



ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию

Левин В. М., канд. техн. наук

ФГБОУ «Новосибирский государственный технический университет»

Предложен статистический метод, повышающий достоверность распознавания дефектов в силовых трансформаторах по результатам газовой хроматографии и обоснованность принимаемых эксплуатационных решений.

Ключевые слова: статистический метод, распознавание дефектов, хроматографический анализ газов, силовой трансформатор, эксплуатация по состоянию, обоснованность решений.

При эксплуатации силовых трансформаторов важное значение имеет возможность достоверной и оперативной оценки их фактического состояния. Многопараметрическая оценка может быть проведена по результатам диагностирования каждого элемента конструкции трансформатора (обмотки, магнитопровода, системы охлаждения, вводов, РПН, трансформаторного масла и др.) с применением нормативно утвержденных методов [1, 2]. Прежде всего она направлена на выявление «критических» дефектов, наличие которых свидетельствует о большом риске отказа в ходе его дальнейшей эксплуатации. При этом для каждого элемента и метода диагностирования определяются признаки, по значениям которых фактическое состояние трансформатора относят к определенному классу. В [2] установлены классы эксплуатационных состояний силовых трансформаторов и приводящие к ним дефекты: «норма» (отсутствие явных дефектов), «норма с отклонениями» (малозначительный дефект), «норма со значительными отклонениями» (значительный дефект), «ухудшенное» (критический дефект), «предаварийное» (предельное состояние). Совпадение оценок по двум и более методам диагностирования повышает эффективность диагноза, а следовательно, и обоснованность принимаемых эксплуатационных решений.

Одним из наиболее эффективных методов раннего обнаружения дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах является хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ). При оценке состояния по ХАРГ [3] рекомендуется для определения

развивающихся дефектов применять следующий критерий граничных концентраций:

$$A_i > A_{\text{гpi}}, \quad (1)$$

где A_i — измеренная концентрация i -го газа, выделяемого из пробы масла (% об.); $A_{\text{гpi}}$ — граничная концентрация i -го газа (% об.); $i = 1 \div n$; n — количество выделяемых газов (как правило, $n = 7$).

Несмотря на удобство анализа, критерий граничных концентраций не обеспечивает необходимой чувствительности и достоверности распознавания дефектов из-за неучета некоторых влияющих факторов. Неопределенность диагноза приходится компенсировать проведением повторных ХАРГ для подтверждения полученных ранее результатов, что приводит к ситуации отложенного решения и, как следствие, к снижению эксплуатационной надежности трансформатора. В ряде случаев при прогнозировании в трансформаторе дефекта высокой силы проявления подобное абсолютно неприемлемо.

Таким образом, для повышения оперативности и обоснованности эксплуатационных решений очевидна необходимость корректировки и дополнения критериев оценки состояния трансформатора по результатам ХАРГ. Значительный вклад в развитие данного направления вносят исследования [4, 5], которые расширяют и уточняют аналитические возможности интерпретации изложенных в [3] результатов ХАРГ за счет детализации учитываемых факторов и статистической обработки диагностической информации.

Несмотря на достигнутый прогресс, по-прежнему актуальна задача разработки универсальных методов достоверного распознава-

ния состояний оборудования, использующих для принятия решений процедуры искусственного интеллекта.

Один из подходов к решению указанной задачи основан на методах статистической классификации и распознавания образов, важным преимуществом которых является возможность одновременного учета признаков различной физической природы, поскольку они характеризуются безразмерными величинами — вероятностями их появления при разных состояниях системы.

Рассмотрим дихотомию задачи обнаружения признаков дефектов в силовых трансформаторах. В формировании классов состояний “норма” (Π_1) и “норма с отклонениями” (Π_2) должна участвовать статистическая выборка данных из K протоколов ХАРГ N однотипных трансформаторов. Упростить исходное описание классов состояний в пространстве контролируемых признаков позволяет дискриминантная функция вектора относительных концентраций диагностических газов $a = \{a_i\}$ (впервые предложена в [6])

$$G = \sum_{i=1}^n w_i a_i + w_0, \quad (2)$$

где $a_i = A_i/A_{\text{гр}i}$ — относительная концентрация i -го газа; $w_i = A_i / \sum_{i=1}^n A_i$ — относительная доля i -го газа в составе выделенной газовой смеси; $w_0 \geq 0$ — произвольный коэффициент.

Преимуществами признака (2) по сравнению с (1) являются уменьшение размерности признакового пространства и обобщенная оценка вектора A , за счет чего повышается его чувствительность к изменениям состава и концентраций газов, вызываемым появлением дефекта в трансформаторе. При этом условие отнесения текущего состояния последнего к одному из классов формулируется следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } G < G_{\text{гр}}, \text{ то } A \subseteq \Pi_1; \\ \text{если } G \geq G_{\text{гр}}, \text{ то } A \subseteq \Pi_2. \end{array} \right\} \quad (3)$$

В результате статистических вычислений отношения правдоподобия и минимизации суммарной ошибки распознавания (пропуск дефекта и ложная тревога) может быть получена граница раздела классов состояний $G_{\text{гр}}$.

Исследованиями установлено, что наилучшим в смысле минимизации суммарной ошибки распознавания является байесовское решающее правило вида

$$L = -\ln p(G/\Pi_1) + \ln p(G/\Pi_2) = \ln \frac{P(\Pi_1)}{P(\Pi_2)}, \quad (4)$$

где $p(G/\Pi_j)$ — плотность вероятностей признака; $P(\Pi_1)/P(\Pi_2)$ — отношение правдоподобия; $P(\Pi_j)$ — априорная вероятность принадлежности трансформатора к j -му классу состояний ($j = 1, 2$).

Если распределение случайной величины G подчинено нормальному закону, уравнение (4) преобразуется в квадратичную форму и имеет аналитическое решение ($G_{\text{гр}}$). В ряде случаев модель границы раздела классов состояний трансформатора можно получить с помощью метода гистограмм, используя числовые характеристики распределения признака в классе Π_1 (математическое ожидание M_G^I и среднеквадратическое отклонение σ_G^I). Это позволяет идентифицировать дефекты в трансформаторах с достоверностью, близкой к 97 % [6].

Таким образом, применяя принцип дихотомии и предложенную процедуру статистических вычислений, можно попарно разделить множество состояний на произвольное (заданное) количество классов с построением границы их раздела. Данная возможность особенно полезна, например, при необходимости детализации дефектов в трансформаторе по степени их проявления.

Для проверки и иллюстрации предложенного метода рассмотрим формирование классов состояний на примере исследуемого массива статистической информации (выборка из 1340 протоколов ХАРГ 98 силовых трансформаторов 110 кВ одного из филиалов ЗАО “РЭС” за период с 1995 по 2004 г.). На рис. 1 (где $N_i/N, \%$ — относительная частота попадания признака в заданный интервал значений) представлены гистограммы распределения признака G для классов Π_1 и Π_2 .

Проверка закона распределения вероятностей дискретной случайной величины G в каждом из классов состояний по критерию χ^2 Пирсона не опровергла нулевую гипотезу о ее принадлежности нормальному закону. Это позволило рассчитать приведенные ниже числовые характеристики признака G соответственно классов состояний Π_1 и Π_2 :

Математическое		
ожидание M_G^I	0,349	1,120
Среднеквадратическое		
отклонение σ_G^I	0,155	0,504

Их можно использовать для описания границы раздела классов состояний $G_{\text{гр}}^I = M_G^I + 2\sigma_G^I = 0,66$, соответствующей минимуму суммарной ошибки распознавания. Про-

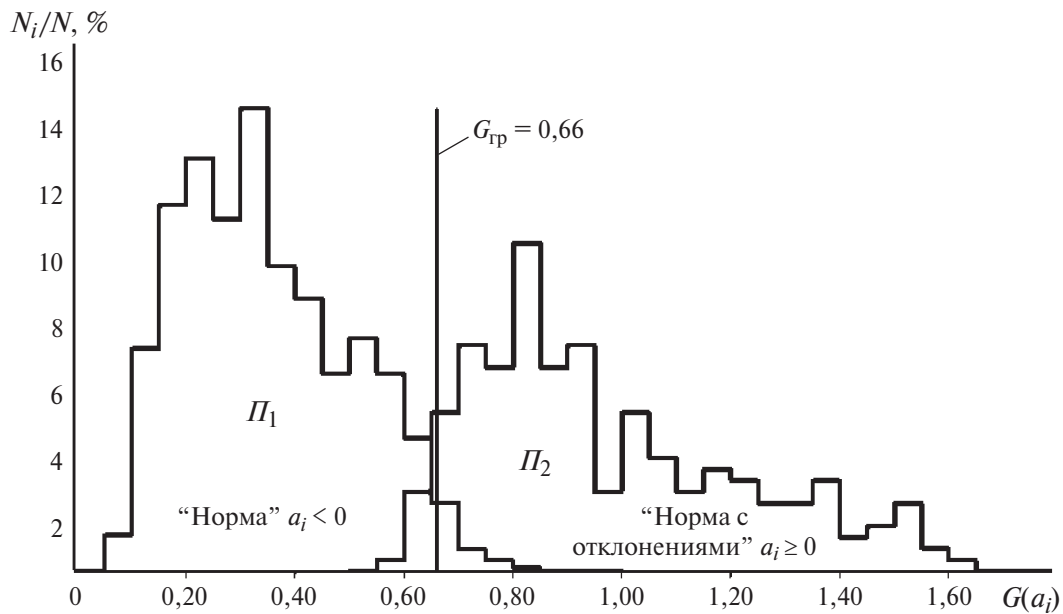


Рис. 1

верка полученного значения путем решения уравнения (4) дает хорошее совпадение результатов ($G_{\text{гр}} = 0,659$).

Ретроспективная информация по исследуемой группе трансформаторов содержит протоколы ХАРГ, для которых признак граничных концентраций прогнозирует наличие развивающегося дефекта. Более частый контроль трансформаторов с выполнением повторного ХАРГ не подтверждает полученную ранее оценку. Во всех подобных случаях использование критерия (2) позволяет распознать отсутствие дефекта сразу после первого анализа. Так, в трансформаторе ТДТН-40000/110 при проведении ХАРГ по графику отмечено превышение граничных концентраций этилена C_2H_4 (0,011) и ацетилена C_2H_2 (0,0024) с относительной скоростью более 15 % в месяц. По критерию граничных концентраций в нем прогнозируется развивающийся дефект электрического характера (дуговые разряды, искрение, пробой масла между обмотками или катушками или между катушками на землю). Дефектом затронута твердая изоляция ($CO_2/CO = 3,2$). Повторный ХАРГ не подтвердил поставленный ранее диагноз. Применение решающего правила (3) к результатам первого ХАРГ по условию $G = 0,382 < G_{\text{гр}}^I = 0,66$ позволяет сразу отнести состояние трансформатора к классу P_1 .

Разработанный метод может быть использован для распознавания значительных (критических) дефектов в трансформаторе. Однако построение границы раздела между классами состояний “норма с отклонениями”

и “ухудшенное” затруднено из-за недостаточной представительности относящихся к ним массивов данных. Так, из 1340 протоколов ХАРГ всего лишь 244 по правилу (3) следует отнести к классу состояний P_2 . Сформируем границу $G_{\text{гр}}^{II}$ раздела классов состояний “норма с отклонениями” и “ухудшенное”, как и $G_{\text{гр}}^I$ с использованием числовых характеристик распределения признака G для класса P_2 . Полученное при этом условие

$$G > G_{\text{гр}}^{II} = M_G^{II} + 2\sigma_G^{II} = 2,13 \quad (5)$$

является решающим правилом для распознавания значительных или даже критических дефектов в трансформаторе. Значения признака G для ретроспективных данных ХАРГ, принадлежащих классу состояний P_2 , а также граничное значение $G_{\text{гр}}^{II}$ показаны на рис. 2. Как следует из рисунка, значительная часть выборки из 244 протоколов ХАРГ относится к состоянию “норма с отклонениями” или “норма со значительными отклонениями”, т. е. располагается ниже установленной границы.

Для проверки корректности условия (5) воспользуемся дополнительной информацией по эксплуатации исследуемых трансформаторов, содержащейся в протоколах вывода в ремонт по состоянию отдельных единиц оборудования. Например, введенный в эксплуатацию в 1966 г. трансформатор ТДТН-31500/110 в 2000 г. подвергся аварийному ремонту с сушкой целлюлозной изоляции и восстановлением масла. В период с 2000 г. и до окончательного вы-

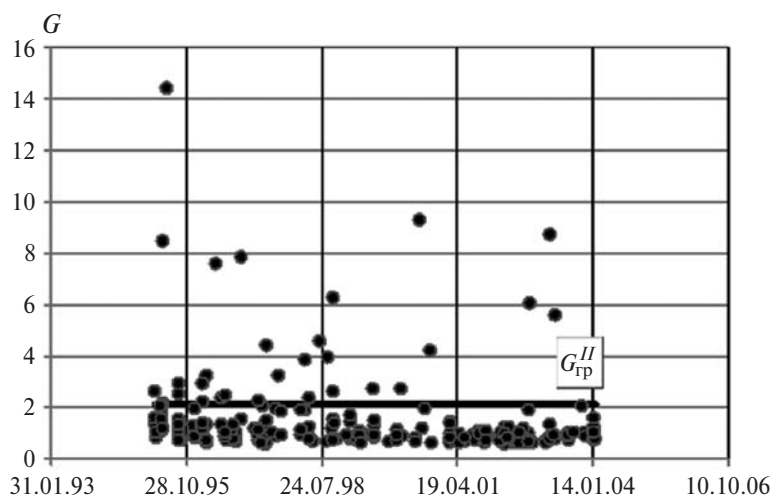


Рис. 2

Таблица 1

Дата	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO ₂	CO
11.09.2000	0,00311	0,0298	0,1009	0,0902	0,00033	0,22	0,011
22.11.2000	0,00315	0,01902	0,1101	0,08963	0,00034	0,121	0,008
14.06.2001	0,00085	0,0113	0,1836	0,1359	0,0006	0,419	0,02
09.10.2002	0,00077	0,01101	0,0283	0,02539	0,0001	0,229	0,003
08.04.2003	0,00361	0,02192	0,08598	0,05312	0,00112	0,379	0,009
15.04.2003	0,00282	0,02087	0,08578	0,05311	0,00109	0,367	0,009
15.10.2003	0,00022	0,00916	0,03968	0,02626	0,0002	0,232	0,006

вода из работы в 2006 г. его эксплуатация характеризовалась высокими концентрациями углеводородных газов (см. табл. 1), учащенными отборами проб масла на ХАРГ, профилактическими мероприятиями по сушке и дегазации масла из бака. По результатам анализа концентраций газов из бака (% об.) прогнозировались возможные перегрев, значительный (критический) дефект термического характера, повреждение твердой изоляции. Оценка состояния исследуемого трансформатора по ретроспективным данным ХАРГ за 2005 г. с использованием условия (5) показала, что он имеет устойчивый критический дефект, представляющий угрозу аварийного отказа (рис. 3). Поэтому было принято решение о недопустимости и нецелесообразности его дальнейшей эксплуатации.

Предложенный метод дает возможность выработать решающие правила для достоверного распознавания развивающихся и критических дефектов в силовых трансформаторах по результатам ХАРГ, а также сформировать область для принятия эксплуатационных решений в координатах используемых диагностических признаков. На рис. 3 показана об-

ласть состояний исследуемого трансформатора в координатах признаков G и CO_2/CO . В ней располагаются рабочие точки, каждая из которых характеризует результат ХАРГ с конкретной датой проведения. Введение совместно с G признака CO_2/CO и его предельно допустимых значений дополнительно позволяет установить, затронута ли дефектом целлюлозная изоляция трансформатора. С использованием приведенных в табл. 2 видов эксплуатационных воздействий, соответствующих выявленным классам состояний трансформатора, принимаются необходимые решения по его дальнейшей эксплуатации.

Выводы

1. Обоснованность и своевременность принятия решений о продлении или прекращении эксплуатации силового трансформатора зависят от итогов многопараметрической оценки его состояния, включающей результаты ХАРГ. Для повышения ее эффективности актуально дальнейшее развитие методов интерпретации этих результатов.

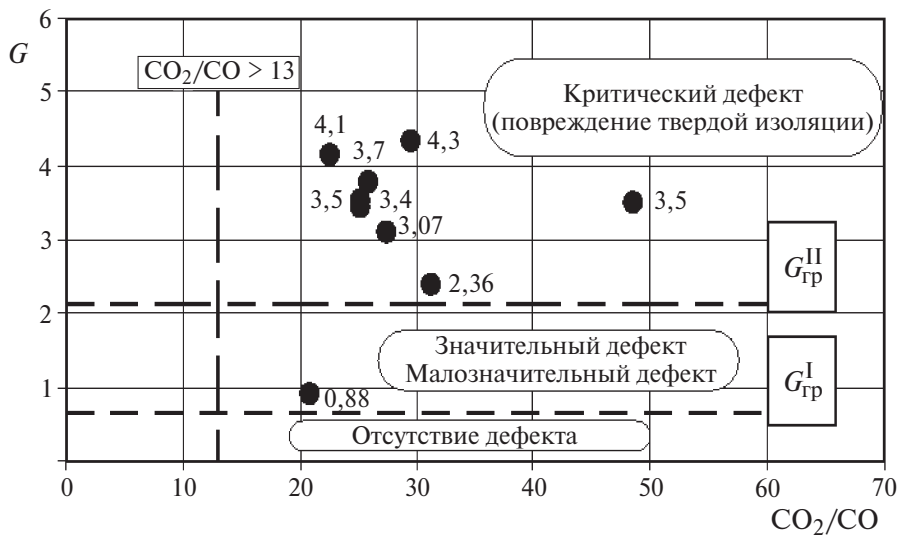


Рис. 3

Таблица 2

Класс состояния трансформатора	Решения по эксплуатации
Норма	Эксплуатация без ограничений
Норма с отклонениями	Учащенный контроль
Норма со значительными отклонениями	Дополнительные обследования
Ухудшенное	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
Предаварийное	Немедленный вывод из работы

2. Предложенный метод статистического распознавания дефектов в силовых трансформаторах основан на применении байесовского решающего правила для построения границ раздела классов состояний к исходной выборке данных (статистике ХАРГ). Использование линейной дискриминантной функции в качестве диагностического признака позволяет повысить его чувствительность к изменениям концентраций диагностических газов, вызываемым появлением дефекта в трансформаторе, существенно сократить размерность и улучшить разделимость пространства состояний на классы.

3. Достоинство метода заключается в возможности наглядного и достоверного формирования области принятия решений по эксплуатации трансформатора, согласованной с пространством состояний, заранее разделенным на классы.

4. Реализация предложенного метода подтвердила его высокую информативность, достоверность получаемых с его помощью диагностических оценок и обоснованность принимаемых на их основе эксплуатационных решений.

Список литературы

1. **Объем** и нормы испытаний электрооборудования: РД 34.45-51.300-97. — М.: НЦ ЭНАС, 1998.
2. **Методические** указания по диагностике силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и их вводов: МУ 0634-2006. — М.: Росэнергоатом, 2006.
3. **Методические** указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. — М.: НЦ ЭНАС, 2000.
4. **Давиденко И. В.** Методика получения допустимых и предельно допустимых значений контролируемых параметров маслonaполненного оборудования на основе массива наблюдаемых данных на примере анализа растворенных в масле газов. — *Электричество*, 2009, № 6.
5. **Попов Г. В.** Об оценке состояния силовых трансформаторов по результатам хроматографического анализа. — *Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*, 2003, № 3.
6. **Левин В. М., Емельянов О. В.** Статистическая модель нормально работающего (бездефектного) трансформатора с учетом режимов его работы в электрической сети. — В кн.: *Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования*. СПб.: ПЭИПК, 2005, вып. № 28.