

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Соколов В.В. Маяков В.П. Осервасер М.Я. Бережной В.Н.
ОАО НИЦ "ЗТЗ - Сервис"

1. Концепции диагностики

Техническая политика по эксплуатации и обслуживанию парка оборудования во всем мире и, особенно в странах СНГ обусловлена экономическими соображениями.

Необходимостью стал переход от системы обслуживания по времени эксплуатации к обслуживанию по состоянию оборудования. Дальнейшее развитие это нашло в понятии "Обслуживание, направленное на обеспечение надежности" (Reliability Centered Maintenance). Последнее означает, в частности, возможность продолжения эксплуатации и дефектного оборудования, если последствия развития дефекта экономически приемлемы. Во всех случаях в основе лежит определение и классификация фактического технического состояния. НИЦ "ЗТЗ-Сервис" определяет - бездефектное состояние (по физическим соображениям), допустимое (нормальное) состояние (после изготовления, перед включением в работу и в эксплуатации), дефектное состояние и поврежденное состояние. Каждое состояние может быть выражено соответствующими характеристиками.

Задачей диагностики является выявление и распознавание дефектного состояния и, в частности, конкретных дефектов (повышенное влагосодержание, загрязнение, старение, перегревы, деформации и др.), которые, как правило, выражаются несколькими характеристиками, определяющими вид дефекта. В то же время изменение какого-либо отвлеченного параметра зачастую не связано с переходом нормального состояния в дефектное.

В этом отношении новая редакция "Объемы и нормы испытания электрооборудования" (РД 34.45 - 51.300.-97) Российской Федерации, к сожалению, продолжает традиционную концепцию периодического слежения за изменением результатов испытаний по сравнению с некими условными "исходными значениями" вне связи с состоянием оборудования.

В основе подхода НИЦ "ЗТЗ-Сервис" положена концепция многоступенчатой диагностики состояния оборудования на базе определения

- модели вероятных дефектов (что искать?)
- характеристики дефектов (что испытывать?)
- дефектные состояния (чего опасаться?)

Первая ступень - индикация дефектов (как правило, испытания под нагрузкой)

Вторая ступень - идентификация дефектов

- определение возможности дальнейшей эксплуатации
- определение объема ремонта (испытания выполняются с отключением нагрузки и отключением трансформатора).

Третья ступень - Предсказание возможного развития дефекта с целью определения условий работы в дефектном состоянии или определения программы продления срока службы (функциональные испытания с искусственным повышением температуры, нагрузки, напряжения и др.)

Четвертая ступень - Подтверждение дефекта.

- внутренний осмотр

- испытания без масла
- испытания проб изоляции.

2. Организационные аспекты

Предпосылки

- В странах СНГ отсутствуют стандартизованные методики полевых испытаний (метрологические требования, процедуры поверки и др.)
- Необходимость сближения с международными стандартами (использование мирового опыта, признание результатов испытаний западными экспертами).
- Необходимость получения достоверных результатов испытаний.

НИЦ ЗТЗ-Сервис организует систему диагностических испытаний на следующих принципах:

- 1 Нормативно-техническая база (объем, методики, критерии):
 - Удовлетворение требований инструкций заводов изготовителей, а также всем национальным РД "Объёмы и нормы испытаний"
 - Удовлетворение требований основных международных РД (МЭК, ISO, ASTM; IEEE Std G2-1995- "Диагностические полевые испытания силовых аппаратов», РД комитета DOBIE - «Руководство по полевым испытаниям вводов")
 - Разработка внутренних методик (стандарты НИЦ)
- 2 Испытательное и измерительное оборудование: комплектация техникой, удовлетворяющей требованиям международных стандартов.
- 3 Система качества

Разработаны документы, регламентирующие процесс выполнения испытаний, и главное, процедуры внутреннего и внешнего контроля. В качестве внешнего контроля применяется периодические сверочные испытания параллельных проб в лабораториях Украины и других стран. Такие испытания проводились по хроматографии, механическим примесям, пробивному напряжению, влагосодержанию. В лабораториях регулярно проводится внутренний (бюро контроля качества НИЦ «ЗТЗ-Сервис») и внешний аудит (УкрСЕПРО, SGS-Германия). В результате этой работы лаборатории НИЦ аттестованы в системе УкрСЕПРО, а также в общей системе качества НИЦ (международный сертификат ISO-9001).

3 Достоверность данных испытаний и диагностических выводов

3.1 Пределы и точность измерений

Для выявления ряда типовых дефектов (замыкания между двумя обкладками в конденсаторной изоляции, загрязнения поверхности ввода и барьеров МБИ, дефект в планках креплений отводов требуются надёжные измерения ёмкости на уровне 3-10 пф и tgд на уровне меньше 0,1%. Например, расчётное значение tgд изоляции ОРЦ-417000/750 и реактора РОДЦ 110000/750 при влажности 0,5% и 2% составляют при 50°С и tgд масла 0,1% соответственно 0,16 и 0,28%. Соответственно сопротивления сухой изоляции составляет 180-120 ГОм. Наиболее распространённые приборы (Мост Р5026, мегомметр МС-0,5, Ф4100) принципиально не позволяют выявить дефектное состояние. Аналогично метрологически не обеспечивается возможность выявления дефектного состояния весовым методом определения загрязнений в масле, измерение фурановых компонентов методом тонкослойной хроматографии и др.

Проблема технического перевооружения, по меньшей мере, базовых (региональных, национальных) лабораторий имеет первостепенное значение.

Таблица 1

Наименование измерительной установки	Пределы измерений		Пределы допускаемой погрешности измерения		Пределы рабочего напряжения кВ
	C, пФ	$tg\delta$	C, %	$tg\delta$	
P5026	$100 \div 10^6$	$5 \times 10^{-3} \div 1.0$	± 1	$\pm (0.025tg\delta + 2 \times 10^{-4})$	$3 \div 10$
M4000	$0 \div 2.7 \times 10^6$	$0 \div 1.0$	± 0.5	$\pm 0.4 \times 10^{-3}$	$0.025 \div 12$

Мегаомметр ф4100 позволяет измерить сопротивление до 100 ГОм.

Мегаомметр Megger1-5000 (AVO) позволяет измерить до 500 ГОм.

3.2 Внешние помехи

Опыт НИЦ показывает, что принятые технические приемы по уменьшению (учету) влияния помех (особенно при испытании на действующих подстанциях 750 кВ) недостаточно эффективны (см. например табл. 2.). Требуется аппаратура, имеющая принципиально иную помехоустойчивость, например частотную модуляцию как в установке М 4000.

Сравнительные данные результатов измерения $Tg\delta$ Анализатором изоляции М4000 при $U=10kV$ (источник напряжения М4000) и при $U=10kV$ мостом P5026 (источник напряжения ЭТЛ-35).

Таблица 2

Ячейка №; Диспетчерское обозначение.	Фаза ТТ, зав.№	Степень каскада ТТ	$U = 10kV$, М4000 $Tg\delta, \%$	$U = 10kV$, P5026 $Tg\delta, \%$	$\Delta_{абб}$, от базового М4000
Ячейка №10 ГТ-4-02	ф. «А» №1082	Н.С.	0,21	0,25	+0,04
		В.С.	0,20	0,24	+0,04
	ф. «В» №985	Н.С.	0,20	0,13	-0,07
		В.С.	0,23	0,15	-0,08
	ф. «С» №940	Н.С.	0,18	0,40	+0,22
		В.С.	0,24	0,30	+0,06

Измерения выполнены на ОРУ - 750 ЗАЭС. Трансформатор тока отключен, не расхинован, не заземлен. Наведенное напряжение на маслорасширителе верхней ступени 10,8 кВ.

Требуются также дополнительные методические приемы по устранению помех (охранные электроды на поверхности фарфора, информационно-избыточные измерения, например, измерение $tg\delta$ C_1 вводов по прямой и инверсной схемам). Метрологически несостоятельными также оказались широко распространенные системы устройства подключения ко вводам и трансформаторам тока для возможности контроля под рабочим напряжением. Здесь требуется улучшение экранирования гальванические развязки в измерительных цепях и др.

3.3 Внутренние и схемные помехи

Около 50% данных испытаний, присылаемых из энергосистем в НИЦ для согласования, оценивается как недостоверные из-за неучета остаточной намагниченности магнитопровода (измерение потерь и тока х.х.), остаточного заряда в изоляции (диэлектрические характеристики), особенностей распределения магнитного потока, плохими контактами и недостаточным сечением закороток (измерение Z_k), из-за

недостаточности учета переходных процессов при измерении сопротивления обмоток постоянному току, влияния индуктивности трансформатора при измерении tgδ вводов и др.

Методика оценки систематических погрешностей в нормативно-технической документации по существу либо отсутствует, либо недостаточна.

Например, в типичном случае с ОРЦ-417000/750 постоянная времени $\tau = R * C$ достигает 500-3000 сек. и имеющиеся рекомендации по разряду изоляции в течение 5 минут явно недостаточны. Нетрудно представить себе экономический эффект только за счет уменьшения повторов испытания при наличии подробных методических документов.

3.4 Влияние особенностей конструкции

В ряде случаев результаты испытания в значительной, если не определяющей степени, обуславливаются особенностями конструкции оборудования, в частности, слабой контролепригодностью. Так, например, следует принять во внимание:

- наличие заземленных электростатических экранов между обмотками, что значительно понижает чувствительность диэлектрических характеристик к дефектам в изоляции.
- наличие бакелитовых цилиндров в МБА, что препятствует оценке влажности барьеров через диэлектрические характеристики.
- применение в опорной изоляции (у заземленной нейтрали) диэлектрика с повышенными потерями (например, ШР 400, 500, 750 кВ), что иногда полностью маскирует измерения в главной изоляции.
- заземление магнитопровода через резистор вызывает увеличение tgδ участков обмотка-бак и снижение tgδ участка между обмотками.

Улучшение контролепригодности оборудования является одной из задач НИЦ при модернизации для продления срока службы.

4 Эффективность методов диагностики

Опыт НИЦ показывает, что в большинстве случаев в оборудовании, характеризуемом по результатам регламентированных испытаний нормальным, обнаруживались серьезные дефекты, влияющие как на снижение надежности, так и на ускорение старения оборудования. Одной из основных причин такого положения является существующий нормативный подход по мониторингу характеристик, но не состояния оборудования. Нормативная база РД «Объемы и нормы ...» 1997 г. не только существенно уступает аналогичному документу IEEE, но как показано в табл.3, может привести к целому ряду негативных последствий. Так, например, дефектное состояние изоляционной системы это возможность повышения относительной влажности масла (по IEEE выше 30%) после перехода влаги из изоляции в масло при высокой температуре и последующем понижением температуры. Это с высокой степенью вероятности может произойти, если влажность изоляции повысится до нормированных в РД 4%. В то же время опасное увлажнение при нормированной температуре испытаний 10-20°C практически не может быть обнаружено. Внедрение РД несомненно будет способствовать уменьшению объема и удешевлению ремонтных работ, но так же несомненно, что это будет достигнуто за счет снижения надежности и ускорения износа парка.

Возможные негативные последствия внедрения норм РД 34.45-51.300

Таблица 3

Параметр	Норма РД	Норма IEEE	Возможные последствия
1. Ктр	2%	0,5%	Рассогласование РПН на одну ступень
2. ΔZ_k от заводских	+8%	$\pm 3\%$	Опасно деформированная обмотка
3. Влажность изоляции 4. Влажность масла	2% - вкл. 4% - экспл.	0,5 – 1% вкл. 2% - экспл. $\varphi \leq 30\%$ (20 ppm)	Опасное снижение эл. прочности. Значительное ускорение старения, образование пузырьков пара
5. $tg\delta$ 20eC	$\leq 1\%$ вкл. +50% экспл.	0,5% вкл. 0,5 – 1,0% экспл.	Невыявление типичных дефектов (влага, загрязнение масла, поверхности)
6. P_{xx}	+30%		Отбраковка нормального оборудования
7. Примеси в масле 100мл (5-150 мк) 8. Старение масла к.ч. мгКОН/г σ мН/м $tg\delta$ 25eC $tg\delta$ 90eC	(100000) <0,25 10 (5)	<15000 0,1 >30 <0,3%	Возможный отказ (оценка SIGRE) Ускорение старения изоляции
9. Фурановые соединения, ppm	15 (10)	<1 (DOBLE) (0,05 – 0,09 ppm/год)	Недопустимый перегрев изоляции
10. Вводы $tg\delta$ 1% 20eC C_1 $tg\delta$ 2% C_2 $tg\delta$ 3% C_3	1,0 – 1,5 1,0 – 1,5 1,5 – 3,0	$\leq 1\%$ +10% $\leq 1\%$ DOBLE $\leq 1\%$ DOBLE	Невыявление типичных дефектов (влага<4%, замыкание между двумя обкладками). Невыявление старения масла и осадка на фарфоре.

Дефекты, как правило, определяются несколькими взаимно координированными характеристиками. В основе диагностических испытаний НИЦ лежит концепция «групп испытаний» для индикации и идентификации дефекта (Таблица 4). Эффективность методов оценки в табл. 4 - по нарастающей шкале от грубой индикации до хорошей идентификации.

Важно отметить, что для конкретного оборудования необходимый объем испытаний может быть значительно уменьшен и упрощен.

Более 60% дефектов выявляются через квалифицированные испытания проб масел, а дефектные состояния вводов и трансформаторов тока могут быть эффективно выявлены испытаниями под напряжением.

Эффективность методов диагностики дефектов в силовых трансформаторах

Таблица 4

Дефект и развивающиеся повреждения	Диагностическая процедура	Эффективность
Повышенное увлажнение	<ul style="list-style-type: none"> Измерение воды в масле (случайная температура). Измерение полной воды Water Heat Run Test. Оценка через измерение $R_{60}, tg\delta$ при нормированной температуре. Оценка через $R_{60}, tg\delta$ в зависимости от температуры. Пробы (образцы). 	<p>XX XXX XXXX XX XXXXX XXXXXX</p>
Загрязнение масел	<ul style="list-style-type: none"> U_{np} масла. Коэффициент вариации U_{np}. Массовая концентрация примеси. Дисперсия чисел частиц, с микроскопическими анализом. Оценка через $tg\delta$ в зависимости от температуры. 	<p>XX XXX XX XXXXX XXXX</p>
Загрязнение поверхности изоляции, ползущие разряды	<ul style="list-style-type: none"> Оценка через $tg\delta$ С в зависимости от температуры. ЧР, $U_{начальное}$ ЧР. ХАРГ. 	<p>XXXXX</p>
Местные перегревы и разряды в токоведущей цепи (РПН, отводы)	<ul style="list-style-type: none"> ХАРГ Переходные сопротивления. ЧР (акустика) 	<p>XXXX XXXXX</p>
Местные перегревы и разряды в электромагнитной системе	<ul style="list-style-type: none"> ХАРГ (МЭК) ХАРГ (C₃ – C₅) – перегрев до 300°C. Heat Run Test. ЧР (акустика) от нагрузки. R_{xx}, I_{xx} от напряжения 	<p>XXXX XXXX XXXXX X X</p>
Деформация обмоток, ослабление прессовки	<ul style="list-style-type: none"> Комплексное изменение Z_k и X_k. Изменение емкости. Вибрации (частотный спектр) 	<p>XXXXX XXX</p>
Повышение влажности в остовах ввода	<ul style="list-style-type: none"> $tg\delta$ при нормированной температуре. $tg\delta$, С, R_{60} d зависимости от температуры WHR – test (вода в масле после прогрева) 	<p>XX XXXXX XXXX</p>
Местные дефекты в остовах, сопровождающиеся замыканиями между слоями	<ul style="list-style-type: none"> Комплексное изменение $tg\delta$, С и потерь. Комплексное изменение $tg\delta$, С и тока небаланса. Рост $tg\delta$ от напряжения. ХАРГ. ЧР. 	<p>XXXX XXXXX XXXX XXXX XXX</p>
Старение масел	<ul style="list-style-type: none"> $tg\delta_3$ в зависимости от температуры. Испытание масел. ХАРГ (CO, CO₂, O₂). 	<p>XXXXX XXXXX XXX</p>

Дефект и развивающиеся повреждения	Диагностическая процедура	Эффективность
Полупроводящий налет (осадок) на поверхности фарфора	$tg\delta$, С в зависимости от температуры.	xxxx
	Ток небаланса от температуры и времени.	xxxx
	ХАРГ.	xxxx
	ЧР (появление).	x
Местные перегревы и разряды в масле	ХАРГ. ЧР	xxxx x

xxxxxx - хорошая индикация и идентификация

xxxxx - хорошая индикация и удовлетворительная идентификация

xxxx - хорошая индикация и грубая идентификация

xxx - удовлетворительная индикация и идентификация

xx - грубая индикация и идентификация

5 Новые методы и методология диагностики, применяемые и разрабатываемые НИЦ «ЗТЗ-Сервис».

5.1. Диэлектрические характеристики силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов:

- Использование координированной зависимости сопротивления изоляции, емкости и $tg\delta$ от параметров дефекта для определения имиджа типичных дефектов (влажности, поверхностного загрязнения, ползущих разрядов, загрязнения масла).

- Использование температурной зависимости характеристик для усиления проявления дефектов.

- Использование расчетных моделей для оценки влажности барьеров 1,0 – 1,5 % и выше, загрязнения масла в изоляционных промежутках.

За последние годы обнаружены и документированы в отчетах НИЦ около 40 трансформаторов с указанными дефектами.

В ближайших планах намечена разработка объективных критериев увлажнения и загрязнения изоляции и методологических материалов по диагностике изоляционной системы.

- Изучение (в масштабах СИГРЭ) эффективности поляризационных методов (частотных спектров).

5.2. Влажностные методы

- Широкое внедрение «Water Heat Run Test» - метода оценки увлажненности по изменению влагосодержания масла после искусственного нагрева трансформатора нагрузочными потерями.

- Освоение датчиков непрерывного контроля влажности масла.

5.3. Электромагнитные характеристики

- Разработка методологии использования в качестве диагностических характеристик параметров схем замещения в опытах КЗ и ХХ.

- Применение для диагностики радиальных деформаций изменения индуктивных сопротивлений (вместо изменения Z_k).

- Использование диагностических методик для идентификации деформации. За последние 3 года выявлено 11 поврежденных трансформаторов.

- Выявление потенциальных зон нагрева (особенно разъемов бака) с помощью

измерения напряженности магнитного поля.

- Изучение (в масштабах СИГРЭ) эффективности FRA (частотного анализа) для диагностики деформации обмоток.

5.4. Частичные разряды

Развитие цифровой техники, возможности широкого применения математического аппарата для анализа электрических процессов в широком спектре частот позволяет реально включить в систему диагностики измерение и анализ частичных разрядов.

Сравнительно широко применяемые акустические датчики АИЧР позволяют фиксировать разряды на уровне $>3-5 \times 10^{-8}$ Кл. Опыт показал эффективность АИЧР при обнаружении плохого контакта экрана с вводом, незапотенциального токоведущего кольца РПН и др., т.е. источника сильных стабильных разрядов. Однако эта техника не позволяет выявить опасные разряды в МБИ.

Техника измерения электрических ЧР не нашла широкого применения из-за своей трудоемкости, элитарности и ограничения высоким уровнем помех.

НИЦ начал применение 8-ми канальной системы измерения ЧР с эффективным анализатором разрядов и математическим исключением помех.

Первый опыт с оценкой состояния трансформаторов 500кВ в Аргентине показал возможность повышения чувствительности до 15-20 пК на электростанции и до 50пК на подстанции, т.е. практически оценить всю область дефектного состояния трансформаторов, вводов и измерительных трансформаторов.

6 Концепция мониторинга трансформаторного оборудования по результатам испытания масла

Таблица 5

Традиционный подход	Новая концепция
Масло испытывается как самостоятельный компонент оборудования.	Масло – это «кровь и лимфа» оборудования, которая ответственна за состояние трансформатора, как единого организма
Состояние масла оценивается по установленным нормативам, после чего принимается решение об обработке или замене. Допускается ухудшение масла в определенных пределах, а затем обработка или замена аналогично маслу в автомобиле.	Загрязнение в масле относятся ко всей диэлектрической системе трансформатора. Они мигрируют под действием теплового и электромагнитного полей по всей конструкции. Если не удалить из изоляции продукты старения масла, то они разрушат целлюлозу и значительно ускорят старение нового масла после перезаливки.
Контроль масла осуществляется независимо от других испытаний трансформатора.	Контроль состояния оборудования и его функциональной работоспособности по совокупности всех имеющихся характеристик.

6.1. Три основные задачи контроля трансформаторного масла

- Оценка диэлектрического состояние оборудования;
- Предупреждение критического старения, принимая во внимание влияние продуктов старения на гидролитическое разрушение целлюлозы;
- Оценка дефектного состояния оборудования, используя масло как информационную среду.

6.2. Характеристики состояния изоляционной системы

- Влагосодержание, как правило, в прогретом состоянии;
- Определение количества частиц в масле;
- Пробивное напряжение и коэффициент вариации;
- Тгд и проводимость, как параметры влияющие на характеристики измерения

МБИ.

6.3. Показатели, характеризующие старение

- Цвет
- Кислотное число
- Число омыления
- Тгд (20, 70, 90) °С
- Коэффициент полярности ($\epsilon-p^2$)
- Осадок
- Продукты старения по ИК спектру
- Содержание ингибитора
- Содержание СО, СО₂
- Стабильность к окислению

6.4. Критерии

Величины, которые характеризуют:

- Появление шлама в период между испытаниями
- Окончание индукционного периода
- Присутствие кислых и полярных продуктов старения, которые ускоряют разрушение целлюлозной изоляции

6.5. Диагностические характеристики

- Хроматографический анализ газов растворённых в масле
- Анализ фурановых соединений
- Влагосодержание
- Растворённые металлы

Особенности использования в диагностике некоторых видов испытания масла

Определение содержания механических примесей

В отечественной и международной практике для оценки состояния изоляционного масла давно используется такой показатель как содержание механических примесей. Это весовой метод по ГОСТ 6370-83, ГОСТ 10577-78 и РД 34-70-653-83, а также метод определения количества частиц и распределения их по размерным диапазонам в соответствии с МЭК 970. Оба эти метода дают информацию лишь о количестве загрязнений, не говоря ничего об их природе. Возможности диагностики значительно расширяет счетный метод определения количества частиц с использованием микроскопа. Метод состоит в вакуумной фильтрации пробы масла через мембранный фильтр тонкостью фильтрации мене 1 мкм. Оставшиеся на поверхности фильтра загрязнения после споласкивания воронки фильтрованным растворителем и сушки фильтра исследуются под микроскопом и определяется количественно и качественно загрязненность пробы механическими примесями. Количественная оценка загрязненности дается классом чистоты по ИСО 4406. Для определения класса чистоты ведется два подсчета количества частиц: один для частиц размером более 5 мкм, второй - для частиц более 15 мкм. По найденным числам обоих подсчетов по таблице определяют соответствующий класс чистоты.

Пример: Подсчет в диапазоне > 5 мкм -- 4250 шт.;

Подсчет в диапазоне > 15 мкм -- 312 шт.

По нормам ИСО 4406 эти значения дают класс чистоты 19/15.

Найденный класс чистоты может быть ориентировочно приведен к классу чистоты жидкости по ГОСТ 17216-71.

Кроме количественной оценки загрязненности метод позволяет получить дополнительную информацию о характере загрязнений. Так, поместив мембрану с отфильтрованными частицами в сильное магнитное поле, можно идентифицировать ферромагнитные частицы, которые ориентируются вдоль линий поля и видны в микроскоп. Анализ фильтрата позволяет идентифицировать также волокна целлюлозы, частицы углерода, силикагеля. Определение природы частиц является более важной информацией для диагностики состояния оборудования, чем количественные показатели загрязнения, поскольку металлические частицы, например, более опасны, чем волокна целлюлозы. Кроме того, идентификация природы частиц является необходимым шагом в направлении определения источника загрязнения и необходимых корректирующих действий.

Фурановые компоненты

Фураны образуются как вторичные продукты гидролитической деструкции целлюлозы, а также вследствие менее вероятно термической деструкции. Фураны растворяются в масле, что позволяет использовать анализ проб масла для оценки степени деструкции целлюлозы.

Старение изоляции при температуре до 100 - 105 °С вызывает появление сравнительно небольших концентраций фуранов в масле. Поданным СИГРЭ нормальное состояние трансформаторов характеризуется концентрацией фурфурола менее 1 ppm (1 мг/кг). Изоляция считается серьезно «состаренной» если скорость выделения фуранов превышает 50 - 90 ppm (1нг/кг) в год. Образование фуранов концентрацией более 3-5 ppm является свидетельством аномального перегрева изоляции (температура выше 120-125 °С). При деструкции, обусловленной воздействием повышенных температур, можно ожидать корреляцию фуранов и газов СО, СО₂, являющихся существенным продуктом термолиза.

Уровни загрязненности по ГОСТ 17216-71, ISO 4406, NAS 1638
(дано количество частиц в 100 мл масла)

Класс чистоты ГОСТ 17216-71	Код ISO 4406-1987	NAS 1638-1964	Количество частиц размером более 5 мкм		Количество частиц размером более 15 мкм, не более чем:
			более чем:	не более чем:	
0,0	4/2		8	16	4
0	5/3		16	32	8
1	6/4		32	64	16
2	8/5	0,0	130	250	32
3	8/6		130	250	64
4	9/6	0	250	500	64
4	10/6		500	1000	64
5	10/7	1	500	1000	130
5	10/8		500	1000	250
6	11/8	2	1000	2000	250
7	12/9	3	2000	4000	500
8	13/10	4	4000	8000	1000
9	13/11	5	4000	8000	2000
9	14/12	6	8000	16000	4000
10	15/12	7	16000	32000	4000
11	16/13	8	32000	64000	8000
12	17/14	9	64000	130000	16000
13	18/15	10	130000	250000	32000
13	19/16		250000	500000	64000
14	20/16		500000	1000000	64000
14	20/17		500000	1000000	130000
15	20/18		500000	1000000	250000
16	21/18		1000000	2000000	250000
17	23/20		4000000	8000000	1000000

Предельно-допустимое значение

Верхняя граница НИЦ

в эксплуатации по РД 34.45-51.300-97

Уровень загрязненности в эксплуатации, рекомендуемые



- уровень загрязненности нормальный



- уровень загрязненности высокий
(возможен отказ оборудования)



- уровень загрязненности очень высокий
(вероятность отказа очень высока)

Обычно используют шесть фурановых компонентов, но более надежной диагностической характеристикой является 2-фуруфуральдегид или фуруфурол. Используется также отношение между фуруфуролом и 5-гидроксиметил-2-фуруфуралом как критерий порога повышенного температурного перегрева.

Фураны активно адсорбируются силикагелем, удаляются при термовакуумной обработке масла.

В НИЦ оценивается концентрация фуруфурола $> 0,5$ ppm. Значение выше 1-1,5 ppm считается аномальным, значение выше 3-5 ppm - критическим. Выявленными причинами образования фуруфурола явились перегрев изоляции магнитопровода, повышенный перегрев отвода СН у выхода из обмотки.

Диагностика по содержанию углеводородных газов C3-C5

В отечественной и зарубежной практике широко используется метод диагностики состояния оборудования по составу и концентрации газов, растворенных в масле; H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 (РД 34.46.302-89, МЭК 60599). Но спектр газов, сопровождающий перегревы и разрядные процессы, происходящие в трансформаторе гораздо шире. В настоящее время известно, что достоверность и чувствительность диагностики к начальным стадиям развития дефектов могут быть повышены путем использования дополнительных данных о содержании в масле предельных и непредельных изомеров углеводородов C_3 , C_4 , C_5 . Результаты организованной НИЦ «ЗТЗ-Сервис» работы показали перспективность развития этого направления диагностики. Получены результаты, которые свидетельствуют о высокой чувствительности газов C_3 - C_5 к низкотемпературным (от 140 °C) перегревам на ранних стадиях развития дефекта. Превалирующим газом при этом является бутен-1. В настоящее время в НИЦ «ЗТЗ-Сервис» активно идет набор данных по определению C_3 - C_5 . Определение C_3 - C_5 выполняется на капиллярных колонках.