

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭСКСИСО, ПРЕДНАЗНАЧЕННАЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Утепов А.Е., Карпеченков Н.Д., Чернышев В.А., Кисляков М.А., Чернов В.А.

Современные тенденции развития энергосистемы РФ диктуют необходимость отказа от планово-предупредительного обслуживания энергетического оборудования и переход на обслуживание по реальному техническому состоянию. Причинами этого являются, во-первых, большой износ энергетического оборудования и как следствие не возможность эксплуатации и обслуживания в прежних режимах, во-вторых, повышения надежности снабжения потребителей, в-третьих, сокращение расходов на ремонт энергетического оборудования за счет повышения обоснованности принятия решения о его целесообразности. Решение перечисленных проблем связано с внедрением системы диагностики, что должно позволить не только определять техническое состояние объектов, но и с определенной степенью точности оценивать его остаточный ресурс и срок безопасной эксплуатации.

Одним из основных элементов энергосистемы являются силовые маслонаполненные трансформаторы, большая часть которых в настоящее время выработали свой расчетный срок эксплуатации. Причем как показывает практика, большинство таких трансформаторов не требуют замены, и могут находиться в эксплуатации и дальше при их правильном обслуживании.

Переход на обслуживание по фактическому состоянию оборудования связан с проблемой разработки методов высокоэффективного профилактического контроля. Применяемые в настоящее время методы оценки состояния силовых маслонаполненных трансформаторов не всегда позволяют не только оценить реальное состояние объекта, но и спрогнозировать дальнейший график обслуживания и оставшийся срок эксплуатации.

Наиболее перспективными методами решения описанной выше проблемы является применение современных систем диагностики энергетического оборудования основанных на многопараметрических подходах [1], когда под контролем находится достаточно широкий спектр диагностических параметров. Учет диагностических параметров, описывающих физические, химические, электрические и другие свойства объекта исследования, позволяет избежать ошибочных заключений о его состоянии, так, как из практики известно, что величина большинства контролируемых параметров зависит не только от внешних условий при измерении (температура, давление и другие), но и от процессов, происходящих в самом объекте (термическое, электрическое старение), причем эта зависимость не всегда бывает однозначной. Например, известны случаи возрастания сопротивления изоляции силовых

маслонаполненных трансформаторов при наличии электрических механизмов старения. Таким образом, применение многопараметрических методов диагностики позволяет более точно определить состояние, а, следовательно, с большей вероятностью оценить срок дальнейшей эксплуатации объекта.

Другой не маловажной проблемой при оценке состояния является объективность заключения, зависящая от профессиональной подготовки персонала принимающего решения на основе полученных оценок, поэтому необходимой частью комплексного подхода является экспертная система, автоматизирующая не только процесс обработки данных, но и процесс принятия решения о состоянии объекта и необходимых корректирующих мероприятиях.

В ходе многолетних исследований силовых маслаполненных трансформаторов проводимых научной группой кафедры ТОЭ филиала МЭИ в г. Смоленске под руководством профессора В.А. Чернышева при сотрудничестве с ОАО «Смоленскэнерго», ОАО «Брянскэнерго», ОАО «МОЭСК», ОАО «Свердловскэнергоремонт» и другими предприятиями, была накоплена обширная база данных, на основе которой была создана экспертная система «ЭСКСИСО» [2], позволяющая не только оценить состояние объекта, тип дефекта, но и что более важно, оценить остаточный ресурс и время дальнейшей безопасной эксплуатации, сформировать корректирующие мероприятия.

Экспертная система контроля состояния изоляционной системы оборудования «ЭСКСИСО» создана в интегрированной среде разработки программного обеспечения CodeGear RAD Studio 2009 (Delphi 2009). В качестве сервера базы данных используется Firebird 2.0. Упрощенный вариант структурной схемы созданного программного продукта представлен на рис. 1.

Отличительной особенностью разработанной экспертной системы является то, что в ее основу положены принципиально новые методы диагностического контроля, основанные на исследовании абсорбционных токов, протекающих в резко неоднородных диэлектрических структурах [3, 4]. Под контролем в экспертной системе находится изоляционный промежуток в целом, но возможно отдельное исследование пробы трансформаторного масла. ЭСКСИСО определяет не только состояние и характеристики изоляционного промежутка, но и его качество, которое в данном случае выступает как средняя мера соответствия значений параметров контроля некоторым базовым значениям. Алгоритм формирования заключения о состоянии изоляционного промежутка представлен на рис. 2.

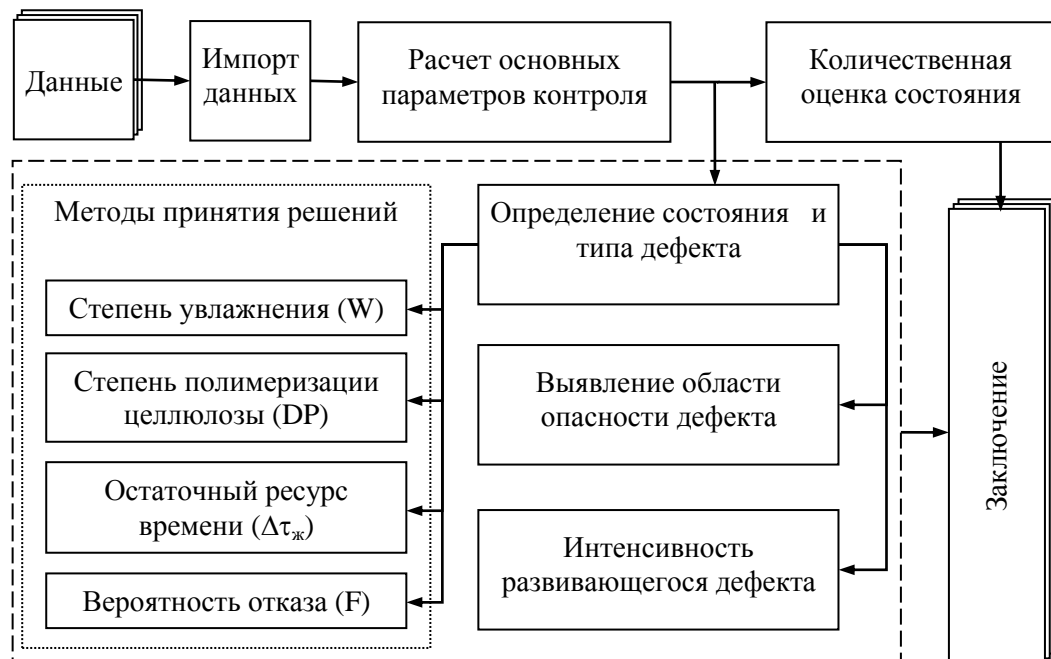


Рис. 2. Алгоритм определения состояния и формирования заключения

Основой рассматриваемой экспертной системы является изучение процессов поляризации в изоляционных промежутках силовых маслонаполненных трансформаторов протекающих во временном интервале 0 – 600 секунд. Для анализа полученной информации в данной системе используется целый арсенал методов и методических приемов, специально разработанных для обеспечения требуемого уровня достоверности получаемой информации. К таким методам в работе отнесены:

1. Метод назначенного лидера, заключающийся в оценке степени близости спектра токов поляризации исследуемого промежутка, спектру промежутка, выбранного в качестве эталонного (рис. 3).



Рис. 3. Сопоставление поляризационных спектров

Данный метод позволяет оценить степень изношенности материалов, работающих в изоляционном промежутке. Для повышения точности такого сравнения используются спектры, нормированные относительно их максимального значения. Оценивание степени близости в данном случае проводится с помощью модифицированного метода «домика качества»,

теоретической основой которого служит методология структурирование функций качества.

2. Метод скользящего среднего, с помощью которого удастся оценить физический возраст объекта наблюдения, который может существенно отличаться от календарного. Для его реализации была сконструирован специальная диаграмма (рис.4).



Рис.4. Диаграмма возможных состояний изоляционных промежутков силовых трансформаторов

В основе данной диаграммы лежит устойчивая связь TPI [4] с индексом поляризации PI, значения которого проранжированы в зависимости от состояния изоляционной системы, что позволило в итоге построить семантическую шкалу состояний, соответствующую измеренным значениям TPI. Диаграмма снабжена шкалами, устанавливающими соответствие между значениями TPI и среднестатистическими величинами времени жизни, а также между значениями PI и уровнем влажности твердой изоляции. Все это позволяет не только оценить состояние изоляционного промежутка, но и дает представление о величине оставшегося ресурса времени и степени увлажнения материалов изоляционного промежутка.

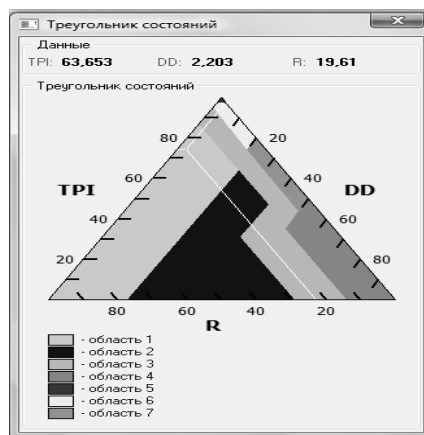


Рис. 5. Метод «треугольника возможных состояний»

3. Метод треугольника возможных состояний, представляющий возможность классифицировать состояние промежутка, отнеся его к одной из возможных классификационных областей каждой из которых,

поставлен в соответствие определенный вид развивающегося дефекта. В предлагаемой методике используются три независимых параметра (TPI, R, DD) на основе которых исследуемый изоляционный промежуток можно отнести к одной из семи областей (рис.5).

В каждой из областей состояния контролируемых объектов идентичны, а свойства укладываются в строго определенных пределах. Каждая из областей характеризуется своим основным механизмом старения и определяет вид дефекта, развивающегося в объеме контролируемого объекта.

4. Метод ранговых распределений, позволяющий обнаружить присутствие развивающегося дефекта в объеме контролируемого промежутка. Данный метод основан на техноценологическом подходе (Б.И. Кудрин), который позволяет соотнести условия эксплуатации энергетического оборудования со статистическими значениями, характерными для данной популяции. Выполнение рангового распределения базы данных по величине TPI позволяет выделить доверительный интервал для ранжируемого значения TPI и определить три области опасности развивающегося дефекта: 1) область «нормального состояния изоляции» (интервал от верхней границы доверительного интервала и выше); 2) область «риска» (интервал от нижней до верхней границы доверительного интервала), когда по результатам замеров параметров изоляции делается заключение об отсутствии видимых структурных нарушений; 3) область «дефекта» (интервал от нижней границы доверительного интервала и ниже), когда состояние параметров указывает на наличие дефектов или общего старения.

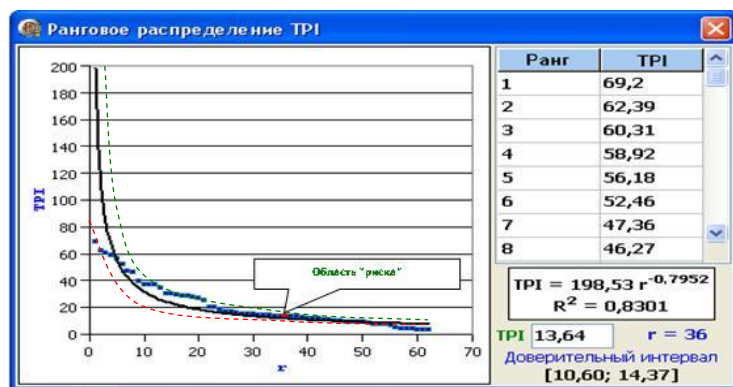


Рис. 6. Ранговое распределение изоляционных промежутков по значению TPI

Входным параметром данного метода, реализующего техноценологический подход (рис. 6), является обобщенный индекс поляризации (TPI), результатом служит определение принадлежности промежутка к одной из указанных выше областей.

5. Обеспечение высокой достоверности получаемых результатов и формируемых заключений в экспертной системе осуществляется возможностью использования корректирующих и уточняющих мероприятий. В качестве параметров, характеризующих эксплуатационную

надежность изоляционного промежутка, выступают: степень увлажнения диэлектрических материалов (W), степень полимеризации целлюлозы (DP), остаточный ресурс изоляционной системы ($\Delta\tau_{ж}$), вероятность отказа (F), возникающая в результате динамически изменяющихся энергетических нагрузок. Определение этих параметров стало возможным благодаря обобщению накопленного широкого опыта, сформированной базы данных и установленных регрессионных соотношений, описывающих установленные в работе процессы старения диэлектрических материалов и связывающих их с основными диагностическими параметрами (R , TPI , PI , DD). Модуль экспертной системы, выполняющий расчет характеристик изоляционной системы определяющих эксплуатационную надежность оборудования в целом представлен на рис. 7.

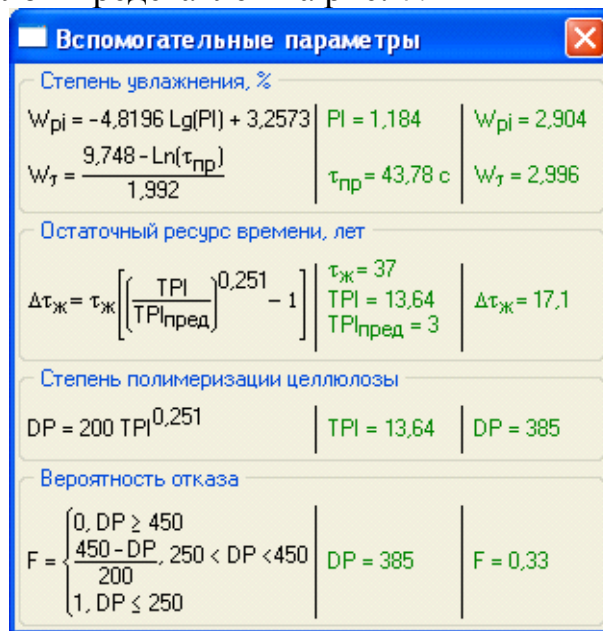


Рис. 7. Уточняющие и корректирующие мероприятия

В итоге сочетание современного диагностического оборудования, традиционных и не стандартных методов оценки состояния, а также многопараметрический подход и созданная на его основе экспертная система дают возможность сделать заключение о работоспособности оборудования, содержащее возможные ответы на актуальные вопросы, стоящие перед современной диагностикой изоляционных систем высоковольтного энергетического оборудования. Основными моментами такого заключения выступают: указание работоспособности оборудования (определение состояния), выявление типа развивающегося дефекта в объеме изоляционной системы, его интенсивность и опасность, определение величины остаточного ресурса времени эксплуатации, выявление условий, позволяющих управлять сроком жизни оборудования.

Для подтверждения широких возможностей и эффективности применения описанной методики и программного продукта ЭКСИСО, реализующего ее алгоритмы, рассмотрим и проанализируем результаты многолетних (2006 – 2014гг.) наблюдений за состоянием изоляционного

промежутка ВН – СН, НН, БАК трансформатора Т-1 п/с Вязьма-1. Все представленные ниже данные получены с помощью информационно-экспертной системы ЭКСИСО.

Характер изменения значений основных параметров контроля представлен в таблице 1.

Таблица 1.

Значения параметров контроля изоляционного промежутка ВН – СН, НН, Бак трансформатора Т-1 п/с Вязьма-1 в период 2008 – 2014гг.

Год выпуска	Возраст, лет	R, ГОм	PI	DD	TPI	$\sigma_{тн}$, нА
2006	32	1,878	1,182	7,158	13,82	3,996
2008	34	1,239	1,082	9,360	11,07	9,644
2009	35	1,325	1,128	7,437	10,66	8,710
2010	36	1,595	1,181	7,774	13,67	1,622
2011	37	1,680	1,184	7,116	13,64	8,226
2012	38	0,978	1,025	9,564	2,583	1,616
2014	40	0,961	1,134	10,89	10,27	0,722

Результаты, приведенные в таблице, показывают, что значения величины электрического сопротивления и обобщенного индекса поляризации уменьшались в период с 2006 по 2009 г., свидетельствуя о повышении электропроводности изоляционных материалов, обусловленной повышенной степенью увлажнения W (см. таблица 2) и загрязнения продуктами распада, работающих диэлектрических компонентов. Увеличение степени неоднородности, обусловленной загрязнением продуктами распада изоляционных материалов, подтверждается также существенным возрастанием (более чем в 2 раза) величины токовой нестабильности $\sigma_{тн}$.

Использование техноценологического подхода (метод рангового распределения) указывают также на ухудшение состояния в период с 2006 по 2009 гг. (таблица 2).

Применение метода скользящего среднего, реализованного в ЭКСИСО в виде отдельного модуля программы, показывает, что в данный временной промежуток (2006 – 2009гг.) состояние изоляционного промежутка действительно ухудшается (рис. 8). Использование метода треугольника возможных состояний (рис. 9) позволяет отследить изменение во времени природы основного вида дефекта, развивающегося в объеме изоляционного промежутка. Исходя из имеющихся результатов видно, что в данный временной отрезок времени преобладающими механизмами старения компонентов изоляции остаются электрические (ионизационные) и термические, однако наблюдается четкая тенденция смещения в сторону области ТЗ, для которой характерны высокотемпературные механизмы старения ($T \geq 700$ °C), обусловленные высокой степенью увлажнения и загрязнения продуктами распада изоляционного промежутка.

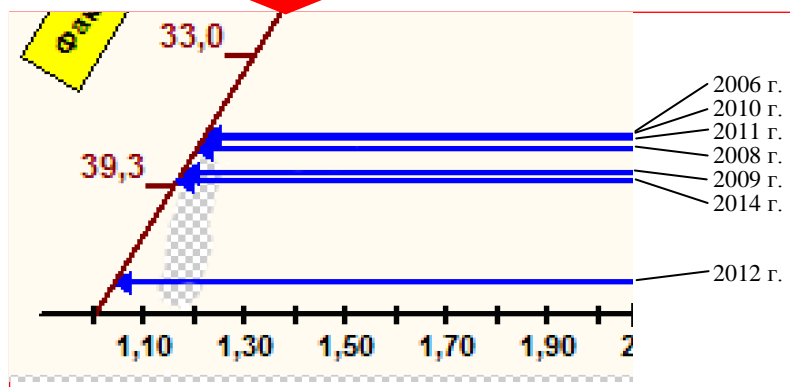
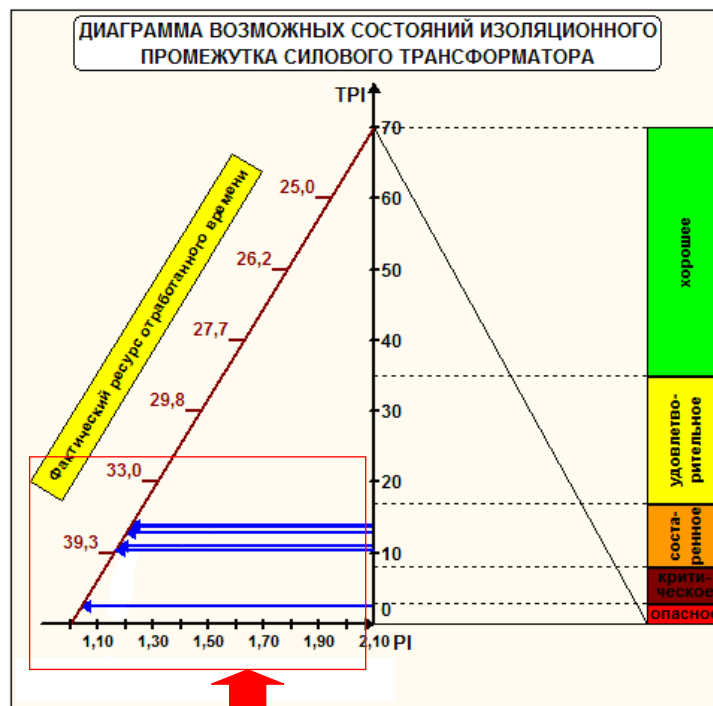


Рис. 8. Применение метода скользящего среднего

Исследование спектров токов поляризации показывает, что в период с 2006 – 2009гг. протекающие процессы старения отложили свой существенный след и на спектре токов поляризации (рис. 10). По мере загрязнения изоляционного промежутка продуктами распада роль барьера существенно снижается, приводя к смещению положения основного максимума в сторону больших временных интервалов. Кроме того, повышенная степень увлажнения снижает формируемый в объеме промежутка заряд (ТРІ).

Наблюдаемы закономерности изменения спектра токов поляризации, еще раз подтверждают их высокую чувствительность к наличию в структуре изоляционного промежутка дефектам.

Использование метода назначенного лидера, реализованного в ЭКСИСО, позволяет достаточно быстро и эффективно определить численное соответствие (k_c) формы спектра токов поляризации некоторому базовому спектру и тем самым судить о интенсивности развивающегося в объеме изоляционного промежутка дефекте (таблица 2).

Таблица 2.

Вспомогательные, уточняющие и подтверждающие параметры контроля

Год выпуска	k_c	Ранг ТРІ	W_{τ} , %	W_{PI} , %	$\Delta\tau_{ж}$, лет	DP	F
2006	0,547	46	2,94	2,91	15	350 – 390	0,36
2008	0,47	55	3,14	3,09	13		0,47
2009	0,493	56	3,10	3,01	13		0,49
2010	0,462	47	3,09	2,91	16		0,37
2011	0,454	48	2,99	2,90	17		0,37
2012	0,361	79	2,91	3,20	–		–
2014	0,423	57	3,25	2,99	14		0,50

Использование уточняющих и подтверждающих процедур позволяют более точно охарактеризовать установленное состояние и сформировать тем самым корректирующие мероприятия (таблица 2).

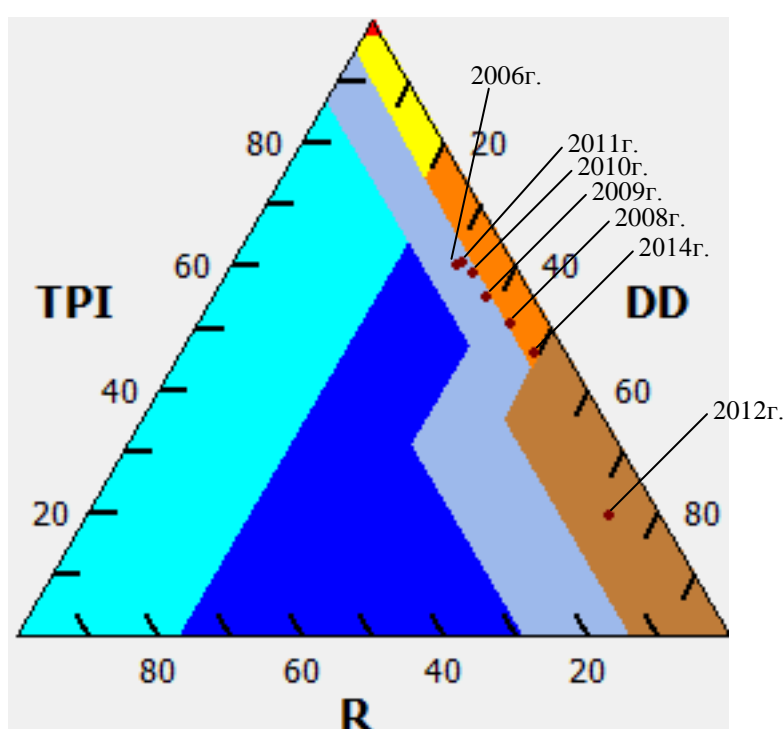


Рис. 9. Использование треугольника возможных состояний

Обнаруженные закономерности и тенденции ухудшения состояния, работающего оборудования, были изложены в техническом отчете представленным в организацию, осуществляющую его обслуживание.

Выполненные сотрудниками обслуживающей компании корректирующие мероприятия, включающие повышение эффективности работы системы очистки и охлаждения масла, позволили в последующие два года восстановить состояние промежутка почти до уровня 2006 года (рис. 9). Хотя состояние промежутка оставалась почти на уровне 2006 года (рис. 8), разрядная активность (таблица 1) повысилась почти до уровня 2008 года. Это было свидетельством того, что источник (место локализации развивающегося дефекта) ухудшения трансформаторного

масла находится вне объема контролируемого изоляционного промежутка.

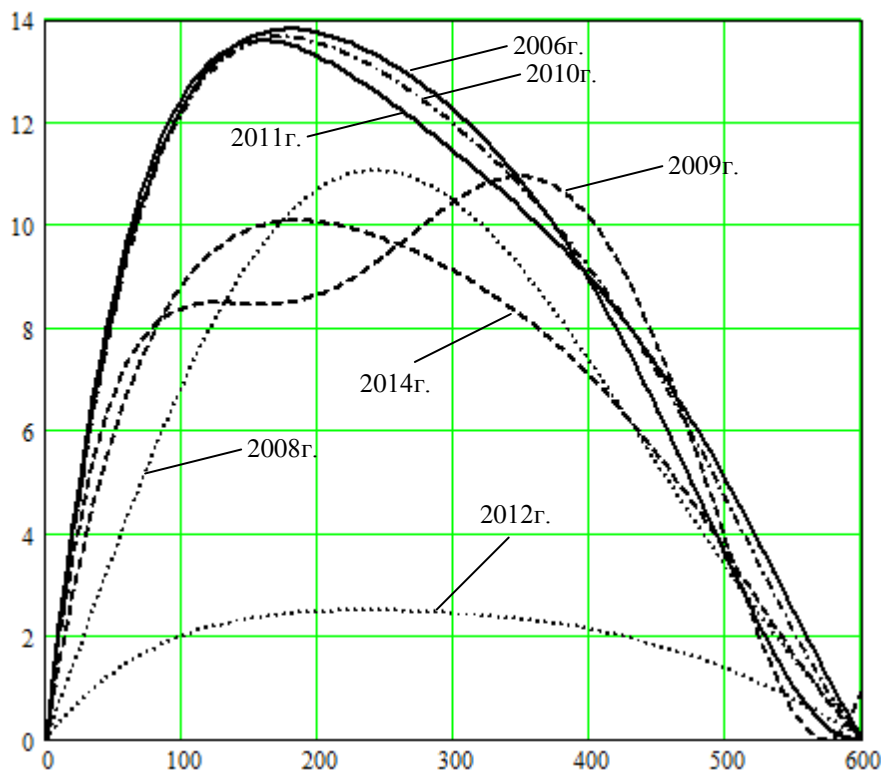


Рис. 10. Спектры токов поляризации исследуемого изоляционного промежутка трансформатора Т-1 п/с Вязьма-1

Результаты испытаний 2012 года показали катастрофическое ухудшение свойств материалов промежутка: сопротивление изоляции R уменьшилось практически в два раза, граница раздела бумага-масло перестала быть причиной развития структурной поляризации, а величина объемного заряда, накопленного в масляной прослойке оказалась недостаточно высокой. Треугольник состояний однозначно указывает на сильнейший разогрев материалов, работающих в промежутке. Не очень высокая разрядная активность в данном случае объясняется повышенной проводимостью изоляционного промежутка.

Выполненные вновь в 2013г. операции по регенерации трансформаторного масла и замене силикагеля, позволили существенным образом улучшить состояние изоляционного промежутка в 2014г. (рис. 8) по сравнению с 2012г. и сместить основной механизм старения в область более низких температур (рис. 9).

В целом к 2014г. состояние изоляционного промежутка ухудшилось существенным образом по сравнению с 2006г.: процессы структурной поляризации снизились, и возросла доля объемного заряда формируемого в трансформаторном масле, о чем свидетельствует смещение положения основного максимума во времени (рис. 10). Возросшая электропроводность изоляционных материалов находит отражение и на

величине ТРІ. При этом резко возросла вероятность отказа оборудования от 0,36 – 0,50.

Однако, выполнение корректирующих мероприятий, состояния изоляционной системы позволили практически оставить (зафиксировать) на уровне 14-15 лет остаточный ресурс времени, установленный как в 2006, так и в 2014гг.

Таким образом, созданная экспертная система контроля состояния изоляционной системы оборудования («ЭСКСИСО»), реализующая уникальные диагностические методы и алгоритмы, позволяет решать, имеющиеся в энергетической сфере проблемы, на современном научно-техническом уровне.

Отличительной особенностью которой выступает возможность получения необходимой информации об эксплуатационных параметрах, определяющих надежность и длительность работы, а также обеспечивающих высокую эффективность обслуживания силового энергетического оборудования. Заключение, формируемое экспертной системой, содержит актуальную информацию о: 1) наличии и типе дефекта, развивающегося в объеме изоляционной системы; 2) его интенсивности и опасности; 3) значениях показателей, отражающих надежность и работоспособность объекта исследований (W – степень увлажнения диэлектрических материалов, $\Delta\tau_{ж}$ – остаточный ресурс времени, DP – степень полимеризации целлюлозы и др.); 4) величине достоверности сформированного заключения; 5) обобщенном показателе качества (индекса состояния) диэлектрической системы, позволяющего на количественном уровне характеризовать установленное состояние.

Литература

1. Чернышев В.А., Кисляков М.А. Многопараметрическая оценка состояния изоляционной системы высоковольтного оборудования по результатам измерения токов поляризации // Материалы конференции «Эффективность методов и средств диагностирования силового электрооборудования». – Екатеринбург, 2012

2. Кисляков М.А., Чернов В.А., Чернышев В.А. Программное обеспечение оценки состояния эксплуатируемого маслonaполненного энергетического оборудования, основанной на анализе токов поляризации // Энергетика, информатика, инновации – 2013 – ЭИИ-2013. В 2 томах. Том 1. Секции 1,2,3,4. Смоленск: Универсум, 2013. – 490 с.: ил (с.43-47).

3. Зенова Е.В., Чернышев В.А., Кисляков М.А., Посохин А.В. Оценка и прогнозирование состояния изоляционных промежутков энергетического оборудования высокого напряжения // Вестник МЭИ. Теоретический и научно-практический журнал. М.: «Издательский дом МЭИ». – №2, 2011. – с. 40 – 44.

4. Зенова Е.В., Чернышев В.А., Тагаченков А.М., Кисляков М.А. Формирование обобщенного индекса поляризации как параметра контроля состояния изоляционных промежутков // Электротехника №11 2010, с. 48 – 52.