

УДК 621.314.212

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

Диагностическая система ЭКСИСО, предназначенная для оценки состояния изоляционной системы маслонаполненного оборудования

V. A. Chernyshev, M. A. Kislyakov, V. A. Chernov,
N. D. Karpechenkov, V. N. Osotov, A. E. Uteпов

The ESKSISO diagnostic system intended for assessment of insulating system of the oil-filled equipment

Аннотация. Представлена экспертная система (ЭС), предназначенная для оценки состояния изоляционной системы маслонаполненных трансформаторов. ЭС основана на анализе процессов поляризации и деполяризации, протекающих в объеме изоляционных промежутков энергетического оборудования, позволяет эффективно сформировать заключение о состоянии контролируемого объекта, так как параметры контроля выступают не столько характеристиками материалов, сколько характеристиками процессов старения диэлектрических конструкций. Отличительной особенностью ЭС является возможность получения необходимой информации об эксплуатационных параметрах, определяющих надежность и длительность работы, а также обеспечивающих высокую эффективность обслуживания силового энергетического оборудования.

Abstract. The expert system (ES) intended for assessment of condition of the insulating system of oil-filled transformers has been presented. ES is based on the analysis of the processes of polarization and depolarization proceeding in volume of insulating intervals of the power equipment; it allows to create effectively the conclusion about a condition of controlled object as parameters of control act not so much as characteristics of materials but as characteristics of processes of dielectric designs' aging. A distinctive feature of expert system is the possibility to obtain necessary information about operation parameters defining reliability and duration of work and providing high efficiency of power equipment service.

Ключевые слова: экспертная система, маслонаполненное оборудование, токи поляризации и деполяризации.
Key words: expert system, oil-filled equipment, currents of polarization and depolarization.

Введение

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, невозможность эксплуатации и обслуживания в прежних режимах, во-вторых, повышение надежности снабжения потребителей, в-третьих, сокращение расходов на ремонт энергетического оборудования за счет повышения обоснованности 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 выработала расчетный срок эксплуатации. Причем, как показывает практика, большинство таких трансформаторов не требует замены и может находиться в эксплуатации и дальше при 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 др.), 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, следовательно, с большей вероятностью оценить срок дальнейшей эксплуатации объекта.

Другая значительная проблема при оценке состояния – 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.

Результаты и обсуждение

В ходе многолетних исследований силовых маслонаполненных 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, накоплена обширная база данных, на основе которой была создана экспертная система ЭКСИСО, позволяющая оценить не только состояние объекта, тип дефекта, но и, что более важно, – остаточный ресурс и время дальнейшей безопасной эксплуатации, сформировать корректирующие мероприятия.

Экспертная система контроля состояния изоляционной системы оборудования ЭКСИСО создана в интегрированной среде разработки программного обеспечения CodeGear RAD Studio 2009 (Delphi 2009) [2]. 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. Под контролем в экспертной системе находится изоляционный промежуток в целом, но возможно отдельное исследование пробы трансформаторного масла. ЭКСИСО 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.

Основной 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).

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 структурирования функций качества.

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

В основе диаграммы лежит устойчивая связь ТРІ с индексом поляризации, значения которого проранжированы в зависимости от состояния изоляционной системы, что позволило в итоге построить семантическую шкалу состояний, соответствующую измеренным значениям ТРІ. Диаграмма снабжена шкалами, устанавливающими соответствие между значениями ТРІ и среднестатистическими величинами времени жизни, а также между значениями РІ 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 [3].

3. Метод треугольника возможных состояний, позволяющий классифицировать состояние промежутка, отнеся его к одной из допустимых классификационных областей, каждой из которых поставлен в соответствие определенный вид развивающегося дефекта. В предлагаемой методике используются три независимых параметра (ТРІ, R, DD), на основе которых исследуемый изоляционный промежуток можно отнести к одной из семи областей (рис. 5).

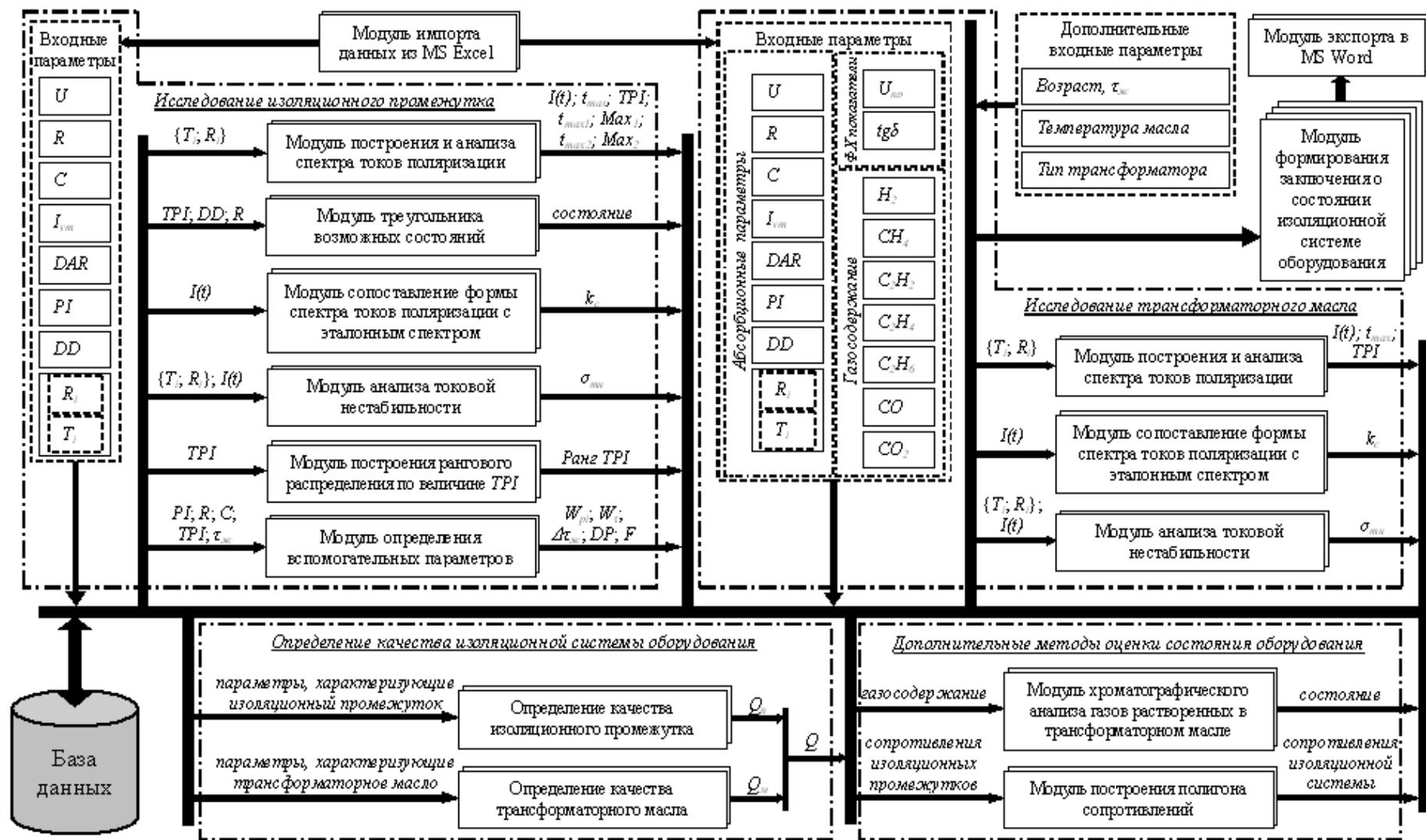


Рис. 1. Структурная схема экспертной системы



Рис. 2. Алгоритм определения состояния и формирования заключения

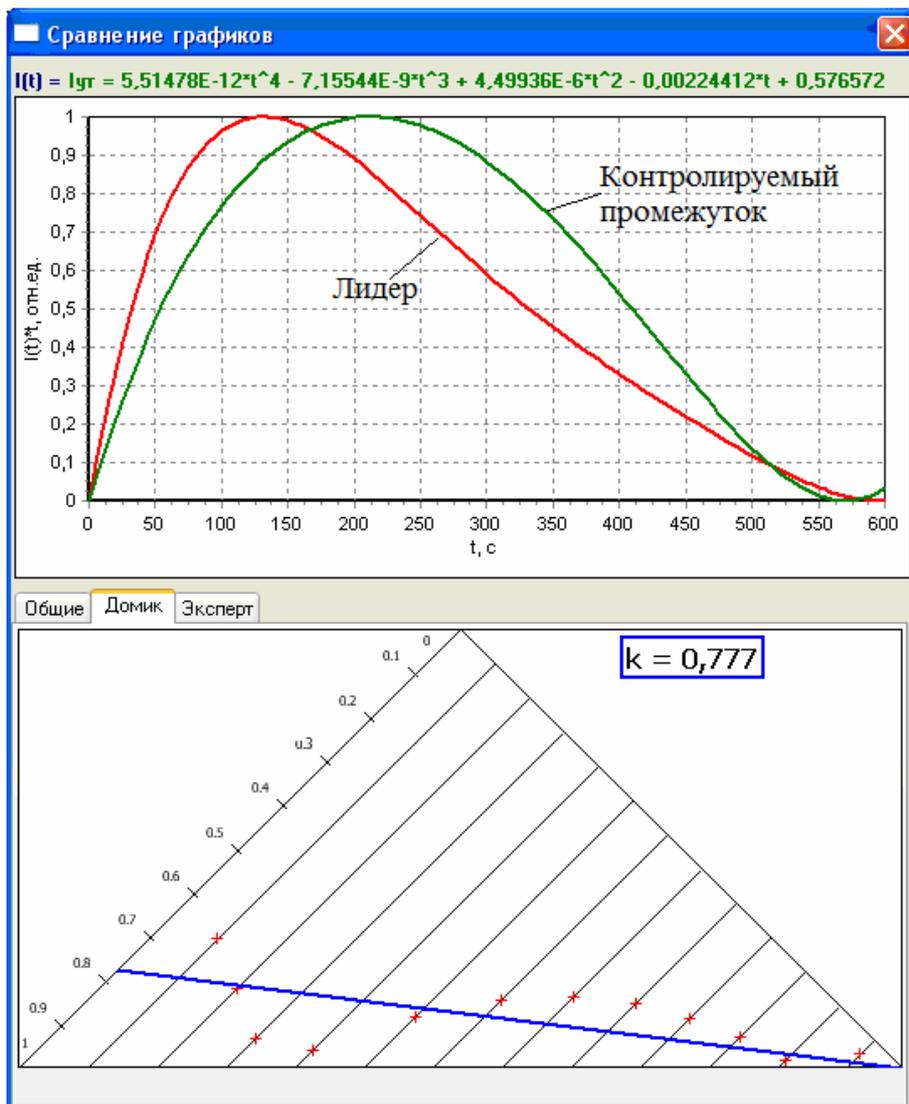


Рис. 3. Сопоставление поляризационных спектров

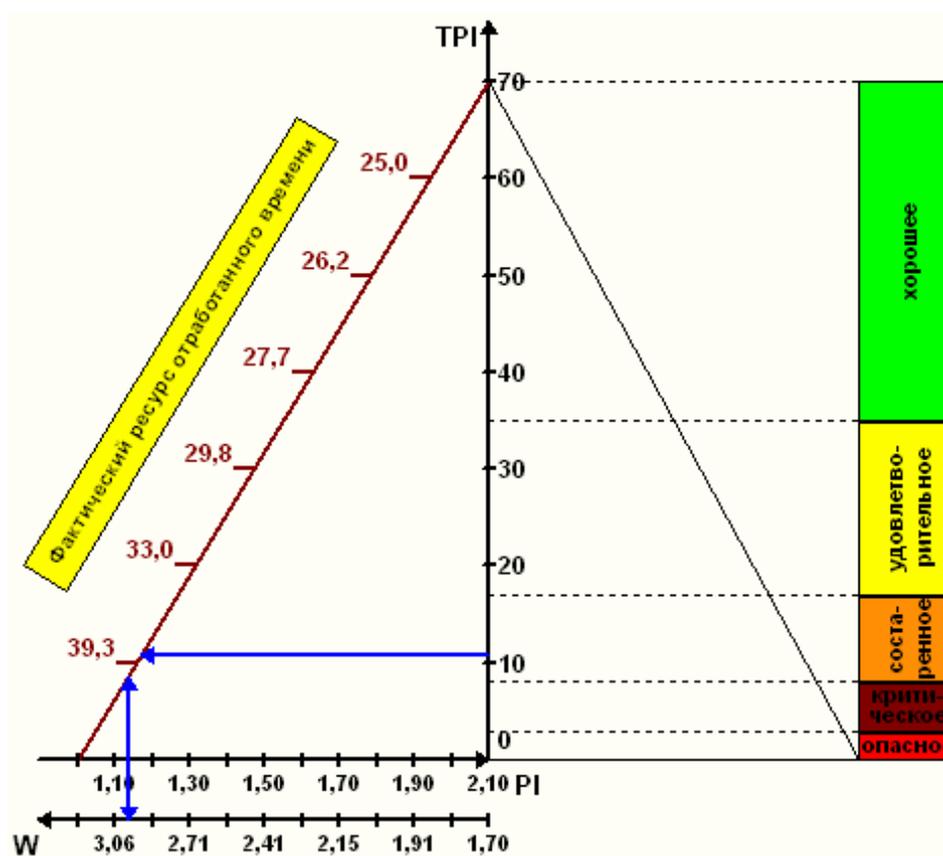


Рис. 4. Диаграмма возможных состояний изоляционных промежутков силовых трансформаторов

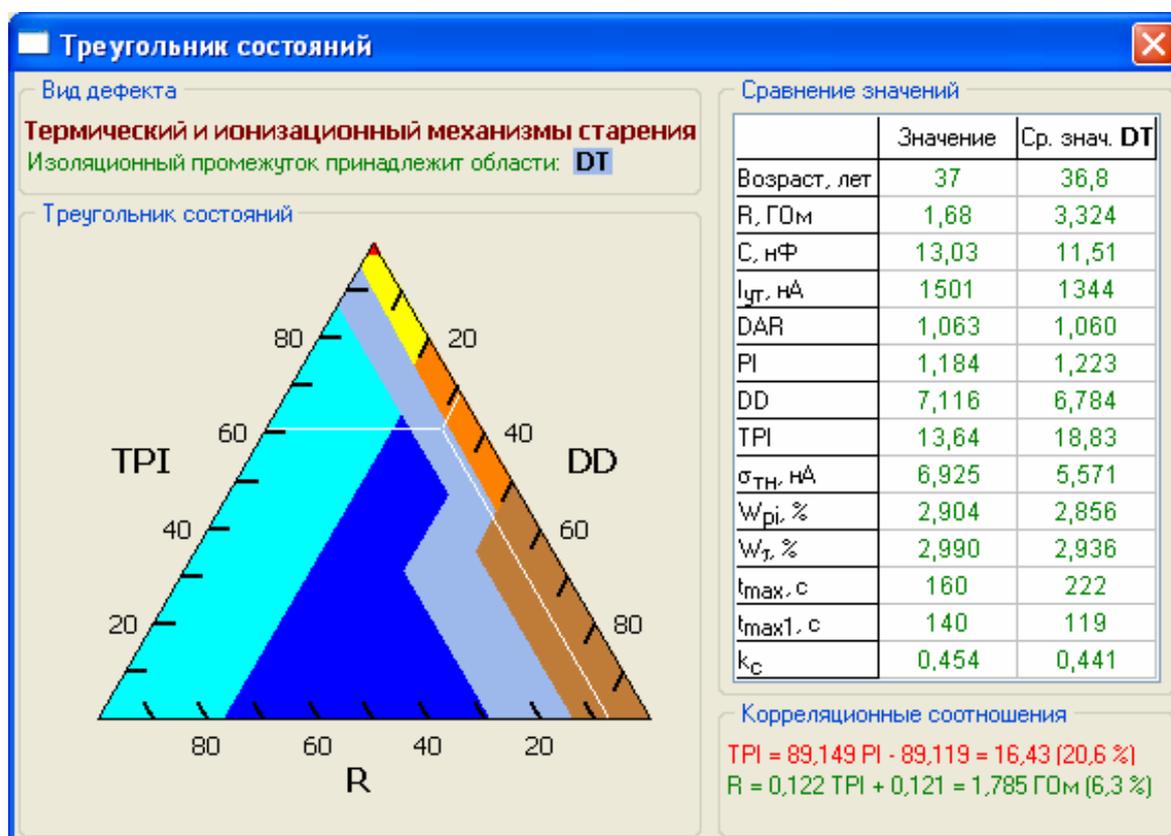


Рис. 5. Метод "треугольника возможных состояний"

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 ТРІ позволяет выделить доверительный интервал для ранжируемого значения ТРІ 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.

Входным параметром данного метода, реализующего техноценологический подход (рис. 6), является обобщенный индекс поляризации (ТРІ) [3], результатом служит определение принадлежности промежутка к одной из указанных выше областей.

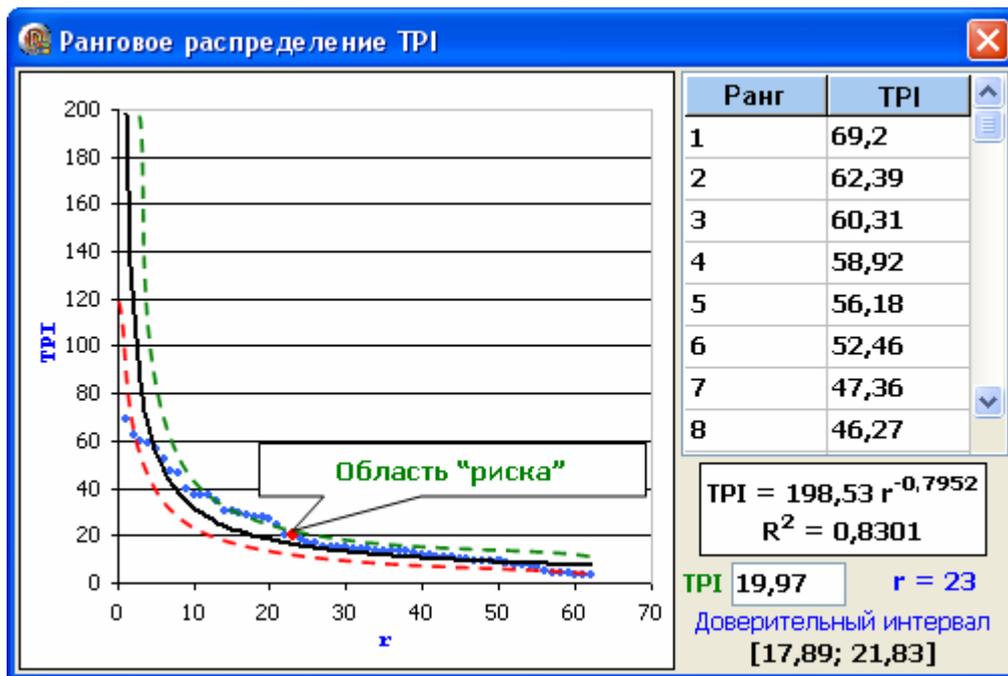


Рис. 6. Ранговое распределение изоляционных промежутков по значению ТРІ

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 , ТРІ, PI, DD). Модуль экспертной системы, выполняющий расчет характеристик изоляционной системы, определяющих эксплуатационную надежность оборудования в целом, представлен на рис. 7.

В итоге сочетание современного диагностического оборудования, традиционных и нестандартных 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.

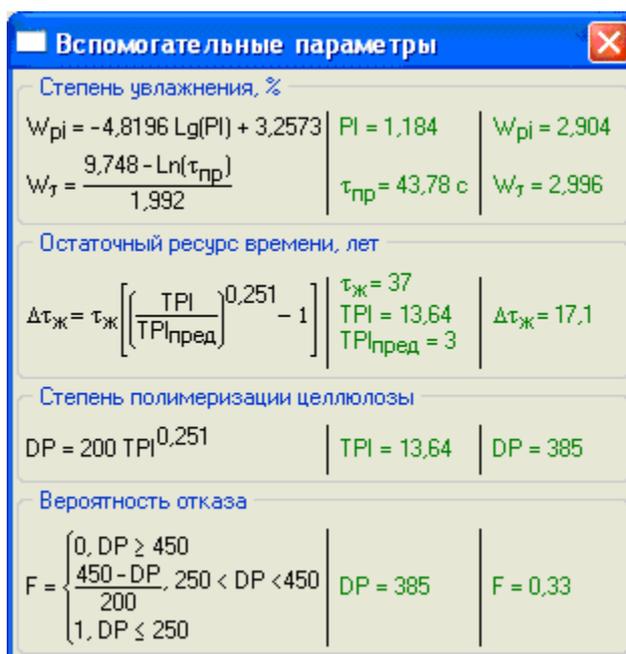


Рис. 7. Уточняющие и корректирующие мероприятия

Для подтверждения широких возможностей и эффективности применения описанной методики и программного продукта ЭКСИСО, реализующего ее алгоритмы, рассмотрим и проанализируем результаты многолетних (2006–2014 гг.) 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 табл. 1.

Таблица 1

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

Год испытания	Возраст, лет	R, ГОм	PI	DD	TPI	$\sigma_{\text{нн}}$, 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 табл. 1, 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 (табл. 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 $\sigma_{\text{нн}}$.

Исследования, проведенные с помощью техноценологического подхода (метод рангового распределения), указывают также на ухудшение состояния в период с 2006 по 2009 гг. (табл. 2).

Применение метода скользящего среднего, реализованного в ЭКСИСО в виде отдельного модуля программы, показывает, что в данный период времени (2006–2009 гг.) 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. Результаты исследований показывают, 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 ($T \geq 700 \text{ }^\circ\text{C}$), обусловленные высокой степенью увлажнения и загрязнения продуктами распада изоляционного промежутка.

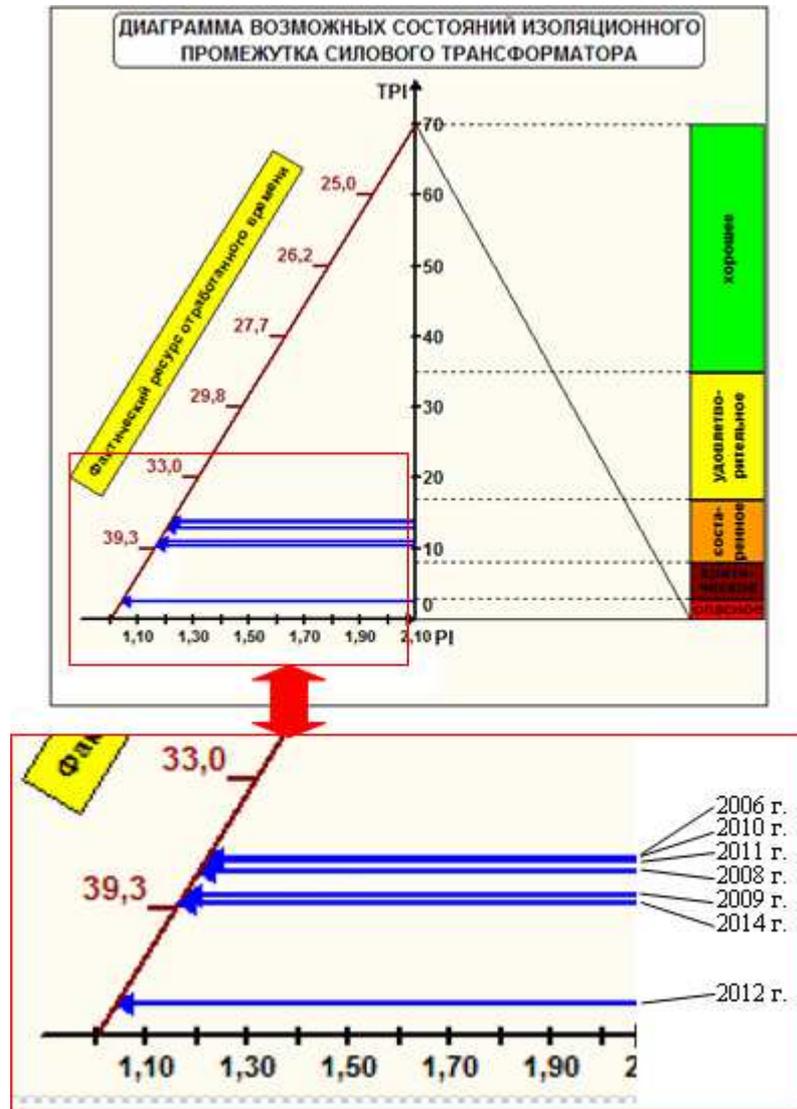


Рис. 8. Применение метода скользящего среднего

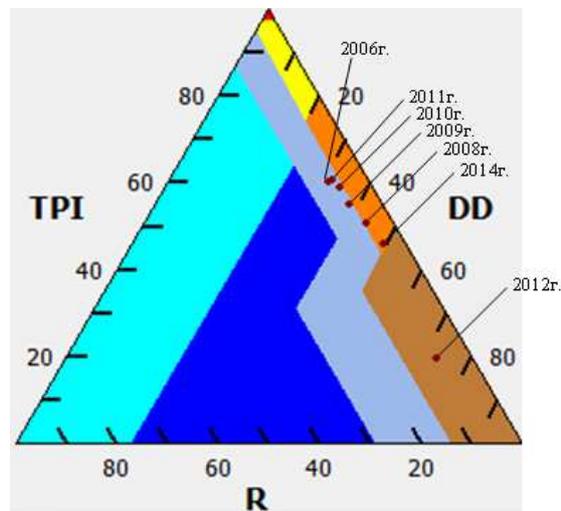


Рис. 9. Использование треугольника возможных состояний

Исследование спектров токов поляризации показывает, что в период 2006–2009 гг. 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 (ТПИ).

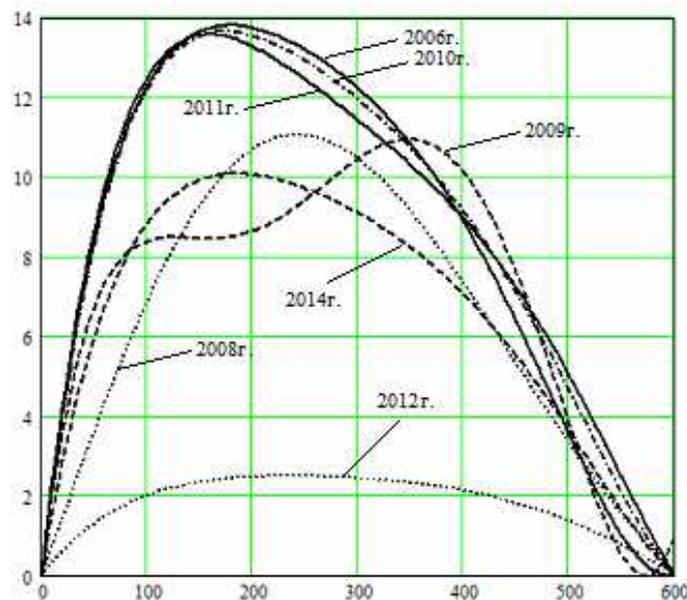


Рис. 10. Спектры токов поляризации исследуемого изоляционного промежутка трансформатора Т-1 п/с Вязьма-1

Наблюдаемые закономерности изменения спектра токов поляризации еще раз подтверждают их высокую чувствительность к наличию в структуре изоляционного промежутка дефекта.

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

Таблица 2

Вспомогательные, уточняющие и подтверждающие параметры контроля

Год испытания	k_c	Ранг ТПИ	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 позволяет более точно охарактеризовать установленное состояние и сформировать тем самым корректирующие мероприятия (табл. 2).

Обнаруженные закономерности и тенденции ухудшения состояния работающего оборудования были изложены в техническом отчете, представленном 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 г. (рис. 9). Хотя состояние промежутка оставалось почти на уровне 2006 г. (рис. 8), анализ разрядной активности (табл. 1) повысился почти до уровня 2008 г. Это является свидетельством того, что источник (место локализации развивающегося

дефекта) ухудшения трансформаторного масла находится вне объема контролируемого изоляционного промежутка.

Результаты испытаний 2012 г. 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 сильнейший разогрев материалов, работающих в промежутке. Не очень высокая разрядная активность в данном случае объясняется повышенной проводимостью изоляционного промежутка.

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

В целом по сравнению с 2006 г. к 2014 г. состояние изоляционного промежутка ухудшилось существенным образом: процессы структурной поляризации снизились, 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 на величине ТРІ. При этом резко возросла вероятность отказа оборудования: от 0,36 до 0,50.

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

Заключение

Таким образом, созданная ЭС 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 ЭС 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 следующую актуальную информацию: 1) наличие и тип дефекта, развивающегося в объеме изоляционной системы; 2) его интенсивность и опасность; 3) значения 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) величина достоверности сформированного заключения; 5) обобщенный показатель качества (индекс состояния) диэлектрической системы, позволяющий на количественном уровне характеризовать установленное состояние.

Библиографический список

1. Чернышев В. А., Кисляков М. А. Многопараметрическая оценка состояния изоляционной системы высоковольтного оборудования по результатам измерения токов поляризации // Эффективность методов и средств диагностирования силового электрооборудования : мат. конф. Екатеринбург, 2012.
2. Кисляков М. А., Чернов В. А., Чернышев В. А. Программное обеспечение оценки состояния эксплуатируемого маслонеполненного энергетического оборудования, основанной на анализе токов поляризации // Энергетика, информатика, инновации – 2013 – ЭИИ-2013. В 2 т. Том 1. Смоленск, 2013. С. 43–47.
3. Формирование обобщенного индекса поляризации как параметра контроля состояния изоляционных промежутков / Зенова Е. В. [и др.] // Электротехника. 2010. № 11. С. 48–52.

References

1. Chernyshev V. A., Kislyakov M. A. Mnogoparametricheskaya otsenka sostoyaniya izolyatsionnoy sistemy vysokovoltного oborudovaniya po rezultatam izmereniya tokov polyarizatsii [Multiparameter assessment of the insulation system of high voltage equipment by measuring the polarization currents] // Effektivnost metodov i sredstv diagnostirovaniya silovogo elektrooborudovaniya : mat. konf. Ekaterinburg, 2012.
2. Kislyakov M. A., Chernov V. A., Chernyshev V. A. Programmnoe obespechenie otsenki sostoyaniya ekspluatiruемого maslonapolnennogo energeticheskogo oborudovaniya, osnovannoy na analize tokov polyarizatsii [Software assess of the state of the exploited oil-filled power equipment based on analysis of the current polarization] // Energetika, informatika, innovatsii – 2013 – EII-2013. V 2 t. Tom 1. Smolensk, 2013. P. 43–47.
3. Formirovanie obobschennogo indeksa polyarizatsii kak parametra kontrolya sostoyaniya izolyatsionnyh promezhutkov [Formation of the generalized polarization index as a parameter monitoring insulation spaces] / Zenova E. V. [i dr.] // Elektrotehnika. 2010. N 11. P. 48–52.

Сведения об авторах

Чернышев Валентин Александрович – филиал ФГБОУ ВО "НИУ «МЭИ»" в г. Смоленске, кафедра теоретических основ электротехники, д-р техн. наук, профессор; e-mail: v.a.chern@mail.ru

Chernyshev V. A. – National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Smolensk Branch, Department of Theory of Electrical Engineering, Dr of Tech. Sci.; e-mail: v.a.chern@mail.ru

Кисляков Максим Анатольевич – филиал ФГБОУ ВО "НИУ «МЭИ»" в г. Смоленске, кафедра теоретических основ электротехники; e-mail: kisljakow@mail.ru

Kislyakov M. A. – National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Smolensk Branch, Department of Theory of Electrical Engineering; e-mail: kisljakow@mail.ru

Чернов Валерий Александрович – филиал ФГБОУ ВО "НИУ «МЭИ»" в г. Смоленске, кафедра теоретических основ электротехники, канд. техн. наук, доцент; e-mail: chern.val@mail.ru

Chernov V. A. – National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Smolensk Branch, Department of Theory of Electrical Engineering, Cand. of Tech. Sci.; e-mail: chern.val@mail.ru

Карпеченков Николай Данилович – МРСК-Центра Смоленский филиал, инженер; e-mail: Karpechenkov.ND@mrsk-1.ru

Karpechenkov N. D. – Interregional Distribution Grid Company of Centre, Smolensk Branch, Engineer; e-mail: Karpechenkov.ND@mrsk-1.ru

Осотов Вадим Никифорович – ОАО "Свердлоэлектроремонт", канд. техн. наук, доцент

Osotov V. N. – Joint-Stock Company "Sverdlovelectroremont", Cand. of Tech. Sci., Associate Professor

Утепов Алексей Ерламович – ОАО "Свердлоэлектроремонт", e-mail: A.Utepov@ies-holding.com

Utepov A. E. – Joint-Stock Company "Sverdlovelectroremont", e-mail: A.Utepov@ies-holding.com