

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ТЕХНОЦЕНОЗОВ ДЛЯ АНАЛИЗА  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Воробьева Е.Я., Федорова С.П.,**

**научный руководитель канд. техн. наук, доцент Чупак Т. М.**

***Сибирский федеральный университет***

Силовые трансформаторы – это один из видов электрооборудования энергосистем, определяющий надежность электроснабжения. Актуальной является задача оценки возможности эксплуатации оборудования, своевременного вывода его в ремонт по техническому состоянию.

Трансформаторное масло представляет собой сложный состав насыщенных и ароматических углеводородов. Любое внутреннее повреждение изоляции в виде локального электрического разряда (частичный разряд) или локального нагрева (“горячая точка”) приводят к выделению тепла и, при температуре, превышающей 250-300 °С, крекингу - “разложению” масла на более легкие фракции. Основными продуктами разложения масла под действием термохимического процесса являются следующие основные газы:  $H_2$  - водород,  $CH_4$ - метан,  $C_2H_4$  - этилен,  $C_2H_6$ - этан,  $C_2H_2$ - ацетилен,  $CO$  - оксид углерода,  $CO_2$  - диоксид углерода.

Продолжаются исследования по совершенствованию методов диагностики технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов (СМТ). К основным причинам необходимости повышения эффективности системы диагностики следует отнести: неэффективность существующей системы регламентных испытаний, увеличение числа электроэнергетических объектов, имеющих большое число единиц стареющего оборудования, экономическую необходимость продления эксплуатационного ресурса оборудования.

Детерминированный подход при решении таких задач неприменим для практически бесконечного количества электрооборудования. Появление электрического хозяйства в современном понимании сделало неизбежным отказ от расчетов, основанных на исследованиях единичного, и переход к вероятностным (статистическим) представлениям. Статистику концентрации газов неверно математически описывать параметрами нормального распределения (математическим ожиданием и дисперсией).

В данной работе применяется системный подход, в основе которого лежит рассмотрение объектов как систем. Трансформатор относится к сложным вероятностным системам, так как он сложен по устройству, числу входящих элементов и параметров, а рабочие режимы представляют собой стохастические процессы.

В данной работе в качестве технической системы рассматривается филиал ОАО «Тываэнерго». Используются статистические данные по газу  $CO_2$  для 34 СМТ за временной интервал в 14 лет. Рассматриваемую техническую систему можно назвать техноценозом [5], т.к. отдельные её элементы (подсистемы), с одной стороны, достаточно независимы и не связаны между собой жестко, а с другой, – объединены слабыми связями, определяемыми единой системой управления, снабжения, эксплуатации, а также общей целью функционирования.

В нашей работе, мы пытаемся установить взаимосвязь концентрации растворенных в масле газов и технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов, используя ранговый анализ. Ранговый анализ – метод исследования больших технических систем, имеющий целью их статистический анализ, а также оптимизацию и полагающий в качестве основного критерия форму видовых и ранговых распределений. Применение линейного множественного регрессивного анализа к описанию со-

держания газов в СМТ рассматриваемой электрической сети через выбранные технологические параметры невозможно из-за низкого уровня достоверности.

Строим ранговое параметрическое распределение в порядке убывания концентрации газов и ранговую трехмерную поверхность техноценоза (рисунок 1).

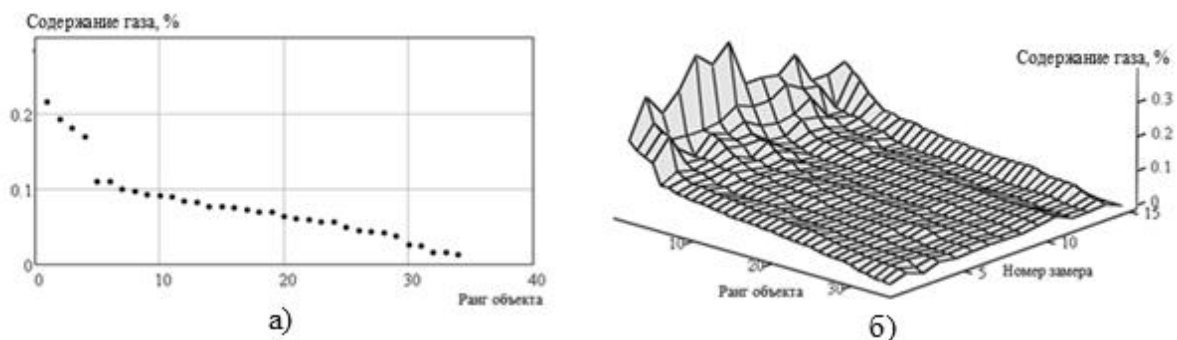


Рисунок 1 – а) ранговое параметрическое распределение техноценоза;  
б) ранговая трехмерная поверхность техноценоза

Для применения данной методики, необходимо доказательство, что статистические данные не подчиняются закону нормального распределения.

Статистическое распределение называется гауссовым (нормальным), если зависимость его среднего и дисперсии от объёма выборки незначительна, т.е. при достаточно большом числе независимых испытаний среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины сходится по вероятности к ее математическому ожиданию. Распределение вероятностей, которое в одномерном случае задается функцией плотности распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \mu_i)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где параметр  $\mu$  — математическое ожидание, медиана и мода распределения, а параметр  $\sigma$  - стандартное отклонение ( $\sigma^2$  — дисперсия) распределения.

Проведём анализ полученных результатов:

1. При проверке гипотезы о несоответствии генеральной совокупности нормальному распределению по критерию Пирсона, теоретические и эмпирические частоты отличаются значительно. Гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности отвергается.

Статистикой критерия Пирсона служит величина

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^e \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j}, \quad (2)$$

где  $p_j$  - вероятность попадания изучаемой случайной величины в  $j$ -и интервал, вычисляемая в соответствии с гипотетическим законом распределением  $F(x)$ .

2. Проверка гипотезы о нормальном распределении методом спрямлённых диаграмм.

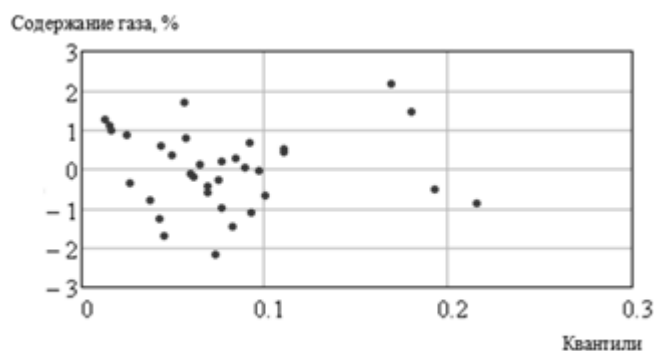


Рисунок 2 – Проверка гипотезы о несоответствии распределения нормальному закону  
Из графика видно, что точки не лежат вблизи какой-либо прямой, следовательно гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности отвергается.

3. Проверка взаимосвязанности данных с помощью коэффициента конкордации, определенного для совокупности ранговых параметрических распределений, характеризует степень взаимосвязанности техноценоза. Он показывает согласованность перемещения объектов по ранговой поверхности и при переходе от одного временного интервала к последующему.

$$W = \frac{12S(\Delta^2)}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j}, \quad (3)$$

где  $m$  – число групп, которые ранжируются,  $n$  – число переменных,  $T_j = \sum_{l=1}^L (t_l^3 - t_l)$  – показатель связанных рангов в ранжировании  $j$ -го эксперта,

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m R_{ij} \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \right)^2 / n, \quad R_{ij} - \text{ранг } i\text{-фактора у } j\text{-единицы.}$$

В нашем случае коэффициент конкордации значим, что свидетельствует о взаимосвязанности исследуемого техноценоза и позволяет использовать созданную базу данных для интервального оценивания, нормирования и прогнозирования поведения объектов техноценоза.

4. Выборочный коэффициент линейной корреляции, определенный для пары ранговых распределений, характеризует степень их взаимосвязанности. Величины объектов в 78 % случаев коррелируют, что указывает на существующую связь между элементами исследуемой системы.

Процент заданных значений корреляции:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n1} S_i}{n1^2 - n1} \cdot 100 = 78,1. \quad (4)$$

Очевидно, что в данном случае мы имеем дело с техноценозом [2,6].

Проведем аппроксимацию совокупности точек представленных на рисунке 1(a), в результате которой получим аналитическую зависимость. Данная зависимость получена методом наименьших модулей

$$F(Y_1, b) = \sum_i |(Y)_i - f(R_i, w1, b)|. \quad (5)$$

В качестве критерия близости искомой функции в данном методе используется минимум суммы модулей разностей эмпирических и теоретических данных, рассчитанных по уровню регрессии. Появляется возможность вывода результатов аппроксимации в графической форме (рисунок 3).

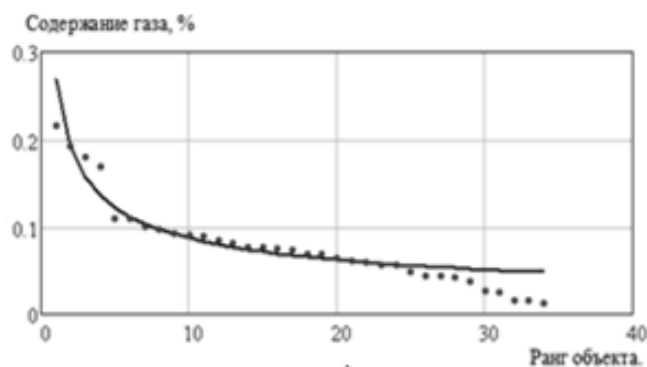


Рисунок 3 – Ранговое параметрическое распределение техноценоза. Сплошная линия – аппроксимационная кривая, полученная методом наименьших модулей

Следующей процедурой рангового анализа является интервальное оценивание параметрического распределения [1,3,6]. Оно позволяет определить, у каких объектов техноценоза аномальная концентрация газов, растворённых в масле.

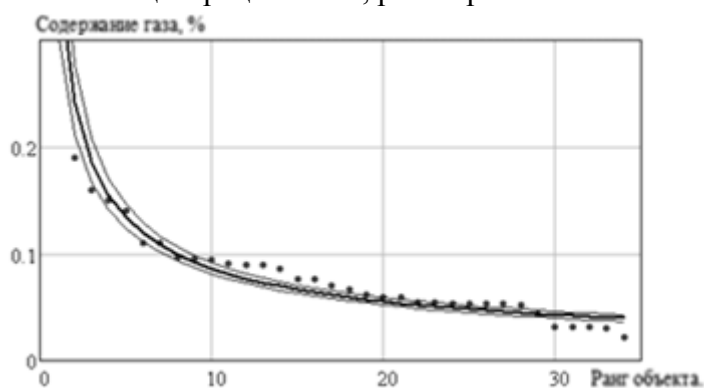


Рисунок 4 – Доверительный интервал для полного рангового параметрического распределения в линейных осях. Сплошные линии – аппроксимационная кривая, верхняя и нижняя доверительные границы

По результатам интервального оценивания определены объекты с аномально высоким содержанием газа. Для проверки достоверности полученных результатов, по методике [4] произведён расчёт относительной скорости нарастания газов, который подтвердил наличие развивающегося дефекта, а состав и отношение пар газов выявили вероятные причины их появления в масле СМТ. В результате расчета относительная скорость для трансформатора № 9 составляет более 20%, что указывает на наличие быстро развивающегося дефекта в трансформаторе. Это подтверждает решение поставить данный трансформатор на учащённый контроль с одной стороны, и достоверность полученных результатов, с другой.

В данной работе доказана принадлежность статистических данных по ХАРГ к статистике ценологического типа; установлено, что проведённые исследования позволяют прогнозировать не только развивающийся, но и зарождающийся дефект; подтверждена возможность использования данного метода для анализа технического состояния маслонеполненных трансформаторов.

### Список литературы

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. - Томск: Издание ТГУ, 1993. - 552 с.
2. Чертыкин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. – М.: Финансы и статистика, 1982. - 319 с.
3. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. - М.: Изд -во ТГУ -Центр системных исследований, 2005. - 384 с . (Компьютерная версия в сети Интернет - <http://gnatukvi.ru/ind.html>).
4. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в масле силовых трансформаторов РД 153-34.0-46.302-00. - РАО "ЕЭС России"-2011.
5. Гнатюк В.И., Лагуткин О.Е. Ранговый анализ техноценозов. – Калининград: БНЦ РАЕН - КВП ФПС РФ, 2000 - 86 с.
6. Кендалл М. Ранговые корреляции. Зарубежные статистические исследования. – М.: Статистика, 1975. - 216 с.