

О СОЗДАНИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

М. Р. ДЖЕБРИЛ *, Т. В. ЛОПУХОВА *, И. С. ИСЛЕНТЬЕВ **

Казанский государственный энергетический университет,*
Филиал Сетевой компании Казанские электрические сети**

В статье рассмотрены сведения о диагностической модели, ее типах и принципах ее построения. Отражена структура и алгоритм работы диагностической модели и перечислены основные признаки повреждений в отдельных элементах силового трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор (СТ), диагностическая модель (ДМ), принципы разработки ДМ, признаки повреждений.

Введение

В настоящее время существует множество литературы по диагностике силовых трансформаторов. Основной задачей диагностирования является своевременное обнаружение и поиск дефектов, т.е. определение их наличия, характера и местонахождения. Это производится путем соответствующих испытаний. Алгоритм диагностирования, определяющий объем, последовательность и взаимосвязь испытания объекта, устанавливается исходя из его диагностической модели (ДМ).

Согласно ГОСТу 20911-89 «Термины и определения» диагностическая модель определяется как «формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования. Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической или другой форме» [2]. Модель строится на основании изучения конструкции оборудования данного типа и опыта его эксплуатации. Различают два типа диагностических моделей – информационная и функциональная. Информационная ДМ разрабатывается для объектов, которые могут быть заданы функционально конструктивными блоками, представлять собой описание информационных потоков, циркулирующих в оборудовании. Функциональная ДМ отражает совокупность операций, выполняемых оборудованием и его отдельными частями в процессе функционирования. В качестве функциональных моделей могут рассматриваться схемы связей, диаграммы прохождения сигналов или алгоритмы функционирования [1].

Информационная ДМ трансформатора может представлять собой связь информационных потоков между условиями работы трансформатора, возникающими под воздействием различных факторов, дефектами трансформаторов и их признаками, методами и способами выявления дефектов, и средствами диагностирования.

Проблема заключается в том, что при большом количестве информации о дефектах силовых трансформаторов (СТ), большом числе существующих методов выявления дефектов не существует научно обоснованной хорошо структурированной диагностической модели СТ. Создание такой модели позволит разработать удобную компьютерную экспертную систему по оценке технического состояния СТ.

Принципы разработки диагностической модели силового трансформатора

Разработка той или иной диагностической модели должна строиться на принципах, которые, в свою очередь, обеспечивают ее объективность. Это принципы

системности, соответствия, достоверности и последовательности диагностических процедур.

Принцип соответствия. В диагностической модели должен сохраняться принцип соответствия, проистекающий из причинно-следственных связей. Например: вид дефекта – увлажнение масла – показатель – уменьшение $U_{пр}$ – метод диагностики – анализ силокогеля – способ измерения – определение влагометром.

Принцип системности. Диагностическая модель должна представлять собой определенную систему, которая характеризуется рядом критериев. У системы есть внутренние связи, внешние связи с другими системами или объектами, определенная иерархия. Количество элементов системы должно быть необходимо и достаточно для реализации её цели.

Принцип соответствия. В диагностической модели должен сохраняться принцип соответствия, проистекающий из причинно-следственных связей. Например: вид дефекта – увлажнение масла – показатель – уменьшение $U_{пр}$ – метод диагностики – анализ силокогеля – способ измерения – определение влагометром.

Принцип достоверности. Применяемые методы диагностики достоверности не всегда обеспечивают полную достоверность оценки состояния объекта. Результаты измерений включают в себя ошибки, определяемые погрешностями приборов и влиянием помех. Поэтому всегда существует вероятность получения ложного результата контроля:

исправный объект будет признан негодным (ложный дефект);

неисправный объект будет признан годным (необнаруженный дефект).

Достоверность метода определяется степенью связи технического состояния объекта с отображающими его параметрами. Как правило, эта связь – вероятностная. Кроме того, существует неоднозначность связи значений контролируемых параметров с состоянием объекта при различных видах дефектов. Все это создает ошибки диагностирования, связанные с несовершенством методов контроля.

Установление соответствия дефектов, показателей состояния, методов и средств измерения позволяет повысить достоверность диагностики.

Необходимо отказаться от методов заведомо недостоверных по данным опыта эксплуатации, использовать современную измерительную технику.

Принцип последовательности диагностических процедур. Диагностическая модель должна содержать определенную последовательность, чтобы быстро и точно можно было определить тот или иной дефект. Предлагается следующая последовательность: вид дефекта – признаки дефекта – методы выявления дефекта – методика дефектоскопии, в том числе способы измерения и диагностические процедуры, – заключение о техническом состоянии СТ и рекомендации.

Структура предлагаемой нами модели строится на следующей последовательности: возможный дефект – признаки данного дефекта – методы выявления дефекта – методики дефектоскопии, содержащие алгоритм и средства диагностирования, – заключение о состоянии объекта (рис.1).

Возможные дефекты силовых трансформаторов

Говоря о возможных дефектах, можно привести данные статистики одной из ведущих организаций в сфере мониторинга и диагностики силовых трансформаторов и автотрансформаторов – НИЦ «ЗТЗ Сервис». На основании этих данных построено процентное соотношение количества дефектов в отдельных элементах СТ к общему числу дефектов СТ.

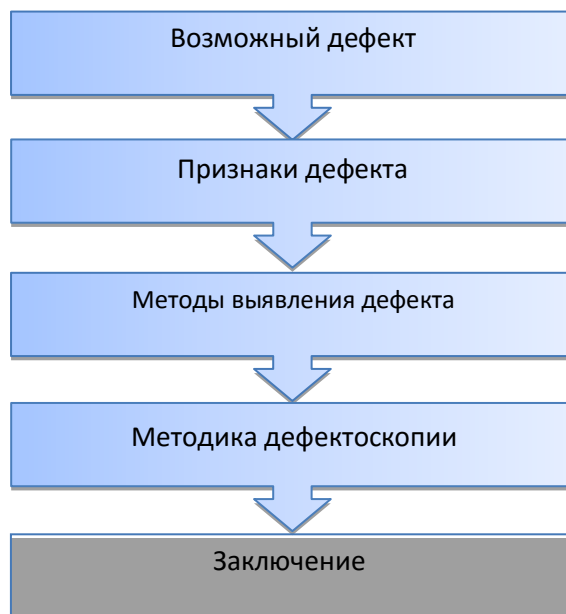


Рис. 1. Структура диагностической модели

Проведенные в последние годы в НИЦ «ЗТЗ-Сервис» исследования 106 трансформаторов с наработкой более 20 лет, эксплуатирующихся в России и на Украине, позволили выявить 643 дефекта, вид и место которых приведены в табл. 1 [4].

Таблица 1

Данные исследования трансформаторов НИЦ «ЗТЗ Сервис» [4]

Вид и место дефекта	Количество случаев	Доля, %
Система охлаждения	146	22,71
Высоковольтные вводы	92	14,31
Выделение газов в масло	58	9,02
Старение масла	48	7,47
Дефекты в устройстве РПН	46	7,15
Течи по уплотнениям	44	6,84
Распрессовка обмоток	42	6,53
Загрязнение твердой изоляции	34	5,29
Увлажнение твердой изоляции	26	4,04
Распрессовка магнитопровода	26	4,04

Загрязнение масла	14	2,18
Деформация обмоток	10	1,56
Повреждения в ШАОТ	8	1,24
Повышенная вибрация	8	1,24
Повреждения отводов	7	1,09
Повреждения магнитных шунтов	6	0,93
Повреждения устройства ПБВ	6	0,93
Окисление масла	4	0,62
Перегрев разъема	4	0,62
Нарушение герметичности	4	0,62

Эти данные показывают, что наибольшие неприятности в эксплуатации доставляют системы охлаждения, вводы и уплотнения (около 40 % выявленных дефектов). Заметное место (около 10 %) занимает распрессовка обмоток и магнитопровода, столько же – загрязнение и увлажнение твердой изоляции обмоток, столько же – старение и загрязнение масла.

Только в 10 случаях надо было заменить трансформатор полностью или его обмотки. Опыт обследований показывает, что более 70 % дефектов могут быть выявлены без отключения трансформатора от сети.

При рассмотрении признаков дефектов важно знать, в каком элементе трансформатора они возникают. В табл. 2 представлены основные элементы и детали трансформатора, виды и признаки повреждений.

Таблица 2

Элементы СТ, основные дефекты и их признаки

№	Элементы СТ	Основные виды повреждений - дефектов	Признаки возникновения дефектов
1	2	3	4
1.	Обмотки СТ	1. Деформация обмоток	- изменение сопротивления К.З. СТ; - изменение частотных характеристик обмотки СТ; - несовпадение осциллограмм различных фаз СТ при подаче на них низковольтных импульсов.
		2. Витковое замыкание	- работа газовой защиты на отключение СТ с выделением горючего газа бело-серого или синеватого цвета; - ненормальный нагрев СТ с характерным бульканьем; - неодинаковое сопротивление обмоток фаз при измерении их постоянным током, - сильное повышение температуры обмоток. - при значительных витковых замыканиях приводится в действие максимальная защита.

		3. Обрыв цепи	<ul style="list-style-type: none"> - увеличение тока намагничивания, - изменение сопротивления постоянному току, - частичные разряды в месте обрыва, - увеличение потерь Х.Х., - срабатывание газовой защиты.
		4. Замыкание обмотки на корпус СТ	<ul style="list-style-type: none"> - уменьшение сопротивления обмоток при измерении мегаомметром, - срабатывание газовой защиты в связи с процессами газообразования в масле, - местные повышения температуры.
		5. Увлажнение и загрязнение изоляции	<ul style="list-style-type: none"> - уменьшение сопротивления, - увеличение емкости, - увеличение $\text{tg } \delta$, - повышение температуры, - снижение $U_{\text{пр}}$ масла, - изменение химического состава, - возникновение частичных разрядов.
2.	Магнито-провод	1. «Пожар стали» магнитопровода	<ul style="list-style-type: none"> - повышение температуры СТ, - появление газа черного или бурого цвета в газовом реле, воспламеняющегося при поджоге, - масло меняет цвет, становится темным и имеет резкий специфический запах вследствие разложения (крекинг-процесс).
		2. Замыкание отдельных листов магнитопровода	<ul style="list-style-type: none"> - увеличение тока и потерь холостого хода, - быстрое ухудшение состояния масла, - понижение его температуры вспышки, - повышение кислотности масла и понижение пробивного напряжения.
		3. Ослабление прессовки листов магнитопровода	<ul style="list-style-type: none"> - ненормальное гудение, дребезжание, жужжание. - эти же признаки могут быть и следствием повышения напряжения против нормального первичного.
		4. Обрыв заземления	<ul style="list-style-type: none"> - треск внутри СТ, из-за разряда обмотки или ее отводов на корпус; - при неправильном восстановлении могут возникнуть короткозамкнутые контуры, в которых могут появиться циркулирующие токи.
3.	Бак и расширитель СТ	Повреждение бака и расширителя	<ul style="list-style-type: none"> - потеки масла на баке и расширителя, - масляные пятна под трансформатором, - течь масла из трещин, сварных швов, прокладок.
4.	Масло в СТ	1. Нагрев масла	<ul style="list-style-type: none"> - появление различных газов в масле, - ухудшение физических и химических свойств масла: уменьшение пробивного напряжения масла, газовыделение, - работа газовой защиты на сигнал или на отключение
		2. Окисление масла	- увеличенная кислотность масла:
		3. Увлажнение масла	<ul style="list-style-type: none"> - повышенное влагосодержание масла - увеличение проводимости масла - Изменение цвета силикогеля
5.	Система охлаждения СТ	1. Появление течи или утечка масла	<ul style="list-style-type: none"> - наличие течи масла из системы охлаждения, - потеки масла на баке и элементах СО, - наличие масляных луж под трансформатором, - попадание воздуха и влаги в масло, - снижение характеристик масла (понижение температуры вспышки, повышенная кислотность, срабатывание газовой защиты)

		2. Недопустимая вибрация крыльчаток вентиляторов	- ненормальное гудение вентиляторов, - дребезжание.
		3. Засорение трубного пучка (межтрубного пространства)	- увеличение температуры масла.
		4. Повреждения электронасосов систем охлаждения	- увеличение потребляемой электронасосом мощности, - ненормальное гудение и дребезжание, - повышение температуры.
6.	Устройство РПН	1. Повреждение привода РПН	- увеличение потребляемой приводом мощности, ненормальное гудение и дребезжание в момент срабатывания, - повышение температуры.
		2. Отсутствие контакта, оплавление контактной поверхности	- смещение неподвижных контактов избирателей, - люфт, - залипание, - изменение сопротивления контактов РПН, - изменение температуры контактов, - изменение сопротивления постоянному току.
7.	Вводы	Повреждение внешней крышки ввода	- повреждения, деформация, сколы и трещины крышки, - потеки масла, - изменение температуры в местах повреждения.
		Дефекты во внутренней изоляции вводов	- Работа максимальной токовой и дифференциальной защит. - Течь масла в месте армировки ввода. - Срабатывание устройства КИВ

Частичные разряды в изоляции СТ. Особое внимание следует уделить такому явлению, как частичные разряды (ЧР). При длительном воздействии эксплуатационных факторов (электрического поля, изменений температуры, механических воздействий, увлажнения и т.п.) в изоляции оборудования высокого напряжения могут возникнуть ослабленные места – дефекты. Обычно такими дефектами являются газовые (воздушные) включения в твердом или жидком диэлектрике, возникшие или из-за нарушения структуры изоляции (расслоения, разрывы), или из-за попадания в конструкцию газов (газовыделение из изоляции, плохая вакуумировка и т.п.). Дефекты могут быть также следствием некачественного заводского изготовления изоляции.

Напряженность электрического поля в газовом включении превышает напряженность поля в окружающем твердом или жидком диэлектрике, так как диэлектрическая постоянная их выше, чем диэлектрическая постоянная газа. Электрическая прочность газов во включении ниже, чем прочность остальной части изоляции. Это создает условия для возникновения пробоя или перекрытия изоляции в месте дефекта – частичного разряда. Частичные разряды, будучи следствием дефектов изоляционной конструкции, в то же время являются одним из процессов, вызывающих дальнейшее разрушение диэлектриков.

Частичным разрядом (ЧР) называется электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами.

Он возникает вследствие ионизации газа или жидкого диэлектрика и может происходить как на поверхности раздела сред, так и внутри изоляции.

Процесс возникновения и развития ЧР существенно зависит от типа примененного диэлектрика и от конструктивных особенностей изоляции объекта.

Изоляцию неорганического происхождения (фарфор, стекло, слюду и т. п.) ЧР практически не разрушают. Поэтому развитие дефекта в изоляции такого типа может быть связано лишь с побочным действием ЧР (разрушением связующего лака, увеличением проводимости поверхностей из-за окислов, возникающих при разрядах в воздухе, и т. п.).

Органическая изоляция всех видов (бумага, масло, пластики) интенсивно разрушается как самими ЧР, так и побочными продуктами их воздействия. В конечном итоге воздействие ЧР приводит к развитию дефекта и пробую (перекрытию) всей изоляции [3].

Всего в трансформаторах можно выделить 22 основных дефекта, не считая дефектов навесного оборудования [4]. Приняв за 100% общее количество рассмотренных дефектов, определим процентное соотношение возможных дефектов в элементах трансформатора (рис.2).

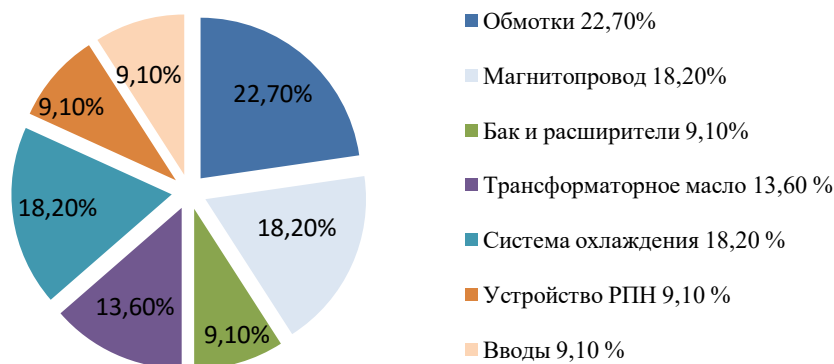


Рис. 2. Процентное соотношение количества дефектов в отдельных элементах СТ к общему числу дефектов СТ [4]

Из рис. 2 видно, что около 40% дефектов составляют дефекты обмоток и магнитопровода СТ, т.е. его активной части. Однако по статистике до 40% общих катастрофических аварий трансформаторов связано с повреждениями устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Дефекты высоковольтных вводов также приводят к наиболее тяжелым повреждениям, которые составляют 30-45% общего числа аварий и отказов в год [4].

Выводы

- Многие признаки повреждения являются общими для двух, иногда и более дефектов. Данный фактор может быть использован для определения и выявления дефекта из небольшого списка вероятных повреждений вместо большого числа диагностических процедур.

- Дефекты различаются по скорости развития (медленно развивающиеся, быстро развивающиеся и мгновенные), по месту возникновения, значимости и возможности их диагностирования.

- Каждый невыявленный дефект в конечном итоге может привести к серьезным повреждениям трансформатора и большим экономическим затратам. Это обуславливает необходимость своевременного и точного диагностирования каждого

отдельного дефекта, возникающего и развивающегося в СТ, контроля и прогнозирования дальнейших процессов его развития.

• Систематизация дефектов, их признаков и методов выявления дефектов, создание диагностической модели СТ и алгоритмов диагностирования дадут возможность создания эффективной экспертной системы, обеспечивающей экономию времени и средств на диагностику СТ.

• Построение диагностической модели СТ, в зависимости от признаков дефектов, их скорости, места возникновения и уровня их значимости, является необходимостью для экономии средств на процесс диагностирования и, что важнее, для продления срока службы и предотвращения отказов в работе СТ.

The article describes the basic information about diagnostic model, its types and the principles of construction. It reflects the structure and algorithm of diagnostic model. In article the main signs of damages for separate elements of power transformer are listed.

Keywords: Power transformer, diagnostic model, construction principles of diagnostic model, sign of damage.

Литература

1. Л.М. Рыбаков, Калявин. Надёжность и техническая диагностика электрооборудования. М., 2008-150-156с.
2. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. 1996. 3с.
3. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения.
4. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. М.: «ЭНАС», 2002. 216 с.
5. <http://forca.ru/spravka/transformatory/osnovnye-vidy-povrezhdeniy-transformatorov.html>.

Поступила в редакцию

07 сентября 2015 г.

Лопухова Татьяна Викторовна – канд. педог. наук, доцент, профессор кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(919)6935248.

Джебрил Мохаммед Ревек – аспирант кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(960)0448023. E-mail: abujibro@gmail.com .

Ислентьев Игорь С. – инженер филиала Сетевой компании Казанские электрические сети.