторов растворенных газов в масле бака трансформатора, используемых совместно с системой мониторинга. При настройке экспертной программы TDM пользователю необходимо только выбрать используемый с системой мониторинга прибор контроля газов, при этом автоматически будут задействованы только те диагностические правила, для которых будет достаточно исходной информации (по доступным значениям концентраций газов и влажосодержанию в масле).

2.2. Математическая модель температурного старения изоляции трансформатора.

В основе модели температурного старения изоляции трансформатора лежит температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора. Эта температура является очень важным диагностическим параметром, так, практически только от нее зависят скорость износа и остаточный ресурс бумажной изоляции обмоток трансформатора.

В реальных системах диагностического мониторинга силовых трансформаторов используются два варианта контроля этого параметра:

- Прямое измерение температуры изоляции при помощи специализированных приборов в точках обмотки, где ожидается максимальный нагрев изоляции. Для решения достаточно сложной задачи измерения температуры обмотки, находящейся под высоким рабочим напряжением, используются оптоволоконные датчики, имеющие высокую изоляционную стойкость.
- В системах мониторинга температура наиболее нагретой точки обмотки может определяться расчетным путем на основании измеренных значений температуры верхних слоев масла в баке и рабочей нагрузки трансформатора. Хотя получаемые в этом случае результаты являются менее точными по сравнению с прямым измерением, такой метод используется максимально часто. Основной причиной этого является то, что системы прямого измерения температуры наиболее нагретой точки имеют высокую стоимость и должны монтироваться внутри обмотки на этапе производства на заводе-изготовителе трансформатора.

В системе мониторинга марки TDM предусмотрена возможность реализации обоих методов определения температуры наиболее нагретой точки обмотки.

- Если на контролируемом трансформаторе уже смонтированы оптоволоконные датчики, то измерительный прибор этой системы контроля температуры подключается непосредственно к модулю М9 системы мониторинга, и в дальнейших диагностических расчетах используется максимальное измеренное значение температуры.
- Если таких датчиков в обмотках трансформатора нет, то температура наиболее нагретой точки обмотки определяется расчетным путем в соответствии с рекомендациями МЭК 60076-7-2018.

Полученное значение температуры наиболее нагретой точки обмотки используется при анализе технического состояния изоляции трансформатора.

2.2.1. Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора.

Для расчетного определения температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора используется математическая модель, соответствующая МЭК 60076-7-2018.

Полученная в результате работы данной математической модели расчетная величина максимальной температуры обмотки не имеет самостоятельного диагностического значения. Этот важный эксплуатационный параметр предназначен для использования в работе других экспертных математических моделей, ориентированных на расчет остаточного ресурса изоляционной системы трансформатора и расчет оптимальных параметров управления эксплуатацией контролируемого трансформатора.

В таблице приведены исходные и выходные параметры системы мониторинга TDM для работы этой математической модели.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
М0 М3	Температура верхних слоев масла T_I → Нагрузка трансформатора K_H → Температура окружающей среды T_B → Параметры схемы замещения трансформатора P_K, P_X →	Расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора по МЭК 60076-7-2018	→ K_T

2.2.2. Определение скорости старения и остаточного ресурса изоляции.

Скорость износа изоляции определяется в соответствии с полученным расчетным значением температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора (МЭК 60076-7-2018).

Остаточный ресурс изоляции обмоток трансформатора определяется последовательным интегрированием износа изоляции на каждом временном этапе мониторинга параметров трансформатора.

Исходные и выходные параметры этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
М0	Температура наиболее нагретой точки обмотки T_{MAX} → Текущая наработка трансформатора T_H →	Расчетная модель на основе рекомендаций МЭК 60076-7-2018	→ $K_{TTC-ори}$

Остаточный ресурс изоляции обмоток трансформатора в системе мониторинга TDM определяется только для той расчетной точки обмотки, которая испытывает максимальные температурные воздействия.

В других точках обмоток трансформатора ресурс изоляции будет другим, большим, что происходит потому, что во всех других точках температурные нагрузки на изоляцию будут меньше.

Критической для возможности безаварийной эксплуатации трансформатора всегда является та точка обмотки, в которой расчетный остаточный ресурс изоляции является минимальным. В соответствие с этим практически целесообразно при оценке технического состояния всего трансформатора использовать минимальное значение остаточного ресурса изоляции, рассчитанное в наиболее нагретой точке обмотки.

2.2.3. Оценка допустимой нагрузочной способности трансформатора.

Этот расчетный эксплуатационный параметр показывает, какую допустимую дополнительную нагрузку (k уже имеющейся) можно подключить к трансформатору в данный момент: нагрузку, при которой все эксплуатационные параметры трансформатора (особенно температура наиболее нагретой точки обмотки) не превысят допустимых или номинальных значений (МЭК 60076-2,6).

Расчет допустимой нагрузочной способности трансформатора осуществляется при условиях окружающей среды, которые существуют на момент проведения расчетов. При других условиях внешней среды, например, при изменении ее температуры, расчет допустимой нагрузочной способности необходимо производить заново.

Исходные и выходные параметры этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
МО	<p>Текущая температура наиболее нагретой точки обмотки T_{MAX} →</p> <p>Текущая нагрузка трансформатора K_{H} →</p>	Расчетная модель на основе рекомендаций МЭК 60076-7-2018	→ $K_{\text{ТТС-НСТ}}$

При определенных параметрах окружающей среды, особенно при низких температурах воздуха, нагрузочная способность трансформатора может превышать номинальную. При этом токи в обмотках также могут быть выше номинальных. Возможность работы трансформатора в таких режимах должна рассматриваться только по согласованию с эксплуатационными службами.

2.3. Математическая модель влияния влаги в баке на состояние изоляции трансформатора.

Очень важным параметром для оценки технического состояния силового трансформатора является контроль наличия и анализ распределения влаги внутри бака в элементах изоляционной системы. Чем больше воды находится в трансформаторе, тем выше вероятность повреждения его изоляционной системы.

Обычная вода может существовать в баке трансформатора в нескольких формах, различающихся своими свойствами. Стандартными и наиболее часто упоминаемыми в литературе формами наличия воды в трансформаторе являются три:

- Свободная влага (вода), каким-либо образом попавшая внутрь бака, которая из-за своего большего, по сравнению с маслом, удельного веса обычно находится на дне бака. Это промежуточное состояние влаги, со временем она обязательно перейдет в твердую изоляцию обмоток трансформатора.
- Влага, растворенная в трансформаторном масле. Объем этой растворенной воды зависит от типа масла, текущей температуры трансформатора и общего количества воды в баке трансформатора и в твердой изоляции обмоток.
- Влага, сосредоточенная в твердой изоляции обмоток, в бумаге. Объем этой воды также является сложной функцией многих параметров контролируемого трансформатора. Следует заметить, что по объему влага, сосредоточенная в бумажной изоляции обмоток трансформатора, всегда максимальна.

В работающем трансформаторе эти три формы существования влаги стремятся находиться в уравновешенном состоянии, при необходимости с течением времени постепенно «мигрируя» из одной формы в другую.

Стационарные формы существования влаги в баке не являются безусловно опасными для работы трансформатора, его длительная и безаварийная работа возможна даже с очень большими объемами воды внутри бака.

Безусловно опасными для работы трансформатора являются две дополнительные формы существования воды в баке, которые в отличие от трех вышеописанных стационарных форм можно назвать динамическими или переходными. В эти формы может переходить влага при определенных сочетаниях конструктивных и эксплуатационных параметров трансформатора. Через некоторое время, секунды, может минуты, часы, или даже несколько суток, при определенных сочетаниях эксплуатационных параметров трансформатора вода из этих переходных форм всегда возвращается обратно в стационарные формы.

К переходным формам существования влаги в баке маслонаполненного силового трансформатора можно отнести две следующие:

- Дисперсная влага в масле бака, которая возникает при комплексном сочетании высоких концентраций растворенной влаги в масле, смене режима работы трансформатора и низкой температуре окружающей среды. Появление этой формы влаги в масле бака связывают со специфическим параметром «точка росы». При появлении в масле бака дисперсной формы влаги резко снижается электрическая прочность масла, что приводит к электрическим пробоям внутри и между обмотками трансформатора. Особенно опасна дисперсная форма влаги при включении в работу «холодного» трансформатора. При нагреве трансформатора дисперсная форма влаги переходит в растворенное состояние в масле.

- Парообразная форма существования воды, которая возникает в охлаждающих масляных каналах внутри обмотки при перегреве бумажной изоляции выше температуры кипения воды. Для возникновения такой парообразной формы, кроме достижения температуры кипения, необходимо наличие высоких концентраций влаги в бумажной изоляции обмоток. Опасность возникновения паров воды в охлаждающих каналах заключается в том, что возникающие пузырьки пара могут значительно сократить величину изоляционных промежутков между слоями обмотки, привести к их перекрытию и к аварийному выходу трансформатора из эксплуатации.

На основании всего вышесказанного нужно отметить, что математическая модель распределения влагосодержания в силовом трансформаторе должна не только корректно определять концентрации стационарных форм влаги (особенно в масле и в бумажной изоляции обмоток), но и максимально оперативно выявлять и оценивать возможность возникновения технических и режимных предпосылок к появлению наиболее опасных переходных форм существования воды в баке.

2.3.1. Определение влагосодержания в масле и в твердой изоляции обмоток трансформатора.


Корректное определение концентрации влаги внутри бака трансформатора является достаточно сложной технической задачей.

В настоящее время достаточно хорошо отработаны и широко применяются в системах мониторинга маслонаполненного оборудования датчики контроля влагосодержания в масле. Такие датчики обычно входят в состав приборов контроля концентраций растворенных газов в масле, так как такие датчики должны находиться внутри контролируемого масла, а внутренние рабочие объемы газоанализаторов всегда, так или иначе, должны быть соединены с внутренним объемом бака трансформатора с маслом.

Датчики контроля концентрации влаги в твердой изоляции обмоток трансформатора менее отработаны методически и конструктивно, они используются в системах мониторинга крайне редко, известны только единичные экземпляры и только в опытной эксплуатации.

Основным методом определения концентрации влаги в твердой изоляции обмоток трансформатора, используемым в составе систем диагностического мониторинга, является использование специализированной расчетной модели распределения влаги, основанной на использовании нахождения равновесного состояния концентраций влаги в масле и в твердой изоляции обмоток трансформатора.

Исходные и выходные параметры работы этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
Внешние приборы, МО	Влагосодержание в масле бака трансформатора H → Усредненная температура бака трансформатора T_B →	Модель расчета влагосодержания в твердой изоляции из условия равновесного содержания влаги в масле и в обмотках	 $K_{ТТС-ВТИ}$

Важное значение для работы этой диагностической модели имеет рабочая температура бака трансформатора, так как она значительно влияет на абсолютную растворимость воды в трансформаторном масле: чем выше будет температура трансформатора, тем больше будет растворимость воды в масле. Это приводит к тому, что при разном значении температуры масла в баке, зависящей от многих параметров, условия равновесного распределения влаги между маслом и твердой изоляцией будут различными.

Процесс перераспределения влаги между изоляционными подсистемами трансформатора (достижение равновесного состояния) может занимать достаточно длительное время, до нескольких недель. Это надо хорошо понимать и необходимо учитывать при расчете влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора. Для полного выравнивания концентраций влаги в масле и в твердой изоляции трансформатор должен достаточно долго отработать в примерно стационарном тепловом режиме.

2.3.2. Математическая модель образования пузырьков пара внутри слоев обмотки.

При определенных условиях эксплуатации трансформатора возможно закипание влаги, находящейся в твердой изоляции обмоток трансформатора, и кратковременный переход ее в парообразное состояние. Возникающие при этом пузырьки пара, поднимаясь вверх, могут уменьшить

эффективное изоляционное сечение вертикальных охлаждающих масляных каналов между слоями обмотки и между различными обмотками.

В самом критическом случае, когда возникнет интенсивное парообразование внутри обмоток трансформатора, что возможно при высокой концентрации влаги и высокой температуре наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, возникновение парообразования может привести к уменьшению электрической стойкости изоляционных промежутков и аварийному электрическому пробоя внутри обмотки (МЭК 60076-14).

Интенсивность процессов образования пузырьков пара в охлаждающих каналах в основном связана с концентрацией влаги в твердой изоляции. Температура возникновения пузырьков определяется температурой кипения воды, на которую оказывает влияние высота установки трансформатора над уровнем моря, т.е. она зависит от величины давления внутри бака трансформатора.

Исходные и выходные параметры этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
МО	Концентрации влаги в твердой изоляции $H_{ТИ}$ → Температура наиболее нагретой точки обмотки $T_{МАХ}$ → Параметры окружающей среды $T_{ОС}$ →	Определение температуры образования пузырьков пара по МЭК 60076-14	$K_{ТТС-опп}$

При помощи этой математической модели формируются эксплуатационные ограничения для возможных режимов работы контролируемого трансформатора, позволяющие избежать возникновения аварийных ситуаций.

2.3.3. Расчет температуры точки росы в баке трансформатора.

Это еще одна математическая модель, при помощи которой определяются ограничения по технологическим условиям эксплуатации трансформатора, связанными с влагосодержанием в масле и с параметрами окружающей среды.

Смысл физических процессов, описывающих особенности работы этой модели, следующий. Если температура работающего трансформатора быстро уменьшится (например, это может произойти при сбросе нагрузки или при выключении трансформатора, и низкой температуре окружающей среды), а интенсивность перехода растворенной влаги из масла в твердую изоляцию будет по каким-либо причинам низкой, то часть растворенной влаги из масла может перейти в мелкодисперсную фазу, т.е. выпасть в виде росы.

Опасность этого процесса заключается в том, что это будет происходить внутри всего объема масла и может привести к критическому уменьшению напряжения пробоя масла.

Исходные и выходные параметры математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
Внешние приборы +МО	Абсолютное влагосодержание в масле H_A → Коэффициенты Аррениуса масла в баке K_A →	Расчет температуры конденсации влаги	T_P

Вероятность выпадения росы в масле бака работающего трансформатора обычно очень мала, так как снижение температуры бака будет происходить медленно, система охлаждения будет продолжать работать, и большая часть избыточной влаги успеет постепенно перейти в твердую изоляцию обмоток трансформатора.

Самым опасным режимом, контролируемым в этой расчетной модели, является отключение «горячего» трансформатора при низкой температуре окружающей среды. Отключение системы

охлаждения трансформатора приведет к тому, что процесс перехода избыточной влаги из масла в твердую изоляцию прекратится, и она выпадет в масле в виде мелкодисперсной фазы. Если такой трансформатор будет без прогрева вводить в работу, то вероятность выхода его из строя достаточно велика.

Как уже указывалось выше, итогом работы этой экспертной математической модели является расчетное значение минимальной температуры бака работающего трансформатора, при снижении до которого возможно выпадение внутри объема масла избыточной влаги в виде росы, т.е. мелкодисперсной фазы. Это может привести к снижению электрической стойкости масла и к его пробую.

Если эта температура ниже или равна температуре окружающей среды, то эксплуатационный персонал должен принимать меры для исключения выпадения избыточной влаги (возникшей из-за снижения температуры масла, что приводит к уменьшению растворимости воды в масле), растворенной в масле, в виде росы.

3. Экспертные модели расчета коэффициентов технического состояния отдельных подсистем

В данном разделе приведено краткое описание особенностей работы и практического применения результатов экспертных математических моделей, при помощи которых в системе мониторинга TDM рассчитывается текущее техническое состояние локальных (отдельных) подсистем контролируемого трансформатора.

Все эти экспертные математические модели подсистем трансформатора являются уникальными и разработаны сотрудниками фирмы ДИМРУС.

Для возможности получения в дальнейшем интегрального коэффициента текущего технического состояния трансформатора $K_{ТТС}$ итоги работы всех экспертных математических моделей представлены в едином стиле в виде безразмерных коэффициентов текущего технического состояния наиболее значимых и важных подсистем трансформатора $K_{ТТС-ПТ}$.

Объединение результатов работы различных экспертных систем стало возможным в TDM благодаря тому, что различные математические модели были разработаны на основе использования общих технических средств регистрации первичных параметров трансформатора, единой базы данных и единых алгоритмов нормализации технического состояния и выходных заключений всех экспертных моделей.

3.1. Контроль технического состояния высоковольтных вводов трансформатора.

Необходимость обязательного включения в программное обеспечение системы мониторинга силовых трансформаторов математической экспертной модели контроля параметров, оценки технического состояния и выявления признаков различных дефектных состояний высоковольтных вводов обусловлено сравнительно высокой аварийностью этого важного элемента силового трансформатора.

Исходные и выходные параметры этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
МЗ МО	Токи проводимости вводов трансформатора I_I → Фазные напряжения от измерительного ТН U_I → Температура бака трансформатора T_B → Текущая нагрузка трансформатора K_H →	Контроль технического состояния вводов Выявление признаков дефектных состояний	→ $K_{ТТС-ВВ}$

Система контроля технического состояния и выявления признаков дефектных состояний, реализованная в системе мониторинга TDM, учитывает все наиболее важные технические и алгоритмические аспекты контроля высоковольтных вводов:

- В зависимости от параметров трансформатора на нем может быть установлено от трех до девяти высоковольтных вводов, у которых есть измерительный вывод и которые нуждаются в непрерывном контроле.
- Высоковольтные вводы современных силовых трансформаторов различаются типом внутренней изоляции, что требует несколько различных алгоритмов диагностики дефектов. Возможны даже ситуации, когда на одном трансформаторе будут смонтированы вводы с различным типом изоляции.
- В зависимости от возможности подключения к системе мониторинга напряжений от измерительного трансформатора ТН система TDM может рассчитывать абсолютные или относительные параметры вводов.
- При совместном контроле нескольких трехфазных групп высоковольтных вводов в экспертной математической модели системы мониторинга TDM реализуются сравнительные измерения вводов по фазам.
- Итогом работы экспертной модели является указание дефектного состояния, причина ухудшения параметров и степень развития дефектного состояния.

Контроль технического состояния высоковольтных вводов при помощи системы марки TDM может осуществляться параллельно с работой систем защиты вводов типа КИВ. Для этого в состав поставки технических средств системы мониторинга должен быть включен специальный блок изолирующих трансформаторов тока.

3.2. Анализ работы устройства РПН трансформатора, оценка технического состояния.

Оценка технического состояния устройства РПН силовых трансформаторов при помощи экспертной математической модели в системе TDM производится в несколько этапов, так как само устройство РПН, являясь отдельной функциональной подсистемой силового трансформатора, также состоит из нескольких локальных подсистем:

- Электромеханический ступенчатый привод переключателя положений, включающий в себя электродвигатель, редуктор, избиратель, а иногда и предизбиратель. Диагностика этой подсистемы устройства РПН производится на основании контроля мощности, потребляемой электродвигателем привода из сети. При этом дополнительно учитываются временные параметры работы привода, а также комплексные вибрационные процессы в приводе устройства РПН, происходящие в динамических режимах работы.
- Изоляционная система устройств РПН различного исполнения. Для контроля технического состояния изоляционной системы РПН используются датчики частичных разрядов и анализаторы концентрации характерных газов в масле бака РПН. Обычно этой информации достаточно для оценки технического состояния изоляции устройства РПН.

Исходные и выходные параметры этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
М5 Внешние приборы	Ток и мощность приводного электродвигателя РПН	T_I →	→ $K_{ТТС-РПН}$
	Положение избирателя РПН	T_I →	
	Газы, растворенные в масле бака РПН	G_I →	
	Вибрационные процессы в баке РПН	V →	
	Акустические частичные разряды в баке РПН	$ЧР$ →	

В соответствии с разработанной в TDM математической моделью сначала производится раздельная диагностика состояния подсистем устройства РПН, результаты которой интегрируются в единый коэффициент технического состояния $K_{ТТС-РПН}$ с учетом локальных весовых коэффициентов значимости этих подсистем.

Сложностью проведения комплексной (интегральной) диагностики технического состояния устройства РПН является то, что некоторые дефектные состояния в нем могут быть диагностированы в любых режимах работы переключателя, а некоторые могут проявляться только при нахождении избирателя в определенных положениях, в которых избиратель может никогда и не находиться в рабочих режимах.

Для проведения диагностики и оценки технического состояния устройства РПН в системе мониторинга силовых трансформаторов TDM может быть использован или диагностический модуль M5 стандартного размера, или внешний диагностический прибор марки LTC-Monitor, созданный на основе диагностического модуля марки M5.

3.3. Оценка технического состояния системы охлаждения трансформатора.

Система охлаждения силовых трансформаторов предназначена для «вывода» энергии потерь из бака трансформатора в окружающую среду с целью предотвращения перегревов внутренних критических элементов трансформатора.

В зависимости от мощности трансформатора система охлаждения имеет несколько различных вариантов технического исполнения и состоит из достаточно большого количества элементов, нуждающихся в контроле технического состояния.

Для комплексного контроля эффективности работы системы охлаждения трансформатора необходимо учитывать многие конструктивные, эксплуатационные и внешние параметры, от которых зависит эффективность работы системы охлаждения, а также контролировать маслонасосы и вентиляторы, включаемые и выключаемые в параллельную эксплуатацию по достаточно сложным и изменяемым законам управления.

Такое многообразие изменяемых параметров приводит к тому, что создать общую математическую модель системы охлаждения трансформатора практически невозможно. Если это все же удастся формализовать в виде единой модели, то наличие большого количества переменных нелинейных параметров приведет к значительному превышению необходимых затрат на использование такой модели над эффективностью получаемых заключений. Иначе говоря, экономическая эффективность использования такой подробной математической модели будет нулевой, если даже не отрицательной.

В системе TDM используется безразмерная математическая модель системы охлаждения трансформатора, которая базируется на контроле температурных режимов работы трансформатора в зависимости от нагрузки и параметров окружающей среды.

В течение достаточно длительного периода работы трансформатора (до полугода) встроенная экспертная система формирует коэффициенты этой модели на основе анализа работы трансформатора в различных условиях эксплуатации.

В дальнейшем, если реальные температурные режимы работы трансформатора будут хуже по сравнению с данными, полученными в результате работы модели, то это будет говорить об ухудшении работы системы охлаждения.

Исходные и выходные параметры этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
M1 M7 M0	Коэффициент нагрузки трансформатора K_H → Температура верхних слоев масла T → Температура окружающей среды T_{OCP} → Эксплуатационные параметры трансформатора P_{K3} → P_{XX} → Токи и вибрации маслонасосов I, V →	Расчет коэффициента текущего технического состояния системы охлаждения трансформатора Контроль технического состояния маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения	 $K_{TTC-CCO}$

Расчетный безразмерный коэффициент $K_{TTC-CCO}$ показывает текущее техническое состояние системы охлаждения в безразмерном виде.

3.4. Контроль состояния изоляционной системы трансформатора по частичным разрядам.

Практически все дефекты в высоковольтной изоляции сопровождаются появлением импульсов частичных разрядов с очень небольшой амплитудой в доли и единицы вольт. По мере развития дефектов в изоляции частичные разряды становятся интенсивнее и чаще, переходят в искровые, а на финальной стадии развития дефекта и в дуговые.

Корректная регистрация и анализ параметров частичных разрядов, проводимые современным измерительным оборудованием с эффективным подавлением помех, позволяют выявлять возникновение практически всех дефектов в высоковольтной изоляции на самых ранних стадиях их возникновения и развития.

Применительно к силовому трансформаторному оборудованию частичные разряды могут регистрироваться в баке в следующих случаях:


- При возникновении локальных и объемных дефектов в изоляции высоковольтных вводов. Особенно эффективно приходится проводить контроль частичных разрядов от локальных дефектов во вводах с RIP и RIN изоляцией, для которых уровень частичных разрядов достаточно часто является наиболее важным диагностическим параметром.
- Разрядные процессы разной интенсивности сопровождают дефекты нарушения изоляции между листами сердечника трансформатора. Удивительно, но достаточно часто сотрудникам ДИМРУС приходится регистрировать частичные разряды, возникающие при плохом креплении проводника заземления сердечника трансформатора к баку трансформатора.
- При помощи технических средств системы TDM частичные разряды регистрировались и в других местах в баке трансформаторов: в устройствах РПН, во внутренних экранах, на проводниках подключения вводов и т.д., но это происходило гораздо реже.

Регистрация частичных разрядов в силовых трансформаторах техническими средствами системы мониторинга TDM может производиться в различных частотных диапазонах: в ультразвуковом, высокочастотном и сверхвысокочастотном. Для каждого частотного диапазона в составе TDM предусмотрены соответствующие диагностические модули и измерительные датчики:

- Диагностический модуль M4 предназначен для регистрации импульсов частичных разрядов в ВЧ диапазоне частот.
- Модуль M4.1 позволяет регистрировать сверхвысокочастотные импульсы от частичных разрядов в баке трансформатора.
- При помощи диагностического модуля M6 в системе мониторинга марки TDM производится многоканальная регистрация импульсов частичных разрядов в ультразвуковом диапазоне частот, который позволяет проводить пространственную локацию точки возникновения частичных разрядов внутри бака трансформатора.

Использование каждого частотного диапазона для регистрации импульсов частичных разрядов имеет свои достоинства и недостатки, но это дополнительный и достаточно сложный вопрос.

Исходные и выходные параметры экспертной математической модели, предназначенной для анализа зарегистрированных импульсов частичных разрядов, приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
M4 M4.1 M6	Импульсы частичных разрядов от первичных датчиков PD_I → Эксплуатационные параметры трансформатора K_H → Параметры окружающей среды T_I →	Расчет технического состояния высоковольтной изоляции трансформатора по параметрам частичных разрядов Определение типов дефектов, выявленных по частичным разрядам, оценка степени их развития и опасности для эксплуатации	 $K_{TTC-ИЧР}$

Экспертная система анализа частичных разрядов позволяет:

- Оперативно выявлять наличие частичных разрядов в изоляции вводов и обмоток трансформатора, максимально достоверно отстраиваясь от импульсов помех.
- На основании анализа PRPD распределения импульсов частичных разрядов определять тип дефекта в изоляции, являющегося источником этих частичных разрядов.
- Оценивать скорость развития этих дефектов.

По результатам своей работы математической модели рассчитывается итоговый коэффициент текущего технического состояния изоляционной системы трансформатора, а также прогнозируется его изменение в процессе дальнейшей эксплуатации трансформатора с использованием трех расчетных комплексных диагностических параметров:

- Возникновение и наличие стационарных и нестационарных частичных разрядов в силовом трансформаторе, величина их интегральных параметров.
- Степень опасности выявленных в изоляции дефектов для текущей работы трансформатора.
- Скорость развития дефектов и связь их параметров с другими технологическими параметрами работы силового трансформатора.

По своим диагностическим свойствам и информативности экспертная система контроля технического состояния изоляции по частичным разрядам хорошо сочетается с системой анализа концентраций растворенных газов в масле. Эти две диагностические системы во многих случаях органично дополняют выходные заключения друг друга.

3.5. Регистрация высокочастотных импульсных перенапряжений в питающей сети.

В последнее время существенное влияние на эксплуатацию и повышенную аварийность различного высоковольтного оборудования, особенно силовых трансформаторов, стали оказывать высокочастотные импульсные перенапряжения в энергосистеме, количество и энергия которых становится все больше и больше.

Это влияние, с одной стороны, обусловлено увеличением количества таких импульсов из-за использования в энергосистемах специфического быстродействующего коммутационного оборудования, расположенного рядом с трансформаторами. С другой стороны, в современном высоковольтном электротехническом оборудовании все более широко стали использоваться изоляционные материалы, чувствительные к таким импульсам.

Исходные и выходные параметры для работы этой математической модели приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
M8 M3	Высокочастотные импульсы с измерительных выводов высоковольтных вводов трансформатора I_T → Напряжение ВН $U_{ВН}$ →	Регистрация импульсов высокочастотных перенапряжений	→ $K_{ТТС-ИПН}$

В состав технических средств системы мониторинга марки TDM входит специальный диагностический модуль M8, предназначенный для регистрации высокочастотных импульсов. По техническим решениям он близок к модулю M6, предназначенному для регистрации СВЧ импульсов частичных разрядов, но имеет более широкий диапазон амплитуд регистрируемых импульсов.

Информация о зарегистрированных системой мониторинга импульсах высокочастотных перенапряжений используется в качестве дополнительной информации при анализе технического состояния изоляционных систем трансформатора и выявлении причин появления признаков дефектных состояний.

Эта информация также может быть полезна другим электротехническим службам при анализе причин возникновения дефектных состояний в другом высоковольтном оборудовании, подключенном к этой системе шин.

3.6. Контроль деформаций формы обмоток трансформатора по величине Z_k .

Изменение геометрической формы обмоток трансформатора под воздействием сквозных токов короткого замыкания является опасным дефектом, так как приводит на поврежденных участках обмотки к уменьшению изоляционных промежутков внутри и между обмотками. При определенных сочетаниях геометрических и эксплуатационных параметров это может привести к замыканиям витков или даже слоев обмоток и к аварийному выходу силового трансформатора из строя.

В математической модели 3.7, описанной в следующем разделе, по параметрам вибрации контролируется величина осевого усилия прессовки обмоток. Эта прессовка выполняется с целью повышения электродинамической стойкости обмоток к сквозным токам короткого замыкания. Чем меньше будет это усилие, тем меньше будет и стойкость витков обмоток к воздействию межвитковых электродинамических усилий. С точки зрения возникновения дефектов эта математическая модель подсистемы трансформатора описывает потенциальную возможность возникновения изменений формы обмоток трансформатора.

В отличие от модели 3.7 данная математическая модель 3.6, основанная на контроле изменения параметра Z_k (приведенного сопротивления короткого замыкания трансформатора), позволяет выявлять уже возникшие нарушения геометрической формы обмоток, которые произошли при ослабленной осевой прессовке обмоток и больших электродинамических усилиях между витками и слоями при протекании через трансформатор токов сквозного короткого замыкания.

Для проведения расчетов параметров схемы замещения необходимо использовать информацию от измерительных трансформаторов тока и напряжения, позволяющих измерять электрические параметры обмоток с высокой точностью, с допустимым классом не хуже 0,2.

Информативный расчет параметра Z_k силового трансформатора может быть выполнен только в том случае, когда его обмотки соединены по схеме «звезда/звезда». При использовании смешанной схемы соединения обмоток типа «звезда/треугольник» проведение таких расчетов с целью выявления нарушений формы обмоток невозможно, так эта схема, по определению, предназначена для использования в генераторных трансформаторах для выравнивания нагрузки по фазам.

Исходные и выходные параметры математической модели расчета диагностического параметра Z_k приведены в таблице.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
M10, M2	Напряжения и токи обмоток трансформатора U_I I_I Электрические паспортные параметры трансформатора P_I Информации о протекании сквозных токов короткого замыкания I	Расчет параметров схемы замещения трансформатора	$K_{ТТС-Zk}$

Как уже указывалось выше, основной сложностью для практического использования этой математической модели является необходимость измерения электрических параметров обмоток с высокой точностью.

3.7. Контроль состояния конструкции трансформатора по вибрации.

В настоящее время при создании большинства систем диагностического мониторинга контролю вибрационных параметров трансформатора не уделяется должного внимания, хотя возможности этого универсального диагностического метода достаточно велики.

В экспертном ядре программного обеспечения системы мониторинга марки TDM на основании измерения и анализа вибрационных параметров трансформатора, зарегистрированных при помощи специализированных датчиков, смонтированных на поверхности бака, решаются две важные диагностические задачи:

- Производится комплексная оценка технического состояния элементов конструкции силового трансформатора, косвенно контролируется техническое состояние механических соединений различного типа. Появление любых зазоров и ослаблений в конструкции приводит к увеличению количества и амплитуды высокочастотных гармоник в спектрах вибрационных сигналов.
- Сравнивая вибрационные параметры фаз трансформатора в различных режимах нагрузки, экспертная система контролирует качество прессовки обмоток трансформатора. Чем сильнее будут запрессованы обмотки, тем выше будет стойкость трансформатора к протеканию через него сквозных токов короткого замыкания.

Модули	Входные параметры	Математическая модель	Выходной параметр
M7	Вибрационные сигналы от датчиков на поверхности бака трансформатора V_I Коэффициент нагрузки K_H	Математическая модель определения состояния конструкции по вибрационным параметрам Математическая модель оценки	$K_{ТТС-СКВ}$

	трансформатора	качества прессовки обмоток трансформатора по вибрационным параметрам	
--	----------------	--	--

Математические экспертные модели для расчета этих параметров разработаны сотрудниками фирмы ДИМУС. Они являются уникальными, не имеющими аналога при использовании в системах мониторинга силовых трансформаторов.

Результаты работы этих двух экспертных диагностических моделей участвуют в дальнейших расчетах текущего коэффициента комплексного технического состояния трансформатора $K_{ТТС}$ в виде обобщенного коэффициента $K_{ТТС-СКВ}$.

Максимальное количество универсальных датчиков вибрации, которое может быть подключено к диагностическому модулю М7, равняется 8. На практике количество используемых каналов может быть различным, оно зависит от мощности контролируемого трансформатора и потенциально решаемых задач:

- Для контроля качества прессовки обмоток трансформатора предполагается использовать 6 датчиков вибрации, располагаемых по три с каждой стороны трансформатора, примерно в середине фазных обмоток.
- Для контроля технического состояния конструкции трансформатора могут быть использованы сигналы, зарегистрированные с этих же датчиков. Если же предполагается контроль качества прессовки обмоток в системе мониторинга не производить, то для контроля состояния конструкции достаточно использования одного-трех датчиков вибрации. Это, в основном, зависит от габаритов бака контролируемого трансформатора.
- Оставшиеся свободные датчики вибрации могут быть смонтированы на маслососах системы охлаждения трансформатора. Контроль вибрации работающего маслососа является наиболее эффективным методом для оценки его технического состояния.

Распределение информационных сигналов от датчиков вибрации для использования в работе экспертных диагностических систем определяется техническим заданием на разработку системы мониторинга силового трансформатора.

4. 4. Расчет итогового коэффициента текущего технического состояния трансформатора

Расчетный итоговый коэффициент текущего технического состояния $K_{ТТС}$ в системе TDM описывает состояние силового трансформатора по итогам проведения экспертного анализа последнего замера первичных параметров, выполненного диагностическими модулями системы и с использованием дополнительных данных от приборов, подключенных к системе мониторинга.

Этот важный комплексный эксплуатационный коэффициент силового трансформатора формируется на основе совместного анализа двух групп аналитически обработанной информации, получаемой в процессе работы экспертного программного обеспечения системы TDM:

- Временных трендов и зарегистрированных скачков первичных и расчетных параметров трансформатора, выявленных экспертным ядром системы мониторинга по итогам анализа информации за предыдущий период эксплуатации. Здесь используется «информативно значимый период времени», например, время после последнего ремонтного воздействия.
- Комплекса значений локальных коэффициентов текущего технического состояния отдельных подсистем контролируемого трансформатора, полученных по итогам обработки информации последнего информативно значимого замера.

В соответствие с таким разделением исходной диагностической информации о состоянии трансформатора расчет текущего значения коэффициента $K_{ТТС}$ контролируемого трансформатора проводится в экспертном ядре системы мониторинга TDM в два этапа.

4.1. Учет влияния трендов и скачков первичных параметров на коэффициенты технического состояния локальных подсистем трансформатора.

В процессе работы трансформатора некоторые первичные параметры могут изменяться монотонно или скачком. Такие же изменения могут происходить и с расчетными коэффициентами технического состояния локальных подсистем трансформатора.

Появление таких трендов и скачков параметров обычно говорит о более ухудшенном техническом состоянии трансформатора по сравнению со случаем, когда трансформатор имел такие же значения расчетных коэффициентов, но они в процессе предшествующей эксплуатации были

постоянными в течение достаточно длительного времени. Говоря иначе, наличие трендов и скачков практически всегда говорит о наличии возникших и развивающихся дефектов, что, в конечном итоге, ухудшает прогноз для дальнейшей эксплуатации трансформатора.

В идеальном случае выявление скачков и трендов техническими и программными средствами системы мониторинга TDM практически всегда соответствует возникновению и развитию в контролируемом трансформаторе признаков каких-либо дефектных состояний. В соответствии с этим, их выявление экспертной системой должно приводить к качественному ухудшению значений коэффициентов текущего технического состояния соответствующих локальных подсистем трансформатора и всего трансформатора.

Для всех приведенных в предшествующих разделах математических экспертных моделях необходимо проведение расчета четырех динамических изменений параметров состояния:

- Скачок первичного параметра, участвующего в описании технического состояния контролируемой подсистемы трансформатора, превышающий заданное пороговое значение. Величина этого порогового значения задается в каждой математической модели и для каждого контролируемого параметра отдельно на интервале в один час.
- Временной тренд изменения локального коэффициента технического состояния локальной подсистемы трансформатора в «%» на интервале в одни сутки.
- Временной тренд изменения локального коэффициента технического состояния локальной подсистемы трансформатора в «%» на интервале в один месяц.
- Временной тренд изменения локального коэффициента технического состояния локальной подсистемы трансформатора в «%» на интервале в один год.

Для каждого сочетания диагностических параметров, участвующих в математических моделях в выявлении признаков возникновения и развития того или иного дефектного состояния, используются один или два (из приведенных выше четырех) динамических признака изменения технического состояния подсистемы трансформатора. Это связано с тем, что различные дефектные состояния возникают по-разному и имеют различную скорость развития.

Необходимо также учитывать, что большинство возникших дефектных состояний не только «просто» развиваются в процессе эксплуатации трансформатора, достаточно часто их развитие приводит к возникновению и развитию в трансформаторе новых, вторичных дефектов, которые могут быть еще более опасными. Эти дефекты при возникновении и развитии также ухудшают техническое состояние контролируемого трансформатора.

Для учета скачков и трендов первичных параметров трансформатора в экспертной системе TDM используются расчетные понижающие коэффициенты K_{CT} , предназначенные для коррекции значений, соответствующих K_{TTC} локальных подсистем трансформатора.

4.2. Комплексная модель для расчета итогового коэффициента текущего технического состояния.

После того, как при помощи экспертных математических моделей будет определено текущее техническое состояние локальных подсистем контролируемого трансформатора и учтено наличие в них трендов и скачков первичных параметров и расчетных коэффициентов, необходимо определить комплексный коэффициент текущего технического состояния K_{TTC} , рассчитанный по данным последней регистрации параметров трансформатора.

Этот коэффициент рассчитывается как сумма произведений расчетных коэффициентов технического состояния контролируемых локальных подсистем трансформатора на весовые коэффициенты, определяющие диагностическую значимость каждой подсистемы.

Итоговый коэффициент текущего технического состояния силового трансформатора рассчитывается на основании 18 локальных коэффициентов состояния подсистем и параметров, перечень которых приведен в таблице ниже:

1.1.	Коэффициент нагрузки		→	Математическая модель интеграции локальных коэффициентов технического состояния подсистем трансформатора с учетом индивидуальных	→ K_{TTC}
1.2.	Временные перенапряжения		→		
1.3.	Контроль токов мощностей		→		
1.4.	Контроль температурных режимов		→		
2.1.	Концентрации газов в масле	$K_{TTC-KG} * K_{B1} * K_{CT1}$	→		
2.2.1.	Темп. тах нагретой точки	$K_{TTC-TMH} * K_{B2} * K_{CT2}$	→		
2.2.2.	Остаточный ресурс изоляции	$K_{TTC-OP} * K_{B3} * K_{CT3}$	→		
2.2.3.	Нагрузочная способность тр-ра	$K_{TTC-HCT} * K_{B4} * K_{CT4}$	→		

2.3.1.	Влага в твердой изоляции	$K_{\text{ТТС-ВТИ}} * K_{\text{В5}} * K_{\text{СТ5}}$	→	весовых коэффициентов и наличия временных трендов
2.3.2.	Образование пузырьков пара	$K_{\text{ТТС-ОПП}} * K_{\text{В6}} * K_{\text{СТ6}}$	→	
2.3.3.	Расчет температуры точки росы	$K_{\text{ТТС-РТР}} * K_{\text{В7}} * K_{\text{СТ7}}$	→	
3.1.	Состояние высоковольтных вводов	$K_{\text{ТТС-ВВ}} * K_{\text{В8}} * K_{\text{СТ8}}$	→	
3.2.	Состояние устройства РПН	$K_{\text{ТТС-РПН}} * K_{\text{В9}} * K_{\text{СТ9}}$	→	
3.3.	Состояние системы охлаждения	$K_{\text{ТТС-ССО}} * K_{\text{В10}} * K_{\text{СТ10}}$	→	
3.4.	Состояние изоляции по ЧР	$K_{\text{ТТС-ИЧР}} * K_{\text{В11}} * K_{\text{СТ11}}$	→	
3.5.	Импульсные перенапряжения	$K_{\text{ТТС-ИПН}} * K_{\text{В12}} * K_{\text{СТ12}}$	→	
3.6.	Деформация обмоток по Zk	$K_{\text{ТТС-Zk}} * K_{\text{В13}} * K_{\text{СТ13}}$	→	
3.7.	Состояние конструкции по вибрации	$K_{\text{ТТС-СКВ}} * K_{\text{В14}} * K_{\text{СТ14}}$	→	

В этой таблице параметры $K_{\text{В1}}-K_{\text{В14}}$ в таблице есть коэффициенты влияния расчетных локальных параметров технического состояния подсистем трансформатора на его общее техническое состояние. Они зависят от многих параметров:

- Типа, мощности и даже индивидуального технологического назначения контролируемого силового трансформатора.
- Конструктивного исполнения силового трансформатора и его отдельных подсистем.
- Особенности его эксплуатации.
- Количества и состава диагностических модулей, использованных в системе TDM, так как это влияет на объем первичной информации.
- Имеющейся в памяти системы мониторинга истории контроля данного силового трансформатора (или трансформаторов данного типа).
- Практического опыта диагностического персонала, проводящего первичную настройку системы мониторинга.

Коэффициенты $K_{\text{СТ1}}-K_{\text{СТ14}}$, которые также приведены в таблице в виде сомножителей при локальных коэффициентах технического состояния, учитывают наличие скачков и трендов в изменении величин расчетных коэффициентов технического состояния отдельных подсистем контролируемого силового трансформатора. Порядок их расчета описан в предыдущем разделе.

Наиболее важным при интегрировании локальных диагностических результатов, в то же время и максимально сложным, является корректное определение 14 весовых коэффициентов для всех экспертных математических моделей. Для каждого трансформатора массив весовых коэффициентов для локальных коэффициентов технического состояния формируется индивидуально, это делается при конфигурации и первичной настройке системы мониторинга.

В процессе эксплуатации все становится еще сложнее, значения весовых коэффициентов технического состояния для отдельных подсистем трансформатора могут корректироваться (увеличиваться или уменьшаться) самой экспертной программой в автоматическом режиме. Это делается в том случае, когда в какой-либо контролируемой подсистеме трансформатора будут обнаружены признаки дефектных состояний.

Чем более будет развит и чем более опасен будет выявленный дефект, тем сильнее он должен будет влиять на величину комплексного коэффициента текущего технического состояния трансформатора за счет изменения величины весового коэффициента для дефектной подсистемы.

В экспертной системе приходится также учитывать возможность возникновения связанных или вторичных дефектов, которые тоже будут влиять на величины весовых коэффициентов отдельных подсистем трансформатора.

5. Динамическая математическая модель трансформатора для оценки остаточного ресурса и планирования сервисных и ремонтных работ

Основными практическими вопросами, интересующими эксплуатационный персонал по результатам работы систем диагностического мониторинга, являются три:

- Каким является техническое состояние контролируемого силового трансформатора на данный момент времени? К какой стандартной категории качества его можно отнести: нормальное, ухудшенное или предаварийное состояние?
- Как долго это оборудование можно дальше безаварийно эксплуатировать? На некоторых предприятиях сотрудники эксплуатационных служб формулируют этот важный вопрос несколько иначе: каким является остаточный ресурс трансформатора, определяющий время до момента проведения ремонтных работ?

- Самый важный вопрос эксплуатации: как спланировать сроки и объемы необходимых ремонтных и сервисных воздействий на оборудование, которые в нужное время и при минимальных материальных вложениях смогут максимально эффективно обеспечить восстановление эксплуатационных параметров трансформатора?

Наиболее сложными являются два последних пункта, для реализации которых необходимо использовать достаточно сложные алгоритмы предиктивной диагностики и аналитики, предполагающие проведение обоснованного и максимально достоверного прогнозирования изменения технического состояния оборудования на будущих этапах его эксплуатации.

В системе мониторинга марки TDM это делается на основе использования адаптивного цифрового двойника силового трансформатора: уникальной специализированной «динамической» математической модели, параметры которой автоматически корректируются экспертным ядром программного обеспечения для каждого контролируемого трансформатора.

5.1. Особенности создания динамической цифровой модели силового трансформатора.

Для определения остаточного ресурса и планирования ремонтных работ с контролируемым оборудованием используются динамические цифровые модели, описывающие изменение параметров технического состояния трансформатора в процессе работы. По своим параметрам и свойствам такие цифровые модели значительно отличаются от тех моделей, которые предназначены для определения текущего технического состояния и выявления признаков дефектных состояний подсистем и всего силового трансформатора.

Алгоритмические и технические проблемы, возникающие при создании динамической цифровой модели силового трансформатора, прогнозирующей изменения технического состояния на будущих этапах эксплуатации, заключаются в следующем:

- Информационно значимая для практического использования динамическая цифровая модель трансформатора может быть построена только на основе тех параметров, которые регистрируются модулями системы TDM и теми дополнительными приборами, которые подключены к системе мониторинга. Следствием этого является логически обоснованная связь диагностической информативности цифрового двойника трансформатора с количеством технических средств, используемых в системе мониторинга.

- Математическая модель, предназначенная для прогнозирования изменения технического состояния трансформатора на будущих этапах эксплуатации, может быть создана только на основании той информации, которая имеется в архивной базе данных системы мониторинга. Практическое значение для создания текущей цифровой модели имеет информация, которая была получена после последнего ремонтного вмешательства в трансформатор. Чем больше времени прошло с момента проведения любого хранящегося в базе данных замера, тем меньше его информационная значимость для расчета параметров динамической цифровой модели.

- В процессе работы трансформатора его параметры могут плавно или скачком изменяться, что обычно происходит при возникновении и развитии дефектных состояний. Для того, чтобы при всех таких изменениях динамическая математическая модель максимально достоверно описывала будущее техническое состояние трансформатора, ее параметры должны оперативно корректироваться. Для реализации этой функции в программном обеспечении системы TDM реализован уникальный алгоритм автоматической адаптации параметров цифрового двойника по результатам каждой информативно значимой регистрации первичных параметров.

- Значительное влияние на параметры динамической модели трансформатора может оказать изменение режимов работы трансформатора, связанное с технологическими изменениями питаемого оборудования, сезонными колебаниями и т.д.

Достоинством экспертного программного обеспечения системы TDM является автоматизированное формирование актуальных параметров адаптивной динамической математической модели силового трансформатора.

В процессе работы системы мониторинга марки TDM для создания и корректировки параметров актуального динамического цифрового двойника контролируемого силового трансформатора не требуется какого-либо участия оперативного персонала Заказчика или диагностических специалистов фирмы-изготовителя, что является залогом получения максимально достоверной экспертной информации, необходимой для эффективного управления эксплуатацией.

5.2. Определение остаточного ресурса силового трансформатора и планирование сроков проведения сервисных и ремонтных работ.

В экспертной части программного обеспечения системы TDM термин «остаточный ресурс» используется как эксплуатационный параметр и определяется в рамках текущего межремонтного цикла эксплуатации трансформатора. Он не относится и обычно не равен остаточному ресурсу, определенному в рамках полного жизненного цикла трансформатора, который может включать в себя несколько межремонтных интервалов.

Остаточный ресурс по результатам работы экспертной системы TDM соответствует интервалу времени, по истечении которого контролируемый трансформатор (предположительно) перейдет в категорию «предаварийное состояние». Такой прогнозный расчет в программе выполняется с использованием встроенной адаптивной динамической модели трансформатора.

Дата перехода трансформатора в категорию качества «предаварийное состояние» является оптимальной датой для проведения ремонтных или сервисных работ с контролируемым трансформатором.

Если подсистема трансформатора, которая предположительно будет причиной критического ухудшения технического состояния, подробно контролируется соответствующим диагностическим модулем TDM, то в экспертном заключении программы о необходимости и сроках проведения ремонтов автоматически будет указана основная причина проведения ремонта, которую необходимо будет устранить во время планируемого воздействия на трансформатор.

По поводу достоверности заключений системы мониторинга TDM о расчетных сроках проведения ремонтных работ необходимо отметить следующее:

- Чем больше будет объем первичной информации, зарегистрированной системой TDM (в системе будет использовано больше диагностических модулей, а в базе данных программы будет более представительный архив информативных замеров), тем, при прочих равных условиях, будет более достоверно и точно рассчитываться оптимальное время проведения ремонтных работ.

- Чем на более длительный интервал времени экспертной системой проводится прогнозирование, тем меньше будет достоверность получаемых результатов. Это объясняется возрастающей вероятностью возникновения случайных и неучтенных дефектных состояний, которые могут возникнуть в трансформаторе на будущих этапах эксплуатации и реально сократить его остаточный ресурс. По нашему практическому опыту оптимально осуществлять расчет сроков проведения ремонтов трансформаторов на интервале в три месяца, достаточно достоверно на интервале в шесть месяцев и, чаще всего, допустимо на интервале в один год. На более длительных интервалах прогнозирования достоверность расчетов обычно оказывается недопустимо низкой, поэтому в формируемых встроенной программой документах такие сроки даже не показываются.

- За счет непрерывной работы диагностических алгоритмов предиктивной аналитики в составе экспертного ядра системы мониторинга TDM величина остаточного ресурса трансформатора оперативно уточняется после каждого замера. Поэтому, чем ближе будет трансформатор к дате прогнозируемого ремонта, тем вероятность получения значимой ошибки в определении текущего значения остаточного ресурса трансформатора будет снижаться. Это особенно будет заметно по сравнению с аналогичными расчетами остаточного ресурса, выполненными по итогам работы систем периодического и особенно разового контроля параметров трансформатора, пусть даже и комплексного.

6. Программный симулятор экспертного ядра марки TDM-Эксперт

Для проверки всех математических моделей экспертного ядра системы TDM разработан специальный программный симулятор TDM-Эксперт, который позволяет создавать на персональном компьютере различные сочетания первичных параметров трансформатора. Это дает возможность моделировать различные режимы работы и подбирать сочетания параметров, соответствующих различным дефектным признакам в подсистемах трансформатора.

В конечном итоге симулятор дает возможность получать практически реальные экспертные заключения о техническом состоянии трансформатора, формируемые по результатам работы встроенных в симулятор диагностических математических моделей, которые соответствуют реальным математическим моделям системы мониторинга. Это сделано потому, что на практике получить все возможные разноплановые диагностические заключения очень сложно, практически невозможно.

Симулятор работы экспертного ядра системы мониторинга TDM-Эксперт является разработкой «для служебного пользования» сотрудниками фирмы ДИМРУС.

Симулятор может быть использован Заказчиками для демонстрации возможностей экспертного ядра системы мониторинга силовых трансформаторов TDM. Он не предназначен для коммерческого использования сотрудниками любых других фирм, так как включает в себя конфиденциальную информацию.

Во всех случаях фирма ДИМРУС не несет ответственности за результаты работы экспертных алгоритмов любой версии симулятора TDM-Эксперт, каким-либо образом полученного сторонними лицами. Также сотрудники фирмы не обсуждают со сторонними организациями особенности работы симулятора и получаемые с его помощью диагностические заключения. Симулятор не является какой-либо опорной версией экспертного ядра TDM, по результатам работы которого возможны теоретические, практические и финансовые претензии к фирме.

Для любого пользователя системы мониторинга силовых трансформаторов при запуске формируется специфический набор математических моделей (частично в автоматическом режиме, а частично персоналом фирмы ДИМРУС), который в максимальной степени соответствует параметрам и особенностям контролируемого трансформатора. Только такая частная версия экспертного ядра системы мониторинга TDM, загруженная в программу мониторинга сотрудниками ДИМРУС, а точнее говоря, результаты работы специализированного набора экспертных алгоритмов, могут быть предметом частного обсуждения с персоналом Заказчика.