

# Методы оценки граничных значений концентрации газов в масле трансформаторов по ретроспективным данным

ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., РАФИЕВА Т.К., ИСМАИЛОВА С.М.

*Представлены разработанные методы, алгоритмы и программы классификации парка трансформаторов по предельно допустимым значениям диагностических показателей.*

**Ключевые слова:** трансформаторы, техническое состояние, диагностические показатели, контроль

Проблема повышения эффективности контроля технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов (далее трансформаторов – Тр) относится к числу наиболее важных и трудных. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, выступления на форумах, семинарах, конференциях.

Контроль технического состояния осуществляется путем непрерывного или (и) дискретного измерения и расчета рекомендуемых СО 34.45-51.300–97 (Объем и нормы испытания электрооборудования) диагностических показателей (ДП) и сравнения их с предельно допустимыми значениями (ПДЗ). Эти значения, как правило, задаются в виде нормативов. И лишь в исключительных случаях, подчеркивая естественную взаимосвязь численных значений ДП с конструктивными особенностями оборудования и условиями его эксплуатации, приводится методика расчета ПДЗ.

Наглядным примером является [1], где отмечается зависимость оценок ДП от характеризующих трансформаторы признаков, таких как тип, назначение (блочные, для связи распределителей, резервные в системе собственных нужд) и др. Если учесть признаки условий эксплуатации, способствующих росту или уменьшению концентрации растворенных в масле газов, отмеченные в пп. 3.2 и 3.3 [1], а также признаки, «скрытые» под приведенным указанием «и др.», можно говорить о возможном влиянии десятков признаков и соответствии каждого измерения ДП некоторой совокупности разновидностей признаков.

Однако, несмотря на то, что в [1] приводится методология расчета ПДЗ (названных граничными значениями) как оценок квантилей статистической функции распределения (СФР) для заданного значения вероятности  $R=0,9(0,95)$  или  $R=0,1(0,05)$ , усредненные нормативы ПДЗ в энергосистемах не уточняются. И это неслучайно.

Если учесть все отмеченные признаки и их разновидности, способные влиять на ДП, и классифи-

*The methods, algorithms, and computer programs developed by the authors for classifying the fleet of transformers by the maximum permissible values of diagnostic indicators are presented.*

**Key words:** transformers, technical state, diagnostic indicators, monitoring

цировать ретроспективные данные по этим признакам, то в лучшем случае будем располагать единицами данных измерения ДП. В этих условиях ни о каких  $L=10, 15$  интервалах группирования данных и наличии не менее чем 50 измерений ДП [1] говорить не приходится. Если же учесть один – два признака, то нет никакой уверенности в том, что эти признаки основные. Приведенные в [1] усредненные ПДЗ концентраций газов в трансформаторном масле используются на практике не только для Тр, но и для другого маслonaполненного оборудования, хотя и известны недостатки такого подхода [2].

К чему же приводит недостаточный учет зависимости ПДЗ от паспортных данных (конструктивных особенностей) Тр и условий его эксплуатации? Пусть известны результаты хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ) для двух типов Тр, например двух- и трехобмоточных. При наличии однотипного дефекта активной части Тр, концентрация растворенных в масле газов зависит во многом от объема масла. Далее предположим, что рассматриваемый ДП по мере развития соответствующих дефектов возрастает. Определим ПДЗ этого ДП для всей совокупности данных измерения и обозначим его через  $\bar{P}_S^*$ . Затем определим ПДЗ этого ДП отдельно для каждого типа Тр. Обозначим их как  $\bar{P}_1^*$  и  $\bar{P}_2^*$ , где индексы «2» и «3» соответствуют двух- и трехобмоточным Тр.

На рис. 1 приведено сопоставление  $\bar{P}_S^*$ ,  $\bar{P}_2^*$  и  $\bar{P}_3^*$ , вычисленных соответственно по СФР  $F_S^*(P)$ ,  $F_2^*(P)$  и  $F_3^*(P)$ . В иллюстративных целях принято предположение о соответствии этих распределений равномерному закону. Как следует из рис. 1, пренебрежение значимыми признаками ведет к увеличению ПДЗ для первой группы данных ( $\bar{P}_S^* > \bar{P}_3^*$ ) и к снижению их для второй ( $\bar{P}_S^* < \bar{P}_2^*$ ). Иначе го-

вора, использование показателя  $\bar{P}_S^*$  в качестве ПДЗ для трехобмоточных Тр приводит к увеличению последствий проявления дефекта, а для двухобмоточных – к неоправданным ограничениям режима работы.

Таким образом, разработка метода оценки ПДЗ концентраций газов в масле по ретроспективным данным для заданных разновидностей признаков, характеризующих индивидуальность Тр, актуальна и имеет важное практическое значение. На практике приходится решать две задачи. Первая из них заключается в необходимости оценки индивидуальных ПДЗ для заданных разновидностей признаков, которые, по сути, выделяют конкретный Тр из множества Тр энергосистемы. Вторая задача заключается в разделении парка Тр энергосистемы на группы с одинаковыми значениями ПДЗ в каждой группе.

**Метод оценки индивидуальных ПДЗ концентраций газов в масле трансформатора.** Метод основывается на различной значимости признаков и их разновидностей. Суть метода заключается в последовательной классификации статистических данных по заданным разновидностям признаков и статистической проверке гипотезы о случайном расхождении ПДЗ до и после очередного этапа классификации.

Выполнить эти расчеты можно лишь по специальному алгоритму и программе на ЭВМ. Вручную они практически недоступны. Такая программа авторами разработана. Будем считать, что наряду с результатами ХАРГ известны конструктивные особенности Тр и сведения об условиях эксплуатации. Обозначим множество признаков, от которых предполагается зависимость концентрации растворенных газов, через  $n$ , а число разновидностей признаков – через  $r_i, i=1, n$ .

Разновидности признаков и данные ХАРГ заносятся в эмпирическую таблицу, число строк которой  $M$  равно числу проведенных ХАРГ:

Номер n/n	Признаки классификации					Данные ХАРГ							
	1	2	3	.....	n	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
1													
⋮													
M													

В соответствии с принятой в математической статистике терминологией многомерные данные эмпирической таблицы условимся называть конечной совокупностью данных (КСД). Напомним, что КСД это не аналог общепринятому пониманию выборки из генеральной совокупности. Во-первых, с ростом  $M$  среднее значение данных измерения не стремится к некоторому математическому ожида-

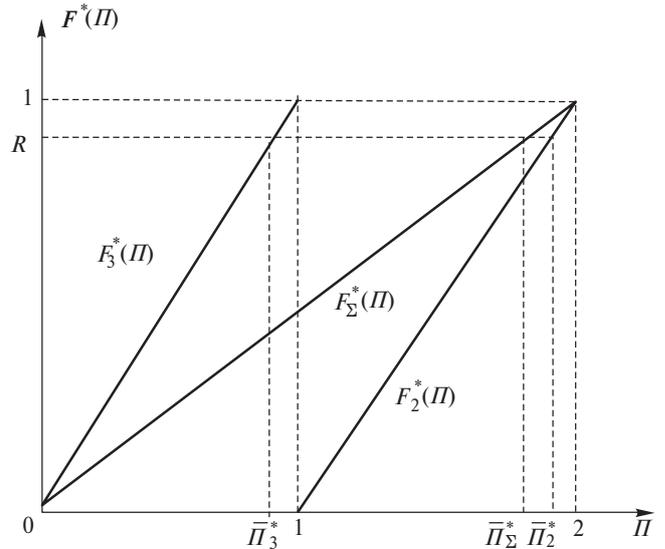


Рис. 1. Соотношение ПДЗ до и после классификации данных

нию. Во-вторых, СФР  $F_S^*(Pi)$  не только не известна, ей свойственна неслучайная изменчивость с изменением  $M$ . Если из КСД выбрать данные, соответствующие заданным разновидностям признаков, то эту совокупность данных будем называть выборкой.

В общем случае для заданных  $(n - i)$  признаков ретроспективные данные ХАРГ могут рассматриваться как КСД, а данные ХАРГ для заданных  $(n - j)$  признаков при  $i < j$  – как выборка из этой КСД. Например, если из совокупности данных для силовых трансформаторов с номинальным напряжением 220 кВ ( $i = 2$ ) выбрать данные о ДП для двухобмоточных Тр со сроком службы в интервале от 25 до 30 лет и наработкой после замены масла в интервале 3, 4 года, то первая группа данных  $i = 2$  рассматривается как КСД, а вторая группа с  $j = 5$  – как выборка.

Пусть заданы КСД и некоторая разновидность каждого из  $n$  признаков. Для наглядности без нарушения общности выберем один из показателей

ХАРГ и обозначим его как  $Pi$ , а массив КСД – как  $\{Pi\}_M$ . В рекомендуемом методе предусматривается следующая последовательность вычислений.

1. Формируются выборки для заданной разновидности каждого из  $n$  признаков. Обозначим  $i$ -ю выборку как  $\{Pi\}_{M_i}$ , где  $M_i$  – число реализаций ДП при классификации данных по  $i$ -му признаку.

2. КСД  $\{P\}_M$  размещается в порядке возрастания, и каждому значению  $P_j$  полученного вариационного ряда сопоставляется оценка СФР  $F_{S,j}^*(P) = j/M$  с  $j=1, M$ ; далее вычисляется ПДЗ как квантиль распределения  $F_S^*(P)$  с заданной вероятностью  $R=0,95(0,9)$ ; обозначим его как  $\bar{P}_S^*$ .

3. Аналогично строятся СФР каждой выборки  $\{P\}_{M_i}$ , причем  $F_{i,j}^*(P) = j/M_i$ ,  $j=1, M_i$ . Далее по этим СФР вычисляются ПДЗ при неизменном  $R$ ; обозначим их как  $\bar{P}_i^*$ ,  $i=1, n$ .

4. Вычисляются расхождения ПДЗ КСД и  $n$  выборок:

$$D_i^* = \bar{P}_S^* - \bar{P}_i^*, \quad i=1, n. \quad (1)$$

5. Определяется наибольшее расхождение ПДЗ КСД и выборок:

$$D^* = \max\{D_1^*, D_2^*, \dots, D_n^*\}. \quad (2)$$

Порядковый номер признака  $i$ , выборка  $\{P\}_{M_i}$  и число измерений выборки  $M_i$ , соответствующие  $D^*$ , запоминаются.

*Предположение:* если выборка с наибольшим различием  $\bar{P}_i^*$  от  $\bar{P}_S^*$  представительна, то представительны и все остальные  $(n-i)$  выборки. Это предположение основано на опыте вычислений, снижает время вычислений, в общем случае необязательно.

6. Проверка гипотезы о представительности выборки является одним из наиболее сложных разделов алгоритма расчета и проводится в следующей последовательности.

6.1. Вычисляется наибольшее расхождение СФР  $F_S^*(P)$  и  $F_i^*(P)$ :

$$D_{i\partial} = \max\{D_{i1}^*, D_{i2}^*, \dots, D_{iM_i}^*\}, \quad (3)$$

где

$$D_{ij} = \left| F_S^*(P_j) - F_i^*(P_j) \right|, \quad j=1, M_i$$

(индекс « $\partial$ » характеризует наибольшее отклонение СФР по эмпирическим данным).

6.2. Из КСД  $\{P\}_M$  изымаются  $M_i$  экспериментальных реализаций ДП с заданной разновидностью  $i$ -го признака. Обозначим оставшуюся часть КСД как  $\{P\}_{M-M_i}$ .

6.3. Методом статистических испытаний разыгрываются  $M_i$  реализаций ДП по распределению  $F_S^*(P)$ . Обозначим их как  $\{P_m\}_{M_i}$ ; индекс « $m$ » выделяет моделируемые реализации.

6.4. Строится СФР по данным множества  $\{P_m\}_{M_i}$ ; обозначим ее как  $F_i^*(P_m)$ .

Напомним, что выборка  $\{P_m\}_{M_i}$ , по сути, должна быть представительной, а распределение  $F_i^*(P_m)$  случайно различаться с  $F_S^*(P)$ . Погрешность моделирования обуславливается двумя причинами [3]. Первая из них связана с псевдослучайным характером программного моделирования случайных чисел  $x$  с равномерным распределением в интервале  $[0,1]$ . Поэтому не каждая выборка из  $M_i$  реализаций  $\{x_m\}_M$  будет соответствовать равномерному закону. Чем меньше  $M_i$ , тем больше вероятность такого несоответствия. Чтобы исключить из рассмотрения несоответствующие равномерному закону распределения реализации, применяется критерий Колмогорова с уровнем значимости 0,6. Существенное различие уровня значимости от традиционно используемых значений, равных 0,1(0,05), объясняется необходимостью исключить влияние ошибки второго рода.

Вторая причина погрешности при моделировании  $F_i^*(P_m)$  заключается в способе моделирования. Традиционно разыгрывание реализаций ДП по  $F_S^*(P)$  осуществляется по формуле:

$$x = x_i + \frac{(x_{i+1} - x_i)[x - F_1(x_i)]}{[F_1^*(x_{i+1}) - F_1^*(x_i)]} = x_i + (x_{i+1} - x_i)(nx - i), \quad (4)$$

где

$$x = F_1^*(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < x_1; \\ \frac{i}{n} + \frac{(x - x_i)}{n(x_{i+1} - x_i)}, & \text{если } x_i \leq x < x_{i+1}; \\ 1, & \text{если } x \geq x_n. \end{cases} \quad (5)$$

К недостаткам этого способа относится существенное различие средних и среднеквадратических значений реализации выборок  $\{P_m\}_{M_i}$  и аналогичных показателей КСД. Погрешность моделирования практически исключается, если воспользоваться формулой, предложенной в [3]:

$$x = x_i + (x_{i+1} - x_i)[(n+1)x - i], \quad (6)$$

где

$$x = F_3^*(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < x_1; \\ \frac{i}{n+1} + \frac{(x - x_i)}{(n-1)(x_{i+1} - x_i)}, & \text{если } x_i \leq x < x_{i+1}; \\ 1, & \text{если } x \geq x_n. \end{cases} \quad (7)$$

6.5. Формируется множество  $\{P_m\}_M$  как результат объединения  $\{P_m\}_{M-M_i}$  и  $\{P_m\}_{M_i}$ .

6.6. По данным множества  $\{P_m\}_M$  строится СФР, которую обозначим как  $F_S^*(P_m)$ .

6.7. Определяется наибольшее расхождение между  $F_S^*(P_m)$  и  $F_i^*(P_m)$ :

$$D_{imv}(H_1) = \max\{|F_S^*(P_m) - F_i^*(P_m)|\}, \quad (8)$$

где  $v$  – порядковый номер реализаций  $D_{im}$ ,  $v=1, N$ ;  $H_1$  – предположение (гипотеза) о представительности выборки  $\{P_m\}_{M_i}$ .

6.8. Пункты (6.3, 6.7) повторяются  $v=N$  раз. Множество из  $N$  значений  $D_{im}(H_1)$  обозначим как  $\{D_{im}(H_1)\}_N$ .

6.9. По данным  $\{D_{im}(H_1)\}_N$  формируется СФР  $F_i^*(D_m/H_1)$  и вычисляется распределение  $Q_i^*(D_m/H_1) = 1 - F_i^*(D_m/H_1)$ .

6.10. Для заданного значения ошибки первого рода  $\alpha = 1 - R$  вычисляется квантиль распределения  $Q_i^*(D_m/H_1)$ . Обозначим его как  $D_{ia}$  и назовем критическим значением наибольшего расхождения распределений  $F_S^*(P_m)$  и  $F_i^*(P_m)$ .

6.11. Если  $D_{i\partial} > D_{ia}$ , то предположение о представительности выборки  $\{P_m\}_{M_i}$  ошибочно, так же как и выбор  $\bar{P}_S^*$  в качестве ПДЗ: переход к п. 7 алгоритма. Если же  $D_{i\partial} \leq D_{ia}$ , то возникает вопрос: можно ли утверждать, что для выделенной группы Тр в качестве ПДЗ надо взять величину  $\bar{P}_i^*$ ? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо выполнить следующее.

6.12. Методом статистических испытаний моделировать  $M_i$  реализаций ДП по распределению  $F_i^*(P)$ ; обозначим это множество ДП как  $\{P_m\}_{M_i}^*$ .

6.13. По данным  $\{P_m\}_{M_i}^*$  построить СФР, которую обозначим как  $F_i^{**}(P_m)$ .

6.14. Сформировать множество значений  $\{P_m\}_M^*$  как результат объединения множеств значений  $\{P_m\}_{M-M_i}$  и  $\{P_m\}_{M_i}^*$ .

6.15. По данным  $\{P_m\}_M^*$  построить СФР  $F_S^{**}(P_m)$ .

6.16. Определить наибольшее абсолютное расхождение между  $F_S^{**}(P_m)$  и  $F_i^{**}(P_m)$ :

$$D_{imv}(H_2) = \max\{|F_S^{**}(P_{mj}) - F_i^{**}(P_{mj})|\}, \quad (9)$$

где  $H_2$  – гипотеза о соответствии ПДЗ значению  $\bar{P}_i^*$ .

6.17. Пункты (6.12, 6.16) повторить  $N$  раз. Множество значений  $D_{imv}(H_2)$ ,  $v=1, N$ , обозначим как  $\{D_{im}(H_2)\}_N$ .

6.18. По данным  $\{D_{im}(H_2)\}_N$  сформировать СФР, которую обозначим как  $F_i^{**}(D_m/H_2)$ .

6.19. Если  $F_i^{**}(D_{i\partial}/H_2) > Q_i^*(D_{i\partial}/H_1)$ , то в качестве ПДЗ может быть принято значение  $\bar{P}_i^*$ . При этом риск ошибочного решения будет минимальным.

7. Следующим шагом является учет влияния остальных  $(n-1)$  факторов, для чего вычисления в пп. 1, 6 повторяются, но в качестве КСД принимается выборка  $\{P_m\}_{M_i}$ , а число рассматриваемых признаков уменьшается на единицу.

8. Если  $F_i^{**}(D_{i\partial}/H_2) < Q_i^*(D_{i\partial}/H_1)$ , то расчет ПДЗ завершается, а в качестве ПДЗ принимается квантиль СФР КСД текущего этапа классификации данных, соответствующий вероятности  $R$ .

**Метод классификации парка Тр по ПДЗ концентрации газов в масле.** Рассмотренные оценки индивидуальных ПДЗ хотя и относились к конкретному Тр, но были аналогичны и для Тр с одноименными значимыми разновидностями признаков. Эти Тр образуют некоторую группу в трансформаторном парке энергосистемы. Например, они могли относиться ко всем силовым трансформаторам ( $i=1$ ) с номинальным напряжением 110 кВ ( $i=2$ ), мощностью  $S=(40, 60)$  МВт ( $i=3$ ), срок службы которых находится в интервале от 26 до 30 лет. Очевидно, что необходимость выполнять при каждом ХАРГ расчеты ПДЗ создавало бы на практике значительные трудности. «Механическая» классификация Тр по разновидностям некоторого признака или даже ряда признаков возможна. Однако, как было отмечено ранее, при этом нет гарантии, что рассматриваемые признаки наиболее значимы. Рекомендуемый метод классификации парка Тр по ПДЗ концентрации газов в масле сводится к следующей последовательности вычислений.

1. Рассчитывается СФР по КСД и вычисляется квантиль распределения для заданной вероятности  $R$ . Обозначаем этот квантиль как  $\bar{P}_S^*$ .

2. Формируются выборки для каждой разновидности  $i$ -го признака с  $i=1, n$ .

3. Рассчитываются СФР выборок, определяются квантили этих распределений  $\bar{P}_{ij}^*$  с  $i=1, n$ ;  $j=1, r_i$  для вероятности  $R$ .

4. Вычисляется наибольшее расхождение квантилей  $\bar{P}_{ij}^*$  и  $\bar{P}_S^*$  для каждого признака:

$$D_i^* = \max\{D_{i1}^*, D_{i2}^*, \dots, D_{ij}^*, \dots, D_{ir}^*\},$$

где

$$D_{ij}^* = \left| \bar{P}_S^* - \bar{P}_{ij}^* \right|, \quad i=1, n; \quad j=1, r_i.$$

5. Вычисляется наибольшее расхождение  $D^* = \max\{D^*\}_{r_i}$ . Фиксируется порядковый номер признака, его разновидность, соответствующие им выборка и СФР.

6. Проводится проверка гипотезы о представительности выборки, соответствующей  $D^*$ .

7. Если расхождение между СФР КСД и выборки случайное, то вычисления завершаются. В качестве ПДЗ для всех трансформаторов энергосистемы принимается  $\bar{P}_S^*$ . Иначе говоря, классификация парка Тр энергосистемы на группы с различающимися ПДЗ концентрации газов в масле нецелесообразна.

8. В противном случае повторяются вычисления пп. 2, 7, но в качестве КСД принимается непредставительная выборка, а число признаков классификации данных равно  $(n - j)$ ,  $j=1, (n - 1)$ , — число значимых признаков.

9. При завершении расчетов оценка ПДЗ и перечень значимых разновидностей признаков для первой группы Тр результаты заносятся в таблицу следующего вида:

Номер группы	Порядковый номер признака							ПДЗ с $R=0,95$
	1	2	3	...	$i$	...	$n$	
1.								
2.								
...								

10. Разновидности признаков и ПДЗ второй и всех последующих групп Тр устанавливаются аналогично с той разницей, что исходная КСД не содержит КСД первой группы, КСД первой и второй групп Тр и т.д.

**Заключение.** Использование ретроспективных данных хроматографического анализа растворенных в масле газов для оценки ПДЗ концентрации газов требует учета их зависимости от конструктивного исполнения и условий эксплуатации трансформаторов. Это требование впервые сформулировано в [1] и имеет важное значение в решении проблемы повышения эффективности контроля технического состояния трансформаторов.

При оценке технического состояния Тр использование усредненных ПДЗ концентрации раство-

ренных в масле газов, полученных даже для отдельных энергосистем, без учета конструктивных особенностей и условий эксплуатации Тр может привести к существенному развитию дефекта и отказу. Разработанная программа классификации Тр энергосистемы по группам с различающимися ПДЗ концентрации растворенных в масле газов позволяет повысить объективность анализа технического состояния Тр.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. — М., 2001.
2. Гречко О.Н., Давиденко И.В., Калачева Н.И. и др. Граничные значения концентрации газов в масле трансформаторов тока с конденсаторной изоляцией. — Электротехника, 2007, № 1.
3. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К., Назирова У.К. Методы статистического моделирования случайных величин по эмпирическим распределениям. — Изв. вузов. Проблемы энергетики (Казань), 2008, №9-10.

[16.06.11]

*Авторы: Фархадзаде Эльмар Мехти оглу окончил энергетический факультет Азербайджанского института нефти и химии (АЗИНЕФТЕХИМ) в 1961 г. В 1982 г. защитил докторскую диссертацию «Точность и достоверность характеристик надежности электроустановок» в Новосибирском электротехническом институте (НЭТИ). Руководитель отдела «Надежность энергетического оборудования» АЗНИПИИ энергетики (г. Баку).*

*Мурадалиев Айдын Зураб оглу окончил энергетический факультет АЗИНЕФТЕХИМ в 1982 г. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию «Методы количественной оценки технического состояния электроустановок». Главный специалист лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АЗНИПИИ энергетики.*

*Рафиева Тамара Каировна окончила энергетический факультет АЗИНЕФТЕХИМ в 1973 г. В 2007 г. защитила кандидатскую диссертацию «Имитационное моделирование индивидуальной надежности энергоблоков ТЭС». Главный специалист лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АЗНИПИИ энергетики.*

*Исмаилова Симузар Мовлан кызы окончила энергетический факультет АЗИНЕФТЕХИМ в 1985 г. Ведущий инженер лаборатории «Надежность энергетического оборудования» АЗНИПИИ энергетики.*