

УДК 621.311

Идентификация параметров бездефектного состояния маслонаполненных трансформаторов *

Н.Н. КЕРИМКУЛОВ¹, В.М. ЛЕВИН²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант. E-mail: nurzhanmak@gmail.com

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: vlevin@ngs.ru

Основу интеллектуальной диагностики силовых маслонаполненных трансформаторов (СМТ) представляют модели, позволяющие безошибочно идентифицировать бездефектное состояние электрооборудования по ряду ключевых параметров (признаков) без вывода его из работы. Предложены диагностические модели для идентификации параметров бездефектного состояния изоляционной системы СМТ в процессе его эксплуатации, использующие однородную статистику многолетних наблюдений за характеристиками бумаги и масла. В качестве диагностической информации использованы протоколы периодического хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ), результаты физико-химического анализа (ФХА) масла и высоковольтных испытаний целлюлозной изоляции. Для формирования диагностических моделей разработана методика, использующая вариационные ряды синхронизированных по времени данных. Основу методики составляет метод статистической (байесовской) идентификации, позволяющий достоверно различать такие состояния СМТ, как «норма», «норма с незначительными отклонениями», «норма со значительными (критическими) отклонениями», оценивать вид и степень опасности дефектов. Параметры, характеризующие состояние изоляционной системы СМТ, представлены выборками двумерных случайных величин со своими областями распределения, условными математическими ожиданиями и среднеквадратичными отклонениями. Это позволяет сформировать специальные граничные функции, разделяющие классы состояний СМТ в пространстве контролируемых признаков. Для реализации вычислительной процедуры метода разработан алгоритм экспресс-оценки состояния и принятия решений по дальнейшей эксплуатации СМТ. Достоверность и адекватность рекомендуемых эксплуатационных воздействий обусловлена обоснованностью критериев принятия решений, отражающих известные нормативные принципы. Приводятся примеры, иллюстрирующие достоверность и продуктивность разработанного подхода, который предназначен для применения в системах оценки технического состояния и планирования ремонтов трансформаторного оборудования электрических сетей.

Ключевые слова: интеллектуальная диагностика, маслонаполненные трансформаторы, экспресс-оценка состояния, диагностическая статистика, метод байесовской классификации, диагностические характеристики изоляции, метод «ключевого» газа, бездефектное состояние

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-194-206

* Статья получена 08 ноября 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальная диагностика электрооборудования подстанций – один из ключевых компонентов SMART GRID. Ее предназначение – обеспечивать качественно более высокий уровень эксплуатационной надежности энергообъектов за счет упрощения процедур оценки технического состояния оборудования, повышения оперативности и достоверности принимаемых решений [1–3].

Основу интеллектуальной диагностики СМТ составляют методы сбора данных и формирования статистических выборок с применением периодического или online-мониторинга, а также процедуры получения экспертных оценок, использующие методы искусственного интеллекта.

Многочисленные исследования [4–6] подтверждают преимущества вероятностно-статистических методов для формирования моделей и правил экспертной оценки технического состояния СМТ. Однако большинство из них не обеспечивают возможности комплексной оценки, так как основаны на использовании одного или нескольких диагностических параметров СМТ. В то же время актуальна разработка моделей идентификации бездефектного состояния (состояния «норма») СМТ по комплексу диагностических параметров, и прежде всего характеризующих процессы в изоляционной системе трансформатора [7–10].

БАЗОВЫЙ МЕТОД

Известен метод статистической байесовской идентификации состояний СМТ по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ) [6]. Метод обладает высокой достоверностью (до 97 %) получаемых оценок и отличается тем, что позволяет идентифицировать наличие либо отсутствие дефекта в СМТ, по крайней мере, по трехуровневой шкале состояний: Π_1 – норма, Π_{21} – норма с незначительным отклонением, Π_{22} – норма со значительным (критическим) отклонением, а также определять возможный характер и степень опасности прогнозируемого дефекта [11]. В качестве идентификатора состояний СМТ метод использует скалярную функцию (1), вычисляемую на основе вектора концентраций диагностических газов $A = \{A_i\}$:

$$\phi(A) = \sum_{i=1}^7 w_i \frac{A_i}{A_{i2p}} + w_0. \quad (1)$$

Здесь A_i, A_{i2p} (% / об.) – измеренные концентрации диагностических газов ($i = \overline{1,7}$) и их рекомендуемые предельные нормы; w_i (о.е.) – объемная доля i -го газа в выделенной из пробы масла газовой смеси ($w_0 = 0$), вычисляемая по формуле

$$w_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^7 A_i}.$$

Именно благодаря свертке исходного многомерного пространства признаков $A = \{A_i\}$ на числовую ось $\phi(A) \in [1 \div \infty)$ обеспечено достижение указанных преимуществ метода, и в частности снятие вычислительных ограничений на применение байесовского решающего правила:

$$\begin{cases} \phi(A) \leq \phi'_0 & \text{состояние «норма»,} \\ \phi(A) > \phi'_0 & \text{состояние «норма с отклонениями».} \end{cases} \quad (2)$$

Граница раздела классов состояний ϕ'_0 определяется статистически по объединенной выборке значений $\phi(A)$, формируемой в результате проведения регулярного ХАРГ СМТ однородной группы. При этом может быть использован как точный, так и приближенный способ вычисления границы раздела классов [11]. Приближенный способ заключается в применении формулы

$$\phi'_0 = M_1 + k\sigma_1, \quad (3)$$

где M_1, σ_1 – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины $\phi(A)$ в классе состояний Π_1 ; k – вычислительная константа, имеющая смысловое значение коэффициента охвата [12] и устанавливаемая на основе эмпирических данных в диапазоне (2...3). Рассмотренный метод предусматривает корректировку положения границы (3) раздела классов состояний СМТ в зависимости от нагрузки и срока службы, что обеспечивает необходимую достоверность оценок.

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СМТ

Авторы статьи предлагают расширить возможности метода за счет построения граничных функций типа $\phi'_0(x_j)$, где $x_j (j = \overline{1, m})$ – комплекс диагностических параметров (признаков), характеризующих состояние компонентов изоляционной системы трансформатора. Указанные зависимости моделируют границу раздела классов состояний СМТ в двумерном признаковом пространстве, на плоскости с координатами $\phi(A)$ и x_j . При этом в качестве x_j для целлюлозы могут быть использованы диагностические параметры, контролируемые по результатам высоковольтных испытаний трансформатора: $K_{аб} = \frac{R_{15}}{R_{60}}$ – коэффициент абсорбции; $\text{tg } \delta_{и}$ – тангенс угла диэлектрических потерь; для масла – параметры, контролируемые по результатам физико-химического анализа: $U_{пр}$ – пробивное напряжение; W – влагосодержание и тангенс угла диэлектрических потерь масла – $\text{tg } \delta_{м}$. Принятый набор контролируемых параметров достаточно информативен для оценки состояния элементов изоляционной системы СМТ в случае обнаружения признаков дефекта по ХАРГ.

Целесообразность разработки подобных моделей вытекает из следующих соображений. Изоляционная система является наиболее уязвимым конструктивным элементом СМТ и состоит из целлюлозы и минерального масла. В условиях эксплуатации изоляция подвержена влиянию агрессивных сред, механических вибраций, высокой напряженности электромагнитного поля, воздействиям повышенной температуры, влаги и кислорода воздуха. Под влиянием указанных факторов постепенно ухудшаются диэлектрические характеристики бумаги и масла, снижается эксплуатационный ресурс. В табл. 1 приведены основные диэлектрические характеристики изоляции, контролируемые в процессе эксплуатации СМТ напряжением до 220 кВ включительно, а также рекомендуемые предельные нормы и периодичности контроля [13].

Повреждение изоляции сопровождается повышением интенсивности процессов газовыделения и увеличения концентраций диагностических газов, растворенных в масле СМТ. При этом характер повреждения (дефекта) соответствует определенному составу диагностических газов и их соотношению. В случае выявления признаков дефекта в СМТ известными методиками интерпретации результатов ХАРГ [15, 16] рекомендовано использование критерия «ключевого» газа.

Таблица 1

Диэлектрические характеристики изоляции СМТ, контролируемые в процессе эксплуатации

| Параметр | Предельная норма | Периодичность контроля |
|---|---|---|
| $K_{аб} = R_{15} / R_{60}$ | Не менее единицы | При неудовлетворительных результатах испытаний масла и/или ХАРГ, а также в объеме комплексных испытаний |
| $\text{tg } \delta_{и}$ | Не более чем на 50 % от исходных значений в сторону ухудшения | |
| $U_{пр}$ по ГОСТ 6581–75 | ≥ 50 кВ | |
| W по ГОСТ 7822–75 | $\leq 0,0015$ % массы (15 г/т) * | |
| $\text{tg } \delta_{м}$ по ГОСТ 6581–75 | ≤ 8 % при температуре 90 °С | |

Ключевым газом называют растворенный в масле газ с максимальным превышением рекомендуемого предела концентраций $A_{i_{гр}}$. В табл. 2 показаны индексы идентификации характера дефекта в СМТ по критерию «ключевого» газа.

Таким образом, если по критериям ХАРГ в СМТ прогнозируется наличие дефекта и требуется проверить, не затронуты ли дефектом элементы изоляционной системы, то могут быть применимы разрабатываемые модели идентификации.

* Для трансформаторов с пленочной и азотной защитой.

Таблица 2

Индексы дефектов в СМТ по критерию «ключевого» газа

| Ключевой газ | Повышенное содержание газов | Характер дефекта в трансформаторе |
|-------------------------------|---|-----------------------------------|
| C ₂ H ₂ | H ₂ | Дуга в масле |
| | H ₂ , CO, CO ₂ | Дуга в масле, затронута бумага |
| H ₂ | CH ₄ , C ₂ H ₆ | Перегрев масла < 150 °С |
| | CH ₄ , C ₂ H ₆ , CO, CO ₂ | Перегрев бумаги < 150 °С |
| | – | Частичные разряды в масле |
| | CO, CO ₂ | Частичные разряды в бумаге |
| C ₂ H ₄ | C ₂ H ₂ | Перегрев масла > 600 °С |
| | – | Перегрев бумаги > 600 °С |
| CO | – | Старение, увлажнение масла |

Для разработки моделей идентификации параметров бездефектного состояния СМТ должны быть сформированы вариационные ряды диагностических признаков $\phi(A)$ и $x_j (j = \overline{1, m})$ на интервале ΔT эксплуатации выбранной однородной группы СМТ. Сложность заключается в том, что контроль диагностических параметров изоляции x_j и ХАРГ СМТ имеет разную периодичность [13]. Поэтому величина интервала ΔT эксплуатации должна быть достаточной для получения представительных выборок синхронизированных по времени данных. Сформированные ряды вариант попарно могут рассматриваться как составляющие m двумерных случайных величин $(\phi(A), x_j)$, $(j = \overline{1, m})$, геометрически представляющих собой случайные точки на плоскости с координатами $\phi(A)$ и x_j [14]. Эти точки принадлежат соответственно областям распределения двумерных случайных величин $(D_j, j = \overline{1, m})$ (рис. 1).

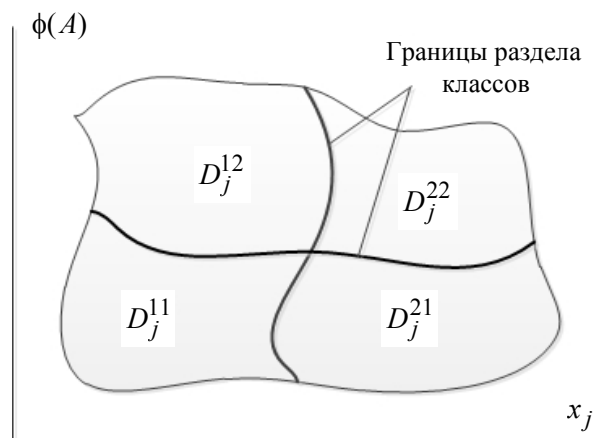


Рис. 1. Область распределения двумерной случайной величины с разделением на классы состояний СМТ

На рис. 1 область распределения двумерной случайной величины условно разделена на четыре зоны, каждая из которых соответствует одному из классов состояний «норма» и «норма с отклонением» отдельно по параметрам $\phi(A)$ и x_j . Следует отметить, что формирование каждой из зон областей распределения случайных величин ($D_j, j = \overline{1, m}$) зависит от состава имеющихся в наличии обучающих выборок данных. В реальных условиях эксплуатации СМТ формирование областей распределения усеченного вида, содержащих дихотомию классов D_j^{11} и D_j^{12} , представляется достаточным для идентификации бездефектного состояния элементов изоляционной системы трансформатора по параметрам $x_j, j = \overline{1, m}$.

Для каждого из распределений двумерных случайных величин определяются числовые характеристики в виде $M[\phi(A)/x_j], \sigma[\phi(A)/x_j]$ – условных математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Далее в координатах каждой области распределения случайных величин ($D_j, j = \overline{1, m}$) по формуле (3) вычисляются эмпирические точки, принадлежащие m границам раздела классов состояний СМТ и производится аппроксимация граничных функций $\phi'_0(x_j)$ зависимостями вида

$$\phi'_0 = A \exp[B \cdot x_j], \quad (4)$$

где A и B – константы вычисления. Выбор в пользу экспоненциальной формы аппроксимирующего полинома более предпочтителен, так как связан с лучшим описанием процесса деградации органических материалов под воздействием вредных факторов. После того как получены коэффициенты полинома по выражениям (4) с применением решающих правил (2), обучающей и тестовой выборок данных, производится оценка ошибок распознавания состояний СМТ. С целью уменьшения суммарной ошибки распознавания допускается коррекция граничных функций по формуле (3) при помощи подбора значений вычислительной константы k в допустимых пределах. Полученные в результате расчетов по предложенной методике модели идентификации параметров бездефектного состояния изоляционной системы СМТ готовы к практическому применению.

На рис. 2 представлен алгоритм экспресс-оценки состояния СМТ с применением сформированных моделей.

Разработанный алгоритм содержит три функциональных блока. Блок 1 предназначен для формирования диагностической статистики в процессе эксплуатации рассматриваемого трансформаторного оборудования. Блоки 2 и 3 служат соответственно для выполнения расчетов с целью получения моделей идентификации и непосредственной идентификации параметров состояния СМТ.

При получении нового результата ХАРГ для одного из СМТ обследуемой группы, по которому стандартные критерии прогнозируют развивающийся дефект с признаками повреждения бумаги и/или масла, по выражению (4) на основе последнего из зафиксированных для данного СМТ измере-

ний вычисляются значения граничных функций. С учетом найденных значений запускаются решающие правила (2) и уточняется действительное состояние СМТ «норма» или «норма с отклонением».

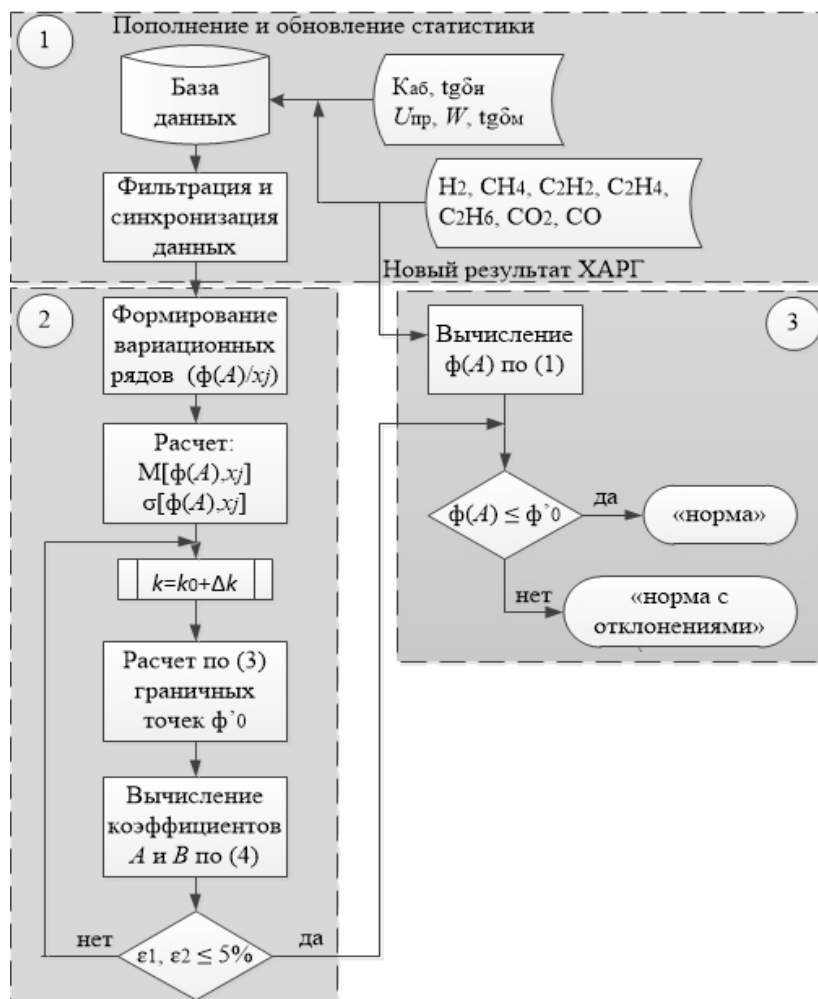


Рис. 2. Алгоритм экспресс-оценки эксплуатационного состояния СМТ

ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ

Для иллюстрации разработанного подхода рассмотрена группа из 26 однородных СМТ (автотрансформаторы 220 кВ), находящихся в одинаковых условиях эксплуатации. Интервал эксплуатации СМТ, на котором сформирована ретроспектива диагностических данных, составляет 14 лет (2001–2014). Объем каждой из обучающих выборок включает 240–250 компонентов, что обуславливает достаточную достоверность статистических вычислений.

На рис. 3, 4 и в табл. 3, 4 представлены расчеты, иллюстрирующие некоторые этапы формирования моделей идентификации состояний СМТ по разработанной методике.

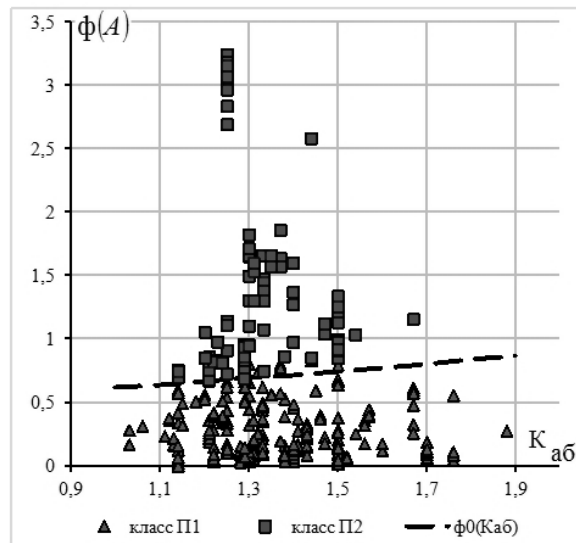


Рис. 3. Дихотомия классов D_j^{11} и D_j^{12} случайной величины $(\phi(A), K_{аб})$

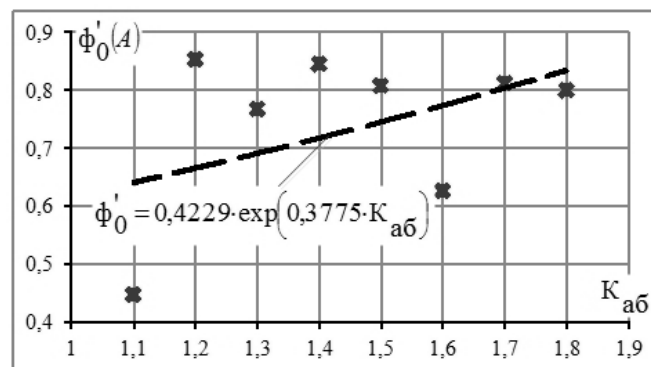


Рис. 4. Эмпирические точки граничной функции $\phi'_0(K_{аб})$ и ее экспоненциальная аппроксимация

В качестве тестовых измерений ХАРГ в табл. 5 представлены концентрации АТ-3 подстанции Агадырь. Приведенные измерения характеризуются превышением граничных концентраций характерных газов CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO .

Таблица 3

Эмпирический интервал изменения случайной величины, ее числовые характеристики и значения граничной функции (3)

| $K_{аб}$, о.е. | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $M[\phi(A) / K_{аб}]$ | 0,2562 | 0,3400 | 0,2472 | 0,3015 | 0,2417 | 0,2858 | 0,2834 | 0,2020 |
| $\sigma[\phi(A) / K_{аб}]$ | 0,0764 | 0,2053 | 0,2085 | 0,2180 | 0,2267 | 0,1363 | 0,2116 | 0,2392 |
| $\phi'_0(K_{аб})$ | 0,4471 | 0,8534 | 0,7682 | 0,8464 | 0,8084 | 0,6266 | 0,8124 | 0,8003 |

Таблица 4

Результаты аппроксимации граничных функций (4)

| Диагностический параметр | Константы вычисления, о.е. | | | Ошибки распознавания, % | |
|-----------------------------|----------------------------|---------|-----|-------------------------|-----------------|
| | A | B | k | ε_1 | ε_2 |
| $K_{аб}$, о.е. | 0,4229 | 0,3775 | 2,5 | 3,6 | 0 |
| $\text{tg } \delta_{и}$, % | 0,9056 | -0,7891 | 2,0 | 4,2 | 5,4 |
| $U_{пр}$, кВ | 1,5615 | -0,0120 | 2,0 | 4,0 | 4,1 |
| W , % | 0,6836 | 0,1098 | 2,5 | 2,4 | 2,5 |
| $\text{tg } \delta_{м}$, % | 0,5478 | 299,87 | 2,5 | 5,1 | 4,9 |

По критериям [15] в трансформаторе прогнозируется развивающийся дефект типа «перегрев» в диапазоне высоких температур ($\theta \geq 700$ °С), предположительно имеет место перегрев масла, дефектом затронута бумажная изоляция (CO_2/CO) ≤ 5 . Отношения концентраций характерных газов

$\left(\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4} \leq 0,1 \quad \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} > 1 \quad \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6} > 3 \right)$ подтверждают полученный диагноз: «го-

рячая точка в сердечнике; перегрев меди из-за вихревых токов, плохих контактов; циркулирующие токи в сердечнике или баке» [15]. Компоненты матрицы функций (1), рассчитанные по данным табл. 5, имеют следующие значения: $\phi(A) = (3,070; 3,246; 3,184; 3,155)^t$. Полученный результат порождает тревогу за состояние изоляции СМТ. Для проверки обоснованности этой тревоги требуется применение разработанных моделей. Для этого следует, используя результаты предыдущих высоковольтных испытаний и ФХА АТ-3 подстанции Агадырь от 24.01.2013 г. ($K_{аб} = 1,25$ о.е.; $\text{tg } \delta_{и} = 0,296$ о.е.; $U_{пр} = 85$ кВ; $\text{tg } \delta_{м} = 0,19$ о.е.; $W = 0,00065$ %), по формуле (4) с применением данных табл. 4 рассчитать значения граничных точек ϕ'_{0j} , $j = \overline{1,5}$:

$$\phi'_0 = (0,67791; 0,71696; 0,69801; 0,66569)^t.$$

Таблица 5

Измеренные концентрации диагностических газов АТ-3 ПС Агадырь

| Дата | H_2 | CH_4 | C_2H_4 | C_2H_6 | C_2H_2 | CO_2 | CO |
|----------|--------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------|-------------|
| 25.11.13 | 0,00211 | 0,02501 | 0,04565 | 0,00636 | 0,00009 | 0,13198 | 0,02630 |
| 22.01.14 | 0,00212 | 0,02527 | 0,04807 | 0,00672 | 0,00011 | 0,10787 | 0,02425 |
| 12.02.14 | 0,00374 | 0,02819 | 0,04787 | 0,00661 | 0,00025 | 0,10571 | 0,03202 |
| 27.02.14 | 0,00337 | 0,02685 | 0,04739 | 0,00658 | 0,00023 | 0,10080 | 0,02837 |

В завершение проверки в соответствии с условиями (2) производится оценка текущего состояния компонентов изоляционной системы СМТ.

В рассмотренном примере, несмотря на развивающийся термический дефект, характеристики бумажной изоляции и масла АТ-3 не подвержены существенным отклонениям от нормы (состояние оцениваются как «норма»). Это подтверждено результатами высоковольтных испытаний и ФХА АТ-3 подстанции Агадырь, зафиксированными 27.02.2014 г. ($K_{аб} = 1,25$ о.е.; $\text{tg } \delta_{и} = 0,234$ о.е.; $U_{пр} = 69,8$ кВ; $\text{tg } \delta_{м} = 0,25$ о.е.; $W = 0,0005$ %).

ВЫВОДЫ

1. Интеллектуальная диагностика трансформаторов базируется на применении информативных моделей и алгоритмов экспертной оценки, обеспечивающих идентификацию эксплуатационного состояния оборудования по комплексу ключевых параметров.

2. Предложенный подход расширяет возможности базового метода статистической (байесовской) идентификации дефектов в СМТ по результатам ХАРГ и основан на формировании статистических зависимостей, связывающих обобщенный признак повышения концентраций растворенных в масле газов с рядом основных диагностических параметров изоляционной системы трансформатора.

3. Методика формирования и применения указанных зависимостей обеспечивает достоверную (≥ 90 %) идентификацию бездефектного состояния бумаги и масла трансформатора даже в условиях, когда по критериям ХАРГ прогнозируется наличие развивающегося дефекта, затрагивающего изоляцию.

4. Разработанные модели и алгоритм их реализации позволяют адаптировать точность идентификации (снизить суммарную ошибку) к реальным условиям эксплуатации трансформаторного оборудования за счет настройки параметров вычислительного процесса. Выполненные по реальным диагностическим данным для группы однотипных СМТ 220 кВ расчеты подтверждают эффективность разработанного подхода и позволяют рекомендовать его для применения в системе экспресс-оценки состояния и планирования ремонтов трансформаторного оборудования электрических сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мордкович А.Г., Горожанкин П.А.* О построении подсистем мониторинга, управления и диагностики оборудования подстанций сверхвысокого напряжения и их интеграции в АСУ ТП ПС // *Электрические станции.* – 2007. – № 6. – С. 44–54.

2. *Батрак А.П., Чупак Т.М., Малеев А.В.* Оценка состояния маслонаполненного оборудования акустическим методом // *Материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность»*, Томск, Россия, 4–6 декабря 2013 г. – Томск: Скан, 2013. – Т. 1. – С. 38–41.

3. *Тюрюмина А.В., Никитина А.В.* Оценка состояния силовых трансформаторов методом акустической диагностики жидкой изоляции // *Сборник научных статей студентов федеральных университетов России 2014 года.* – Казань: Отечество, 2014. – С. 98–103.

4. *Давиденко И.В.* Идентификация дефектов в трансформаторах 35–500 кВ на основе АРГ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.energoboard.ru/articles/720-identifikatsiya-defektov-v-transformatorah-35-500kv-na-osnove-arg.html> (дата обращения: 23.12.2016).
5. *Гатауллин А.М.* Система мониторинга и диагностирования высоковольтного оборудования на основе анализа статистических параметров ЧР // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 7/8. – С. 19–26.
6. *Левин В.М.* Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию // Промышленная энергетика. – 2013. – № 8. – С. 37–42.
7. *Сви П.М.* Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
8. *Привалов Е.Е.* Диагностика оборудования силовых масляных трансформаторов: учебное пособие. – Ставрополь: Параграф, 2014. – 42 с.
9. *Мельникова О.С.* Диагностика главной изоляции силовых маслонаполненных электро-энергетических трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2015. – 20 с.
10. *Жунин А.М., Николаев А.Г., Скворцов С.С.* Определение влагосодержания в твердой изоляции трансформатора на основе влагосодержания в масле // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 84–91.
11. *Левин В.М.* Идентификатор состояний маслонаполненного трансформаторного оборудования на основе анализа растворенных газов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 5. – С. 22–26.
12. Р 50.2.058–2007. Оценивание неопределенностей аттестованных значений стандартных образцов. – М.: Стандартинформ, 2008. – 31 с.
13. РД 34.45-51.300–97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М.: НЦ ЭНАС, 1998. – 256 с.
14. *Гмурман В.Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2004. – 404 с.
15. РД 153-34.0-46.302–00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. – М.: НЦ ЭНАС, 2000. – 25 с.
16. IEEE Std C57.104–2008. IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers. – New York, 2009. – 28 с.

Левин Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика и эксплуатационная надежность электрооборудования. Имеет более 50 публикаций. E-mail: vlevin@ngs.ru

Керимкулов Нуржан Нурмуханович, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика маслонаполненных трансформаторов. Имеет более пяти публикаций. E-mail: nurzhanmak@gmail.com

Identification of faultless condition parameters of oil-filled transformers*N.N. KERIMKULOV¹, V.M. LEVIN²¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, a post-graduate student. E-mail: nurzhanmak@gmail.com² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: vlevin@ngs.ru

The basis of intellectual diagnostics of power oil-filled transformers (POFT) is represented by models which make it possible to identify accurately a faultless condition of electric equipment in a number of key parameters (signs) without switching it off. Diagnostic models are proposed to identify parameters of a faultless condition of the POFT insulating system in the course of its operation using uniform statistics of long-term observations of paper and oil characteristics. Records of the periodic dissolved gas chromatographic analysis (DGCA), the results of the physical and chemical analysis (PCA) of oil and high-voltage testing of cellulose insulation are used as diagnostic information. A technique using variational series of data synchronized in time is developed for constructing diagnostic models. The method of statistical (Bayesian) identification which makes it possible to differentiate reliably such conditions of POFT as a "norm", "a norm with insignificant deviations", and "a norm with considerable (critical) deviations" as well as to estimate a type and degree of danger of defects forms the basis of the proposed technique. Parameters characterizing the condition of the POFT insulating system are provided by samples of two-dimensional random variables with their distribution areas, conditional population means and mean square deviations. It allows creating special boundary functions dividing classes of POFT conditions in space of controlled signs. An algorithm of express evaluation of a condition and of decision making concerning further POFT operation is developed for implementing the method computing procedure. Reliability and adequacy of the recommended operational impacts are conditioned by the validity of decision-making criterions reflecting the accepted standard principles. Examples illustrating the reliability and efficiency of the developed approach which is intended for application in systems of operating condition evaluation and for planning repairs of the transformer equipment of electric networks are given.

Keywords: intellectual diagnostics, oil-filled transformers, express evaluation of a condition, diagnostic statistics, Bayesian classification method, diagnostic characteristics of insulation, 'key gas' method, faultless condition

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-194-206

REFERENCES

1. Mordkovich A.G., Gorozhankin P.A. O postroenii podsistem monitoringa, upravleniya i diagnostiki oborudovaniya podstantsii sverkhvysokogo napryazheniya i ikh integratsii v ASU TP PS [Construction of monitoring systems, control and diagnostic equipment EHV substations and their integration into the APCS substation]. *Elektricheskie stantsii – Power Plants*, 2007, no. 6, pp. 44–54.
2. Batrak A.P., Chupak T.M., Maleev A.V. [Assessment of a condition of the oil-filled equipment by an acoustic method]. *Materialy trudov XIX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'"* [Materials of works XIX of the All-Russian scientific and technical conference "Power: efficiency, reliability, safety"], Tomsk, Russia, 4–6 December 2013, vol. 1, pp. 38–41. (In Russian)
3. Tyuryumina A.V., Nikitina A.V. Otsenka sostoyaniya silovykh transformatorov metodom akusticheskoi diagnostiki zhidkoi izolyatsii [Assessment of a condition of power transformers by method of acoustic diagnostics of liquid isolation]. *Sbornik nauchnykh statei studentov federal'nykh universitetov Rossii 2014 goda* [Collection of scientific articles of students of federal universities of Russia of 2014], Kazan', Otechestvo Publ., 2014, pp. 98–103.

* Received 08 November 2016.

4. Davidenko I.V. *Identifikatsiya defektov v transformatorakh 35–500 kV na osnove ARG* [Identification of defects in transformers 35–500 kV by DGA]. Available at: <http://www.energoboard.ru/articles/720-identifikatsiya-defektov-v-transformatorah-35-500kv-na-osnove-arg.html> (accessed 23.12.2016)
5. Gataullin A.M. Sistema monitoringa i diagnostirovaniya vysokovol'nogo oborudovaniya na osnove analiza statisticheskikh parametrov ChR [System of monitoring and diagnosing of the high-voltage equipment on the basis of the analysis of the PD statistical parameters]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki – Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2013, no. 7–8, pp. 19–26.
6. Levin V.M. Statisticheskii metod raspoznavaniya defektov v silovykh transformatorakh pri ikh tekhnicheskome obsluzhivaniy po sostoyaniyu [Statistical method of recognition of defects in power transformers at their maintenance on a condition]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2013, no. 8, pp. 37–42.
7. Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* [Methods and tools for the diagnosis of high voltage equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p.
8. Privalov E.E. *Diagnostika oborudovaniya silovykh maslyanykh transformatorov* [Diagnostics of the equipment of power oil transformers]. Stavropol', Paragraf Publ., 2014. 42 p.
9. Mel'nikova O.S. *Diagnostika glavnoi izolyatsii silovykh maslonapolnennykh elektroenergeticheskikh transformatorov po statisticheskomu kriteriyu elektricheskoi prochnosti masla*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Diagnostics of the main isolation of power oil-filled electrical power transformers by statistical criterion of electric durability of oil. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Ivanovo, 2015. 20 p.
10. Zhunin A.M., Nikolaev A.G., Skvortsov S.S. Opredelenie vlagosoderzhaniya v tverdoi izolyatsii transformatora na osnove vlagosoderzhaniya v masle [Definition of moisture content in solid isolation of the transformer on the basis of moisture content in oil]. *Elektrotehnika: setevoye elektronnoye nauchnoye zhurnal – Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 84–91.
11. Levin V.M. Identifikator sostoyaniya maslonapolnennogo transformatornogo oborudovaniya na osnove analiza rastvorenykh gazov [The identifier of conditions of the oil-filled transformer equipment on the basis of the analysis of the dissolved gases]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki – University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2014, no. 5, pp. 22–26.
12. R 50.2.058–2007. *Otsenivanie neopredelennosti attestovannykh znachenii standartnykh obraztsov* [Recommendations about metrology 50.2.058–2007. Estimation of uncertainty of the certified values of standard samples]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 31 p.
13. RD 34.45-51.300–97. *Ob"em i normy ispytaniya elektrooborudovaniya* [Regulating document 34.45-51.300–97. Volume and norms of tests of electric equipment]. Moscow, Innovative center ENAS Publ., 1998. 256 p.
14. Gmurman V.E. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike* [Guide to solving problems in the theory of probability and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 404 p.
15. RD 153-34.0-46.302–00. *Metodicheskie ukazaniya po diagnostike razvivayushchikhsya defektov transformatornogo oborudovaniya po rezul'tatam khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenykh v masle* [Regulating document 153-34.0-46.302–00. Methodical instructions on diagnostics of the developing defects of the transformer equipment by results of the dissolved gas analysis]. Moscow, Innovative center ENAS Publ., 2000. 25 p.
16. IEEE Standards C57.104–2008. *IEEE Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*. New York, 2009. 28 p.