

- 4 более благоприятный режим работы элементов зарядного устройства при протекании разрядного тока, связанный с шунтированием выхода ЗУ при срабатывании разрядника;
- 5 возможность контроля состояния среды, заполняющей межэлектродный промежуток электродной системы, путем измерения величины зарядного тока.

Таким образом, в силу приведенных выше положительных качеств, в погружных скважинных устройствах целесообразно использовать схему построения ГИТ с зарядкой накопительной емкости через межэлектродный промежуток в жидкости.

**Список литературы:** 1. *Г.А. Гулый* Научные основы разрядноимпульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с. 2. Патент №18912 України, МПК 6 Е 21 43/25, В 21 D 26/12. Електродна система пристрою для електрогідравлічної дії на пласт // *Л.П. Трофімова, С.Г.Поклонов, В.Г. Жекул.*- № 93006694; Заявл. 24.09.1993 (Україна); Опубл. 28.02.2000; Промислова власність. – 2000. – № 1. 3. Патент №15530 України, МПК 5 Н 01 Т 9/00. Спосіб генерування електричних розрядів у воді // *І.Т.Вовк, М.Б.Соболева, М.П.Байдиченко, О.М.Курач.* – № 94322121; Заявл. 28.06.93 (Україна); Опубл. 30.06.97; Промислова власність. – 1997. – № 3.  
*Поступила в редколлегию 22.09.2008.*

УДК 621.314

**О.В.ШУТЕНКО**, НТУ «ХПИ», Харьков

## **ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

У статті наведена процедура нечіткого висновку для виявлення дефектів високовольтних трансформаторів. Виконане тестування показало високу ефективність запропонованої системи. Для всіх 164 трансформаторів діагноз, поставлений експертною системою, повністю збігся з реальним станом трансформаторів.

In article procedure of an indistinct conclusion for detection of defects of high-voltage transformers is suggested. The executed testing has shown high efficiency of the offered system. For all 164 transformers the diagnosis content expert system completely has coincided with a real condition of transformers.

**Постановка задачи.** В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем электроэнергетической отрасли, как Украины, так и ряда других государств является общее старение парка электротехнического оборудования. По разным сведениям от 70 до 80 % высоковольтных трансформаторов

отработали или приближаются к нормативному сроку службы 25 лет. В силу экономических причин замена устаревшего оборудования проводится крайне медленно и поэтому в ближайшее время в эксплуатации будут находиться трансформаторы, отработавшие свой ресурс. В связи с этим наиболее острым вопросом будет являться обеспечение эксплуатационной надежности и продления срока службы таких трансформаторов. Одним из путей решения данной задачи является совершенствование методов диагностики высоковольтных трансформаторов.

Хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ), является тем методом, который позволяет выявить до 80% всех дефектов в трансформаторе. Данный метод широко используется ведущими мировыми энергетическими компаниями. При этом каждая из компаний применяет собственную систему оценки и определения типа дефекта трансформатора. Несмотря на многообразие используемых методик интерпретации результатов ХАРГ существует высокая вероятность пропуска дефекта. Поэтому совершенствование методов интерпретации результатов ХАРГ является актуальной задачей, которая требует дальнейшего рассмотрения.

**Анализ публикаций.** Наиболее часто используемые методики интерпретации результатов ХАРГ рассмотрены в [1]. В [2] показано, что концентрации растворенных в масле газов могут превышать не только граничные, но и гранично-допустимые значения и при отсутствии дефекта в трансформаторе. Причинами роста концентраций газов в бездефектных трансформаторах, являются эксплуатационные воздействия. Там же предложен метод распознавания таких воздействий в условиях отсутствия информации о режимах работы трансформаторов. В [3] предложен метод интерпретации результатов ХАРГ, в котором основным диагностическим признаком наличия дефекта являются не концентрации растворенных в масле газов, а характер их изменения во времени. При этом процедура распознавания состояния трансформатора сводится к проверке статистических гипотез о значимости корреляционных связей. В силу того, что результаты измерений и методика интерпретации являются условно-определенными, то практическую реализацию предложенного в [3] метода целесообразно осуществлять с использованием аппарата нечеткой логики [4].

**Цель статьи** – В данной статье рассмотрена процедура нечеткого вывода для обнаружения развивающихся дефектов высоковольтных трансформаторов.

**Метод интерпретации результатов ХАРГ.** Процедуру интерпретации результатов ХАРГ можно разбить на два этапа. На первом этапе определяется наличие либо отсутствие дефекта, на втором уточняется тип дефекта.

На основании результатов полученных в [2, 3] алгоритм распознавания можно представить следующим образом. Для определения характера изменения концентраций растворенных в масле газов во времени введем три переменные:

$K_1$  – характеризует наличие значимой положительной корреляции между газами и временем эксплуатации на диагностируемом промежутке времени (проверяет наличие роста концентраций газов). Данная переменная имеет две возможных реализации  $K_1 = 0$  (если ни один из газов углеводородного ряда не имеет значимой корреляции со временем) и  $K_1 = 1$  (если хотя бы два газа углеводородного ряда значимо коррелированы со временем).

$K_2$  – характеризует наличие значимой положительной корреляции между газами в исследуемом трансформаторе на диагностируемом промежутке (проверяет наличие одновременного роста концентраций газов), примем  $K_2 = 0$  если ни один из газов углеводородного ряда значимо не коррелирован между собой и  $K_2 = 1$  если существует хотя бы одна пара газов углеводородного ряда имеющая значимую положительную корреляцию.

$K_3$  – характеризует наличие значимой корреляции между одноименными газами соседних трансформаторов на подстанции (проверяет причину роста концентраций). Пусть  $K_3 = 0$  если ни одна из пар газов углеводородного ряда не имеет значимой корреляции и  $K_3 = 1$  если существует хотя бы одна пара газов имеющая значимую положительную корреляцию.

В зависимости от значения данных переменных определяется состояние трансформатора. Решающее правило для обнаружения развивающихся дефектов, при различных значениях  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  приведено в табл. 1.

В случае если по результатам распознавания выявлено наличие дефекта, то для определения его типа используем методику интерпретации результатов ХАРГ рекомендуемую в [5]. Значения отношений пар газов и соответствующие им типы дефектов приведены в табл. 2.

**Формирование процедуры нечеткого вывода для обнаружения развивающихся дефектов.** Реализация данного этапа подразумевает определение состояния переменных  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  с последующей постановкой диагноза согласно алгоритму приведенному в табл. 1.

Определение значений переменных  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  производится путем сравнения расчетных значений коэффициентов парной корреляции  $\rho$  с табличными значениями. Однако принимаемое решение будет зависеть не только от расчетного значения  $\rho$ , но и от выбранного уровня значимости  $\alpha$ . В результате при одном и том же значении  $\rho$ , принимаемое решение может измениться на противоположное, если изменится значение доверительной вероятности. Более того, наличие шумовой компоненты в результатах измерений приводит к тому, что они являются нечеткими. Для повышения достоверности принятия решения используем математический аппарат нечеткой логики.

Рассмотрим процедуру нечеткого вывода для определения значений переменных  $K_1, K_2, K_3$  на примере переменной  $K_1$ .

Таблица 1 – Решающее правило для обнаружения развивающихся дефектов

Ключи			Состояние
$K_1$	$K_2$	$K_3$	
0	0	0	Вероятней всего дефект отсутствует
0	0	1	Вероятней всего дефект отсутствует, картины газов идентичны для всех трансформаторов подстанции.
0	1	0	Рост концентрации газов без развития во времени, внешние воздействия.
0	1	1	Рост концентрации газов без развития во времени, картины газов идентичны для всех трансформаторов подстанции, внешние воздействия.
1	0	0	Рост концентрации отдельных газов, необходимы дополнительные анализы.
1	0	1	Рост концентрации отдельных газов, картины газов идентичны для всех трансформаторов подстанции, внешние воздействия.
1	1	0	Наличие дефекта
1	1	1	Вероятней всего интенсивные внешние воздействия, необходимы дополнительные анализы.

Входными переменными являются значения коэффициентов парной корреляции между газами углеводородного ряда и временем эксплуатации.

*Этап фаззификации.* На данном этапе выделяются входные лингвистические переменные:

$$\text{ЛП}_{\text{вх } i} \quad i = 1 \dots 5$$

где  $i$  – номер коэффициента парной корреляции данного газа и времени.

Входные функции принадлежности будут иметь вид:

$\text{ЛП}_{\text{вх } 1}$ : <корреляция метана со временем>

$\text{ЛП}_{\text{вх } 2}$ : <корреляция ацетилена со временем>

$\text{ЛП}_{\text{вх } 3}$ : <корреляция этилена со временем>

$\text{ЛП}_{\text{вх } 4}$ : <корреляция этана со временем>

$\text{ЛП}_{\text{вх } 5}$ : <корреляция водорода со временем>

Далее  $\text{ЛП}_{\text{вх } i}$  делится на несколько лингвистических термов  $\text{ЛТ}_{ij}$  характеризующих особенности состояния данной переменной:

$$\text{ЛТ}_{ij}, j = 1 \dots n,$$

где  $j$  – номер термина  $\text{ЛП}_{\text{вх } i}$ ,  $n$  – количество термов, на которое разбито –  $\text{ЛП}_{\text{вх } i}$ .

Таблица 2 – Определение характера дефекта в трансформаторе по содержанию газов в масле

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение пар газов		
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
1. Нормальное состояние	<0,1	0,1 – 1	≤1
2. Частичные разряды с низкой плотностью энергии	<0,1	<0,1	≤1
3. Частичные разряды с высокой плотностью энергии	0,1 – 3	<0,1	≤1
4. Разряды малой мощности	<0,1	0,1 – 1	≥1
5. Разряды большой мощности	0,1 – 3	0,1 – 1	≥3
6 Термический дефект низкой температуры (Т<150°С)	<0,1	0,1 – 1	1÷3
7. Термический дефект в диапазоне низких температур (150÷300°С)	<0,1	≥1	≤1
8. Термический дефект в диапазоне средних температур (300÷700°С)	<0,1	≥1	1÷3
9. Термический дефект высокой температуры(более 700°С)	<0,1	≥1	≥3

Разбиение на термы проводилось следующим образом:

ЛП<sub>вх 1</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>11</sub>: <корреляция значима – Y>

ЛТ<sub>12</sub>: <корреляция не значима – N>

ЛП<sub>вх 2</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>21</sub>: <корреляция значима – Y>

ЛТ<sub>22</sub>: <корреляция не значима – N>

ЛП<sub>вх 3</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>31</sub>: <корреляция значима – Y>

ЛТ<sub>32</sub>: <корреляция не значима – N>

ЛП<sub>вх 4</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>41</sub>: <корреляция значима – Y>

ЛТ<sub>42</sub>: <корреляция не значима – N>

ЛП<sub>вх 5</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>51</sub>: <корреляция значима – Y>

ЛТ<sub>52</sub>: <корреляция не значима – N>

Затем проводится прием входного четкого значения для системы с нечеткой логикой, а также поочередное считывание из базы знаний, всех функций принадлежности, которые имеют отношение к данному входному значе-

нию, и устанавливается значение достоверности измеренного значения каждому ЛТ<sub>ij</sub> по функциям принадлежности.

В качестве функций принадлежности для каждого из термов была выбрана трапециидальная функция, математическое выражение которой имеет вид:

$$f_T(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}. \quad (1)$$

Поскольку неопределенность при оценке значимости коэффициента парной корреляции, обусловлена использованием различных уровней доверительной вероятности, то параметры функции принадлежности определялись по критическим значениям коэффициентов парной корреляции при различных уровнях доверительной вероятности. На рис. 1 приведена функция принадлежности для объема выборочных значений  $N = 7$  (критическое значение коэффициента парной корреляции при  $p = 0,95$  составляет 0,582, при  $p = 99,95 - 0,898$ ). Терм  $Y$  имеет координаты (0,57, 0,66, 1, 1), а терм  $N(-1, -1, 0,5, 0,59)$ .

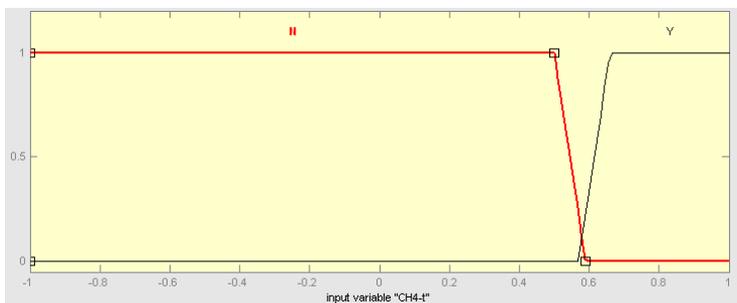


Рисунок 1 – Трапециидальная функция принадлежности для объема выборочных значений  $N = 7$

Выходные лингвистические переменные имеют вид:

ЛП<sub>вых 1</sub>: <Наблюдается значимый рост газов углеводородного ряда во времени – OPEN>

ЛП<sub>вых 2</sub>: <Значимый рост газов углеводородного ряда во времени отсутствует – CLOSE>

Разбиение на термы проводилось следующим образом:

ЛП<sub>ВЫХ 1</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>11</sub>: <Рост есть – D>

ЛТ<sub>12</sub>: <Рост отсутствует – N>

ЛП<sub>ВЫХ 2</sub> разделена на два ЛТ

ЛТ<sub>21</sub>: <Рост есть – D>

ЛТ<sub>22</sub>: <Рост отсутствует – N>

В качестве функций принадлежности для каждого из термов была выбрана треугольная функция, математическое выражение которой имеет вид:

$$f_{\Delta}(x, a, b, c) = \left. \begin{array}{l} 0, \quad x \\ \frac{x-a}{b-a}, \quad a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, \quad b \leq x \leq c \\ 0, \quad c \leq x \end{array} \right\}. \quad (2)$$

Терм D имеет координаты (0, 1, 1), а терм N (0, 0, 1). Графически функция принадлежности для выходных переменных приведена на рис. 2.

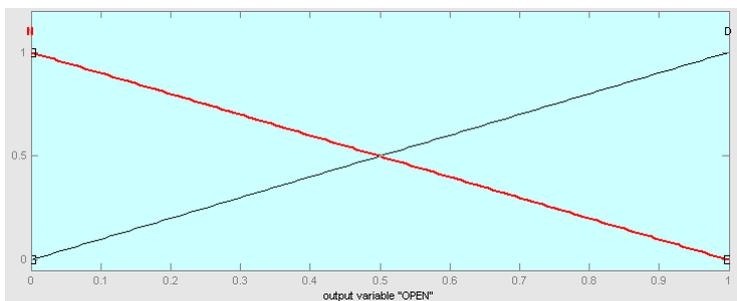


Рисунок 2 – Треугольная функция принадлежности выходной переменной

Результатом работы блока фаззификации является массив нечетких выходов, которые представляют собой набор пар ЛТ<sub>ij</sub> и его значение достоверности.

$$\text{ЛП}_{\text{ВХ } i} = \left\{ z_i \mid \mu_{\text{ЛТ}_{ij}}(z_i) \right\}, \quad \mu_{\text{ЛТ}_{ij}}(z_i) \in [0,1], \quad (3)$$

где:  $z_i$  – четкое входное значение коэффициента парной корреляции данного газа и времени.

*Этап вычисления правила.* Система с нечеткой логикой должна иметь базу правил, которая, по сути представляет собой эмпирические знания эксперта о механизме управления. Для вычисления правил используются нечеткие входы, полученные от блока фаззификации, и правила, находящиеся в

базе знаний. В левой части правил перебираются возможные ситуации на входе системы, а в правой части указывается, какая ЛП описывает правильную реакцию системы.

База правил имеет следующий вид:

**Правило 1:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 2:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 3:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 4:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 5:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 6:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 7:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 8:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 9:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 10:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 11:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 12:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 13:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 14:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 15:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 16:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 17:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in Y]$  ТО  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 18:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t$

$\in M$ ] И  $[H_2-t \in Y]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 19:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 20:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 21:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 22:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 23:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 24:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 25:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 26:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in D \text{ CLOSE} \in M]$ ;

**Правило 27:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in N \text{ CLOSE} \in D]$ ;

**Правило 28:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in M]$  И  $[C_2H_4-t \in Y]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in N \text{ CLOSE} \in D]$ ;

**Правило 29:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in N]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in Y]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in N \text{ CLOSE} \in D]$ ;

**Правило 30:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in N]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in Y]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in N \text{ CLOSE} \in D]$ ;

**Правило 31:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in N]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in Y]$  TO  $[OPEN \in N \text{ CLOSE} \in D]$ ;

**Правило 32:** ЕСЛИ  $[CH_4-t \in N]$  И  $[C_2H_4-t \in M]$  И  $[C_2H_2-t \in M]$  И  $[C_2H_6-t \in M]$  И  $[H_2-t \in M]$  TO  $[OPEN \in N \text{ CLOSE} \in D]$ ;

Для предпосылок каждого из правил находим уровни отсечения с использованием операции минимум.

*Этап дефаззификации.* На данном этапе происходит преобразование нечеткой информации, содержащейся в виде достоверности лингвистического термина, в четко определенное значение. Дефаззификация производится по фигуре, полученной путем сложения всех функций принадлежности термов входной переменной. При выборе метода дефаззификации анализировались следующие методы:

1. *Метод центра тяжести:* Центр тяжести или центроид площади рассчитывается по формуле:

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx}, \quad (4)$$

где:  $y$  – результат дефаззификации;  $x$  – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной  $w$ ;  $\mu(x)$  – функция принадлежности нечеткого множества, соответствующего выходной переменной  $w$  после этапа аккумуляции;  $\min$  и  $\max$  – левая и правая, точки интервала носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной  $w$ .

2. *Метод центра площади:* Центр площади определяется как:

$$\int_{\min}^u \mu(x) dx = \int_u^{\max} \mu(x) dx. \quad (5)$$

Другими словами центр площади равен абсциссе, которая делит площадь, ограниченную графиком кривой функции принадлежности соответствующей выходной переменной, на две равные части.

3. *Метод левого модального значения:* Левое модальное значение рассчитывается по формуле:

$$y = \min\{x_m\}, \quad (6)$$

где:  $x_m$  – модальное значение (мода) нечеткого множества, соответствующего выходной переменной  $w$  после этапа аккумуляции;

В этом случае значение выходной переменной определяется как мода нечеткого множества для соответствующей выходной переменной или наименьшая из мод (самая левая), если нечеткое множество имеет несколько модальных значений.

4. *Метод правого модального значения:* Правое модальное значение рассчитывается по формуле:

$$y = \max\{x_m\}. \quad (7)$$

Другими словами, значение выходной переменной определяется как мода нечеткого множества для соответствующей выходной переменной или наибольшая из мод (самая правая), если нечеткое множество имеет несколько модальных значений.

Для выбора наиболее эффективного метода, используем значения коэффициентов парной корреляции газов углеводородного ряда и времени эксплуатации для трансформатора «Постниково» Т-1 Донецкой области, которые составили: 0,771, 0,775, 0,747, 0,803 и 0. Поскольку данный трансформатор имеет дефект то состояние ключа должно соответствовать OPEN  $\in D$ . Подставим данные значения коэффициентов парной корреляции на вход программы и меняя методы дефаззификации получим следующие значения выходной переменной OPEN:

Метод центра тяжести  $OPEN \in D$  на 67 %

Метод центра площади  $OPEN \in D$  на 71 %

Метод левого модального значения  $OPEN \in D$  на 72 %

Метод правого модального значения  $OPEN \in D$  на 100 %

Таким образом, в качестве метода дефаззификации был принят метод правого модального значения, который обеспечивает наибольшую достоверность при определении степени принадлежности выходных переменных.

На выходе данная система возвращает степень принадлежности ключа  $K_1$  состояниям  $OPEN$  или  $CLOSE$ .

По аналогии формируются процедуры нечеткого вывода для определения значений переменных  $K_2$  и  $K_3$ . Полученные значения переменных  $K_1, K_2, K_3$  позволяют выполнить процедуру диагностики состояния трансформатора.

**Диагностика состояния трансформатора.** Входными переменными являются значения переменных  $K_1, K_2, K_3$ , которые характеризуют поведение газов на диагностируемом промежутке. Численные значения этих переменных берутся с выходов предыдущих блоков.

*Этап фаззификации.* Выделяем входные лингвистические переменные:

$$ЛП_{вх\ i} \quad i = 1 \dots 3,$$

где  $i$  – номер ключа характеризующего поведение кривых газов во времени;

Входные функции принадлежности будут иметь вид:

$k_1$ : <значимый рост концентрации газов во времени>

$k_2$ : <одновременный рост концентраций нескольких газов>

$k_3$ : <одновременный рост концентрации нескольких газов в соседних трансформаторах >

Далее  $ЛП_{вх\ i}$  делим на несколько лингвистических термов  $ЛТ_{ij}$  характеризующих особенности состояния данной переменной. Разбиение на термы проводилось следующим образом:

$k_1$  разделена на два ЛТ

$k_{11}$ : <OPEN >

$k_{12}$ : <CLOSE>

$k_2$  разделена на два ЛТ

$k_{21}$ : <OPEN >

$k_{22}$ : <CLOSE>

$k_3$  разделена на два ЛТ

$k_{31}$ : <OPEN >

$k_{32}$ : <CLOSE>

В качестве функций принадлежности для каждого из термов была выбрана трапециидальная функция принадлежности, с координатами для терма <OPEN > (0,45; 0,5; 1; 1) для терма <CLOSE> (0; 0; 0,48; 0,52). Данная функция принадлежности для входной переменной  $k_1$  приведена рис. 3.

В качестве выходных лингвистических переменных принимаем:

$$\text{ЛП}_{\text{вых } i} \quad i = 1 \dots 8,$$

где  $i$  – номер возможного состояния.

Используем следующий перечень состояний:

$D_1$ :<Вероятней всего дефект отсутствует>

$D_2$ :<Вероятней всего дефект отсутствует, картины газов идентичны для всех трансформаторов подстанции>

$D_3$ :<Рост концентрации газов без развития во времени, внешние воздействия>

$D_4$ :<Рост концентрации газов без развития во времени, картины газов идентичны для всех трансформаторов подстанции, внешние воздействия>

$D_5$ :<Рост концентрации отдельных газов, необходимы дополнительные анализы >

$D_6$ :<Рост концентрации отдельных газов, картины газов идентичны для всех трансформаторов подстанции, внешние воздействия >

$D_7$ :<Наличие дефекта>

$D_8$ :<Вероятней всего интенсивные внешние воздействия, необходимы дополнительные анализы>

В качестве функции принадлежности выходных переменных используем треугольную функцию, координатами которой являются для терма < $D$ > (0; 100; 100), для терма < $N$ > (0; 0; 100) (см рис. 2).

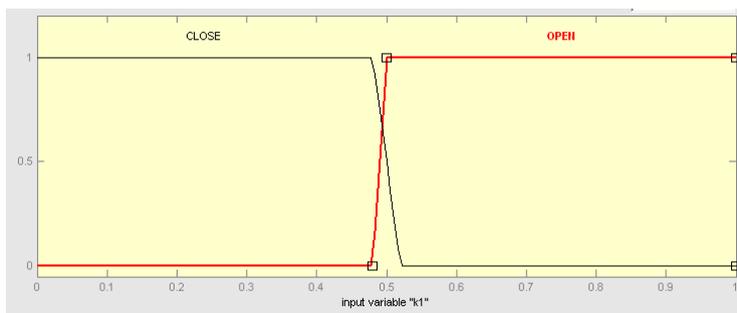


Рисунок 3 – Функция принадлежности для входной переменной  $K_1$

*Этап вычисления правила.* База правил имеет следующий вид:

**Правило 1:** ЕСЛИ [ $k_1 \in \text{CLOSE}$ ] И [ $k_2 \in \text{CLOSE}$ ] И [ $k_3 \in \text{CLOSE}$ ] ТО [ $D_1$ ];

**Правило 2:** ЕСЛИ [ $k_1 \in \text{CLOSE}$ ] И [ $k_2 \in \text{CLOSE}$ ] И [ $k_3 \in \text{OPEN}$ ] ТО [ $D_2$ ];

**Правило 3:** ЕСЛИ [ $k_1 \in \text{CLOSE}$ ] И [ $k_2 \in \text{OPEN}$ ] И [ $k_3 \in \text{CLOSE}$ ] ТО [ $D_3$ ];

**Правило 4:** ЕСЛИ [ $k_1 \in \text{CLOSE}$ ] И [ $k_2 \in \text{OPEN}$ ] И [ $k_3 \in \text{OPEN}$ ] ТО [ $D_4$ ];

**Правило 5:** ЕСЛИ  $[k_1 \in \text{OPEN}]$  И  $[k_2 \in \text{CLOSE}]$  И  $[k_3 \in \text{CLOSE}]$  ТО  $[D_5]$ ;

**Правило 6:** ЕСЛИ  $[k_1 \in \text{OPEN}]$  И  $[k_2 \in \text{CLOSE}]$  И  $[k_3 \in \text{OPEN}]$  ТО  $[D_6]$ ;

**Правило 7:** ЕСЛИ  $[k_1 \in \text{OPEN}]$  И  $[k_2 \in \text{OPEN}]$  И  $[k_3 \in \text{CLOSE}]$  ТО  $[D_7]$ ;

**Правило 8:** ЕСЛИ  $[k_1 \in \text{OPEN}]$  И  $[k_2 \in \text{OPEN}]$  И  $[k_3 \in \text{OPEN}]$  ТО  $[D_8]$ ;

Объединение предпосылок внутри каждого правила выполняется с использованием операции пересечения ( $\min$ )

*Этап дефаззификации.* Выполненные исследования на верифицированных образцах показали, что максимальное значение достоверности обеспечивает метод правого модального значения.

На выходе данная система возвращает степень принадлежности диагностируемого трансформатора одному из возможных состояний (диагнозов).

**Уточнение характера дефекта.** Входными переменными являются значения отношений следующих пар газов:  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ .

*Этап фаззификации.* Выделяем входные лингвистические переменные:

$$\text{ЛП}_{\text{вх } i} \quad i = 1 \dots 3,$$

где  $i$  – номер отношения пар газов.

Входные функции принадлежности будут иметь вид:

$$\text{ЛП}_{\text{вх } 1}: \langle \text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 \rangle$$

$$\text{ЛП}_{\text{вх } 2}: \langle \text{CH}_4/\text{H}_2 \rangle$$

$$\text{ЛП}_{\text{вх } 3}: \langle \text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 \rangle$$

Далее  $\text{ЛП}_{\text{вх } i}$  делим на несколько лингвистических термов  $\text{ЛТ}_{ij}$  характеризующих особенности состояния данной переменной. Разбиение на термы проводилось согласно табл. 2, следующим образом:

$\text{ЛП}_{\text{вх } 1}$  разделена на два ЛТ

$$\text{ЛТ}_{11}: \langle \text{маленькая концентрация} - \text{M} \rangle$$

$$\text{ЛТ}_{12}: \langle \text{средняя концентрация} - \text{S} \rangle$$

$\text{ЛП}_{\text{вх } 2}$  разделена на три ЛТ

$$\text{ЛТ}_{21}: \langle \text{маленькая концентрация} - \text{M} \rangle$$

$$\text{ЛТ}_{22}: \langle \text{средняя концентрация} - \text{S} \rangle$$

$$\text{ЛТ}_{23}: \langle \text{большая концентрация} - \text{H} \rangle$$

$\text{ЛП}_{\text{вх } 3}$  разделена на четыре ЛТ

$$\text{ЛТ}_{31}: \langle \text{маленькая концентрация} - \text{M} \rangle$$

$$\text{ЛТ}_{32}: \langle \text{небольшая концентрация} - \text{R} \rangle$$

$$\text{ЛТ}_{33}: \langle \text{средняя концентрация} - \text{S} \rangle$$

$$\text{ЛТ}_{34}: \langle \text{большая концентрация} - \text{H} \rangle$$

В качестве функций принадлежности для каждого из термов была выбрана трапециидальная функция, параметры которой определялись исходя из данных табл. 2. Данные функции приведены на рис. 4-6.

В качестве выходных лингвистических переменных принимаем:

$$\text{ЛП}_{\text{вых } i} \quad i = 1 \dots 9,$$

где  $i$  – номер возможного состояния.

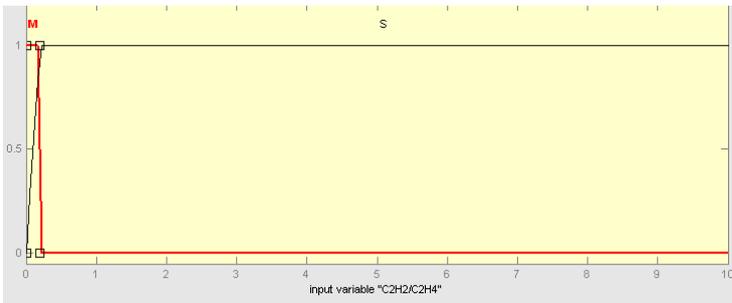


Рисунок 4 – Функция принадлежности отношения ацетилена к этилену

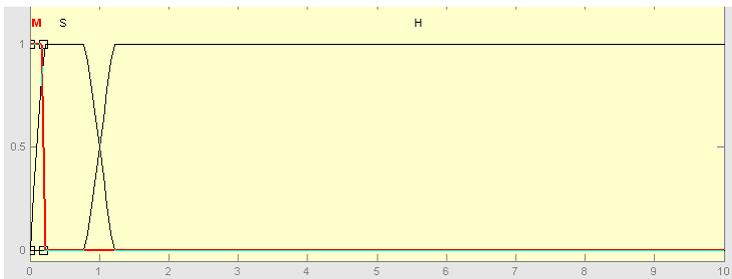


Рисунок 5 – Функция принадлежности отношения метана к водороду

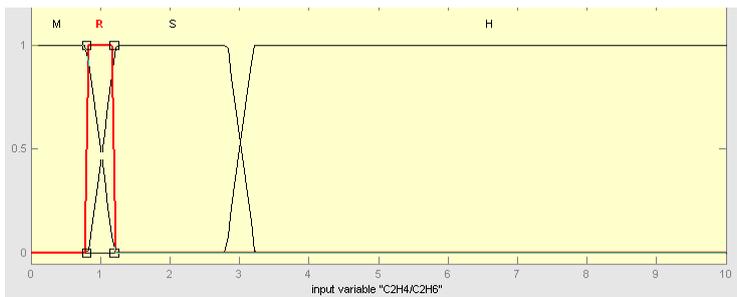


Рисунок 6 – Функция принадлежности отношения этилена к этану

Используем следующий перечень состояний:

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 1: <Частичные разряды с низкой плотностью энергии – CRnp>

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 2: <Частичные разряды с высокой плотностью энергии CRvp>

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 3: <Разряды малой мощности – Rmn>

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 4: <Разряды средней мощности – Rsm>

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 5: <Разряды большой мощности – Rvm>

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 6: <Термический дефект низкой температуры (T<150°C) – T<150>

ЛП<sub>ВЫХ</sub> 7: <Термический дефект в диапазоне низких температур (150÷300°C) – T150-300>

ЛП<sub>вых</sub> 8: < Термический дефект в диапазоне средних температур (300÷700°C) – T300-700>

ЛП<sub>вых</sub> 9: < Термический дефект высокой температуры (более 700°C) – T>700>

В качестве функции принадлежности выходных переменных используем треугольную функцию, координатами которой являются для терма <D> (0; 100; 100), для терма <N> (0; 0; 100).

*Этап вычисления правила.* База правил имеет следующий вид:

**Правило 1:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ M] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ M] ТО [CRnp];

**Правило 2:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ S] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ M] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ M] ТО [CRvp];

**Правило 3:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ S] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ R] ТО [Rmn];

**Правило 4:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ S] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ M] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ H] ТО [Rsm];

**Правило 5:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ S] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ H] ТО [Rvm];

**Правило 6:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ S] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ S] ТО [T<150];

**Правило 7:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ H] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ M] ТО [T150-300];

**Правило 8:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ H] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ S], ТО [T300-700];

**Правило 9:** ЕСЛИ [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> ∈ M] И [CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ∈ H] И [C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ∈ H], ТО [T>700];

*Этап дефаззификации.* Выполненные исследования на верифицированных образцах показали, что максимальное значение достоверности обеспечивает метод правого модального значения.

На выходе данная система возвращает степень принадлежности диагностируемого трансформатора одному из возможных дефектов.

**Практическая ценность.** Выполненное тестирование разработанной экспертной системы на трансформаторах с априорно известным состоянием, показало ее высокую эффективность. Для всех 164 трансформаторов диагноз, поставленный экспертной системой, полностью совпал с реальным состоянием трансформаторов.

**Выводы:** Предложен метод интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, в котором в отличие от существующих, основным диагностическим признаком наличия дефекта являются не концентрации растворенных в масле газов, а динамика их изменения во

времени. Данный метод реализован с использованием средств нечеткого моделирования, что позволило использовать экспертные знания, носящие характер лингвистической информации, которая не обрабатывается классическими детерминированными методами. Выполненное тестирование разработанной экспертной системы на трансформаторах с априорно известным состоянием, показало ее высокую эффективность.

**Список литературы:** 1. *Алексеев Б. А.* Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.: «Издательство НЦ ЭНАС», 2002. – 216 с. 2. *Шутенко О. В.* Дослідження впливу експлуатаційних факторів на результати хроматографічного аналізу розчинених у маслі газів // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харьков: ХНТУСГ, 2008. – №73. – С. 45-48. 3. *Шутенко О. В.* Интерпретация результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов, при обнаружении дефектов в изоляции трансформаторов // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – № 34. – С. 101-115. 4. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB FuzzyTECH. – СПб.: БХВ–Петербург, 2003. – 736 с. 5. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. РД 153-34.0-46.302-00. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001.

*Поступила в редколлегию 04.11.2008*