

Оценка технического состояния электрооборудования методом нейро-нечеткого логического вывода и алгоритм его работы

Выполнил магистр группы ЭЭМ-1-16(С) Асан уулу Аскат

- ▶ Современные системы ОТС электросетевого оборудования представляют собой автоматизированные экспертные системы, направленные, в основном, на решение двух видов задач - определения состояния оборудования с целью выявления дефектов и неисправностей и оптимизации управляющих воздействий на электросетевые объекты с целью повышения надежности работы оборудования и продления срока эксплуатации объектов.
- ▶ Европейские системы, в отличие от КР, не ставят своей задачей продление срока службы электрооборудования, поскольку зарубежная практика предполагает замену оборудования после окончания его срока службы. Также существуют достаточно большие отличия в нормативной документации по обслуживанию, диагностированию, составу оборудования и его эксплуатации, которые не позволяют использовать зарубежные системы ОТС оборудования для российских энергосистем. В КР подобных экспертных систем, используемых на реальных энергообъектах, крайне мало и большинство из них направлены в основном на решение задачи оценки состояния отдельных единиц оборудования, например, только трансформаторов или только выключателей.

- ▶ С точки зрения математической реализации, существующие системы выполняются как на основе самых простых моделей (на основе обычных) правил продукции), так и на основе более сложных, например, на основе метода Байеса.
- ▶ Несмотря на все безусловные достоинства применяемых в КР систем, они имеют ряд существенных недостатков:
- ▶ 1. Ориентированы на решение конкретной задачи определенного собственника (под конкретные схемы, конкретное оборудование и т.д.) и, как правило, не могут использоваться для комплексной ОТС подстанции.
- ▶ 2. Используется разнородная и разноточная информация, использование которой может приводить к неоптимальности принимаемых решений.
- ▶ 3. Как правило, не учитывают динамику изменения критериев ОТС оборудования, другими словами, системы не обучаемы.
- ▶ 4. Отсутствие опыта промышленной эксплуатации новых типов и видов оборудования может приводить к сложности диагностирования неисправностей.

- ▶ Реализация на основе нейро-нечеткого логического вывода обеспечивает представленную систему ОТС электросетевого оборудования всеми перечисленными свойствами.
- ▶ В разработанной системе ОТС в качестве входных параметров ( $X$ ) может использоваться любая доступная информация об анализируемом объекте (ПС) и подобъекте (оборудовании), не только в числовом, но и в лингвистическом виде (Рисунок 1). Например, для ОТС электрооборудования на ПС могут применяться схемно-режимные параметры, данные диагностирования, паспортные данные, информация о ремонтах, данные с датчиков и систем мониторинга и т.п.

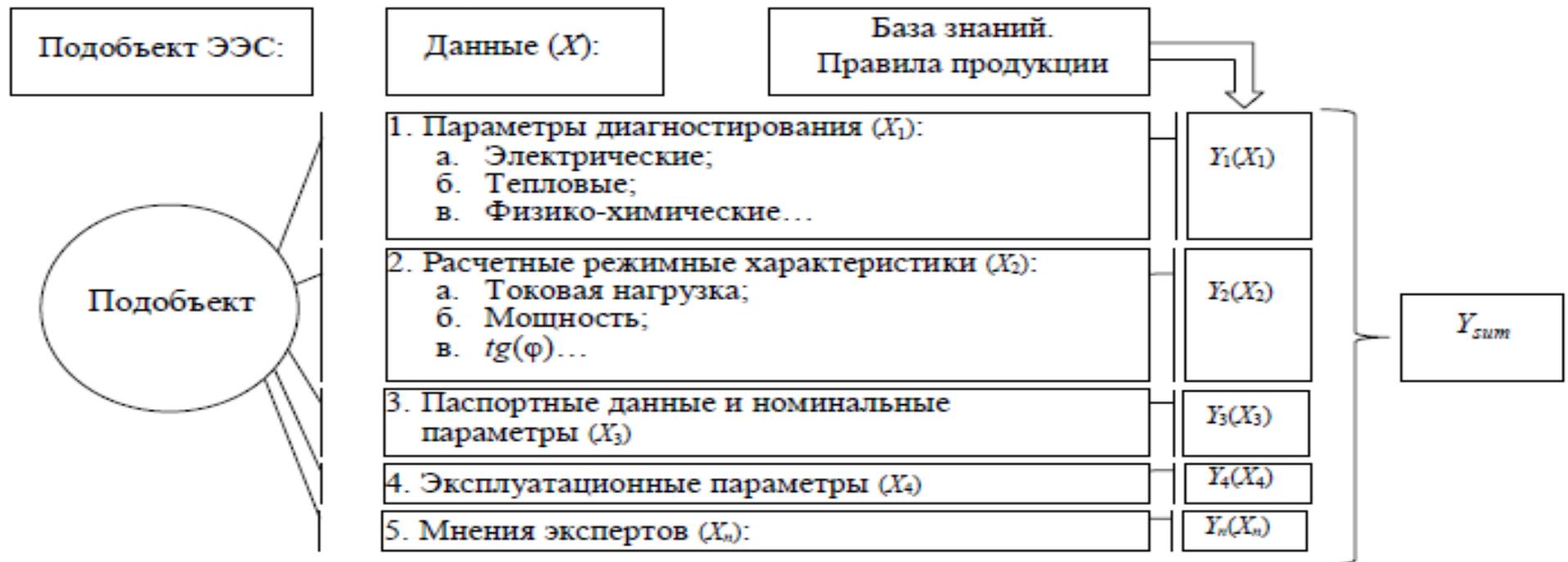


Рисунок 1 – Модель оценки технического состояния объекта сети

Заключения правил в нечетком логическом выводе Такаги-Сугено представляются не в виде принадлежности выходной переменной к нечетким множествам, а в форме функциональных зависимостей

$$R^{(k)} : \text{если } (x_1 \text{ есть } D_1^k \text{ И } \dots \text{ И } x_N \text{ есть } D_N^k), \text{ то } y = f^{(k)}(x_1, \dots, x_N) \quad (1)$$

где  $R^{(k)}$  - нечеткие правила, а  $k=1, \dots, K$ , где  $K$  - количество нечетких правил;  $D_i^k$  - нечеткие множества, где  $D_i^k \in X_i \subset R, i=1, \dots, N$ ;  $x_1, \dots, x_N$  - входные переменные;  $y$  - выходная переменная, представляющая собой функцию входных переменных. В результате применения данной модели была реализована сеть необходимой структуры.

В логическом выводе Такаги-Сугено в качестве заключительного правила используется линейная функция от входных переменных

$$y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N p_{ij} x_j, \quad (2)$$

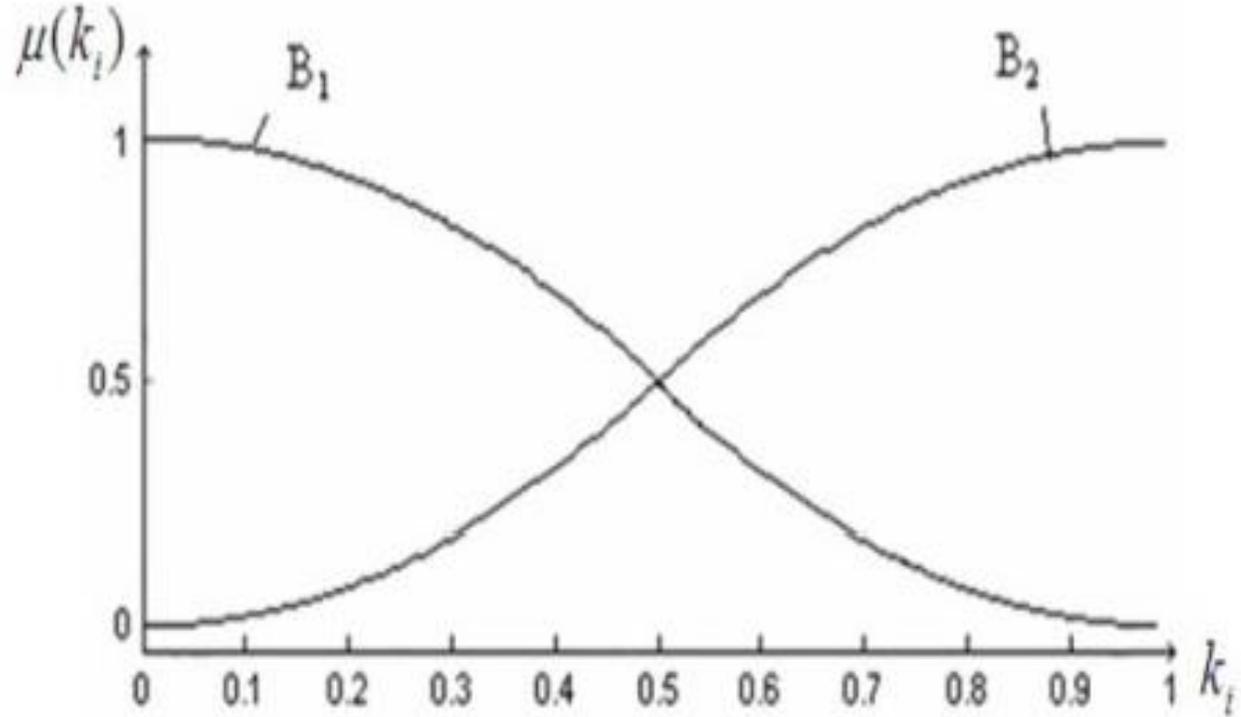
где  $N$  – количество параметров множества  $X$ ;  $p_{i0}, p_{i1}, \dots, p_{iN}$  – параметры полинома Такаги-Сугено.

## ► **Формирование функции принадлежности**

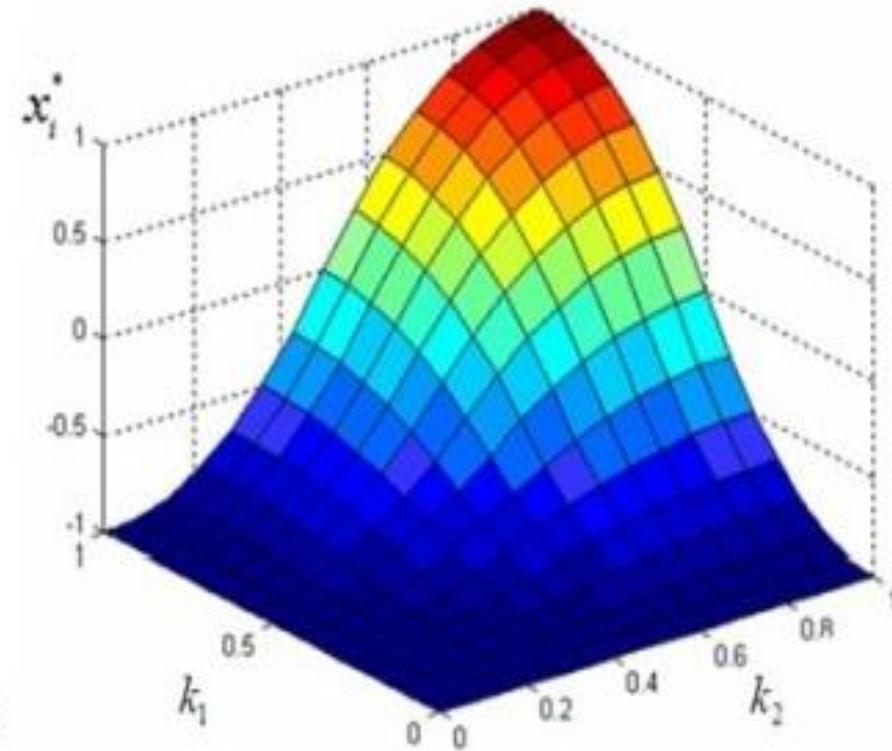
- При формировании системы нейро-нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги-Сугено для каждой входной переменной задается диапазон значений с помощью функции принадлежности (ФП). В данном случае каждая переменная  $x$  определяется ФП. В зависимости от типа элемента, вида предельных значений, метода диагностирования и т.п. тип и количество ФП могут быть различными. Определение оптимального вида и числа ФП является отдельной задачей в рамках задачи ОТС электрооборудования.
- В рамках диссертационного исследования было проанализировано два возможных метода определения ФП с помощью наиболее часто используемых методов кластеризации - метода потенциалов и метода нечеткой кластеризации. В результате в разработанной системе ФП для ОТС каждого параметра для каждого элемента оборудования определяются на основе метода нечеткой кластеризации (предложенного С. Д. Штвобой). ФП и их количество оказывает существенное влияние на результаты работы системы, поэтому для работы представленной системы для каждого элемента необходимо предварительно произвести анализ и определить, в том числе расчетным путем, оптимальные вид и число ФП.

(а) функции принадлежности нечеткой подмодели диагностики;  
(б) поверхность нечеткой подмодели диагностики

а

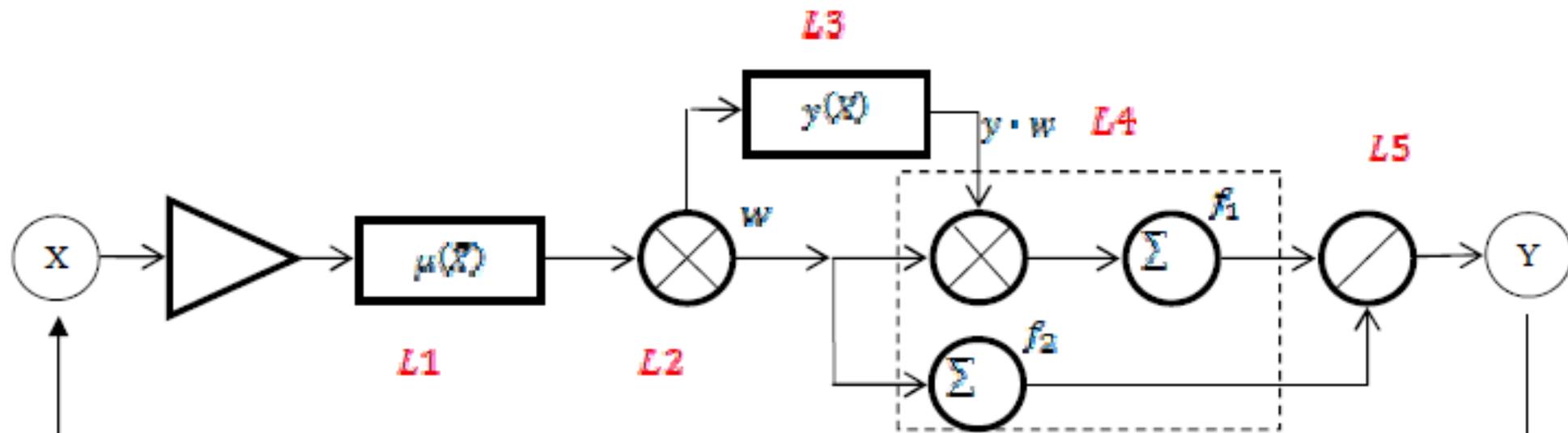


б



# Структура нейро-нечеткого логического вывода и алгоритм его работы

- ▶ На вход гибридной системы поступает вектор параметров (любых доступных)  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  анализируемого подьекта, определяемый методом получения (диагностика, испытания, данные АНИС КУЭ, телеизмерений и т.п.). Формируется база правил  $K$  системы нечеткого логического вывода на основе нечетких правил продукции, описанных.
- ▶ Согласно разработанной технологии для каждой группы параметров подбирается коллекция функций принадлежности  $\mu(Z)$ .
- ▶ В соответствии с системой нейро-нечеткого вывода на основе алгоритма Такаги-Сугено сеть будет состоять из 5 слоев [78], как представлено на Рисунке 2.



1. Параметры диагностирования ( $X_1$ ):
  - а. Электрические;
  - б. Тепловые;
  - в. Физико-химические...
2. Расчетные режимные характеристики ( $X_2$ ):
  - а. Токвая нагрузка;
  - б. Мощность;
  - в.  $\text{tg}(\varphi)$ ...
3. Паспортные данные и номинальные параметры ( $X_3$ )
4. Эксплуатационные параметры ( $X_4$ )
5. Мнения экспертов ( $X_5$ )...

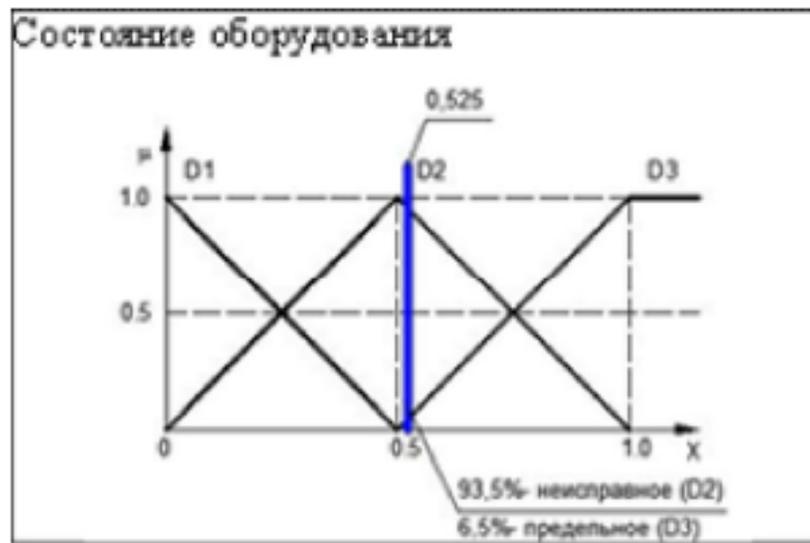


Рисунок 2 – Обобщенная структура нейро-нечеткого логического вывода

### *Трансформаторное масло*

Анализ трансформаторного масла производился по данным ХАРГ на основе анализа соотношения концентраций пар газов:  $C_2H_2 / C_2H_4$  (ацетилен/этил) (обозначим  $X$ ),  $CH_4 / H_2$  (метан/водород) ( $Y$ ),  $C_2H_4 / C_2H_6$  (этил/этилен) ( $Z$ ). По значениям этих трех пар делался вывод о воздействиях, которым подвергалось масло, и возможном характере дефектов в трансформаторе.

Практика показывает, что вероятность совпадения прогнозируемого и существующего дефекта трансформатора при использовании ХАРГ составляет 95%, поэтому в данной системе на основе результатов ХАРГ предполагалось определить не только принадлежность к состоянию, но и вид дефекта в трансформаторе.

Все возможные дефекты, диагностируемые при использовании ХАРГ (Таблица 2), были разделены на две группы – электрические и термические. С целью выявления дефектов каждой группы в разработанную модель ОТС интегрировались отдельные структуры нейро-нечеткого логического вывода, сформированные по индивидуальным правилам. Каждая структура в своем составе в качестве базовой характеристики содержала нормальное состояние оборудования.

Таблица 2 – Возможные виды дефектов на основе ХАРГ

Характер прогнозируемого дефекта	Отношение концентр. газов			Обознач. ФП
	X	Y	Z	
Нормальное (NF)	<0.1	0.1-1	≤1	$f_1$
Электрический дефект				
Частичные разряды с низкой плотностью энергии (LEPD)	<0.1	<0.1	≤1	$f_2$
Частичные разряды с высокой плотностью энергии (HEPD)	0.1-3	<0.1	≤1	$f_3$
Разряды малой мощности (LED)	>0.1	0.1-1	1-3	$f_4$
Разряды большой мощности (HED)	0.1-3	0.1-1	≥3	$f_5$
Термический дефект				
Термический дефект низкой температуры (<150°C) (T <sub>1</sub> )	<0.1	0.1-1	1-3	$f_6$
Термический дефект в диапазоне низких температур (150-300°C) (T <sub>2</sub> )	<0.1	≥1	<1	$f_7$
Термический дефект в диапазоне средних температур (300-700°C) (T <sub>3</sub> )	<0.1	≥1	1-3	$f_8$
Термический дефект высокой температуры (>700°C) (T <sub>0</sub> )	<0.1	≥1	≥3	$f_9$

Таблица 3 – Основные характеристические параметры сети для ОТС трансформатора на основе ХАРГ

ANFIS данные	Значения		
Электрический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообразная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число пар в тестируемой выборке	40	40	40
Число узлов	286	286	286
Число линейных параметров	500	500	500
Число нелинейных параметров	60	60	60
Общее число параметров	560	560	560
Число нечетких правил	125	125	125
Средняя ошибка обучения, %	0,051	0,054	0,046
Средняя ошибка тестирования, %	6,8	7,5	4,9
Ошибки первого рода, шт.	2	2	2
Ошибки второго рода, шт.	1	1	0
Термический дефект			
Тип функций принадлежности	Гауссова	Колоколообразная	Пи- подобная
Число пар в обучающей выборке	42	42	42
Число пар в тестируемой выборке	40	40	40
Число узлов	286	286	286
Число линейных параметров	500	500	500
Число нелинейных параметров	60	60	60
Общее число параметров	560	560	560
Число нечетких правил	125	125	125
Средняя ошибка обучения, %	0,053	0,054	0,047
Средняя ошибка тестирования, %	7,0	7,9	5,2
Число ошибок первого рода	2	3	2
Число ошибок второго рода	1	1	0

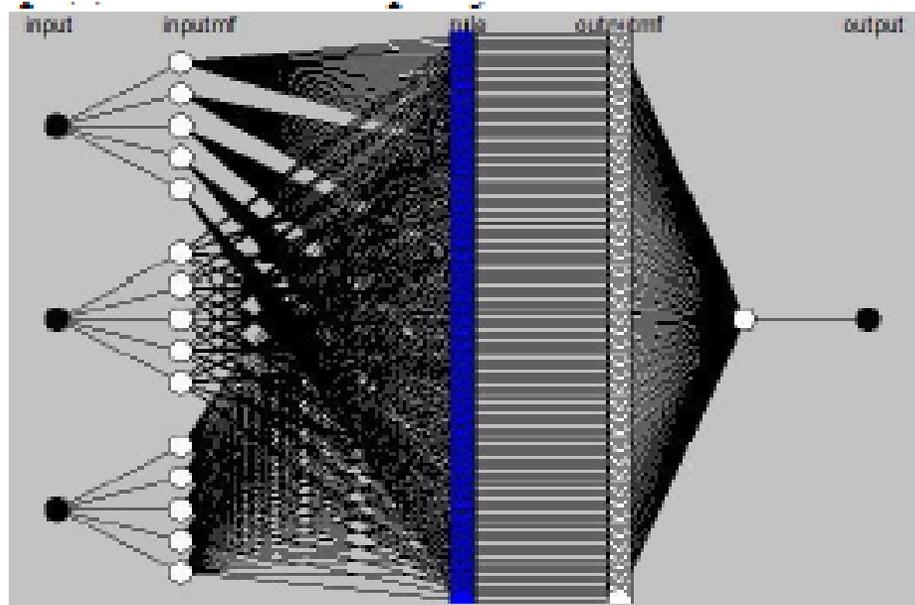


Рисунок 5 – Структура нейро-  
нечеткого вывода на основе данных  
ХАРГ

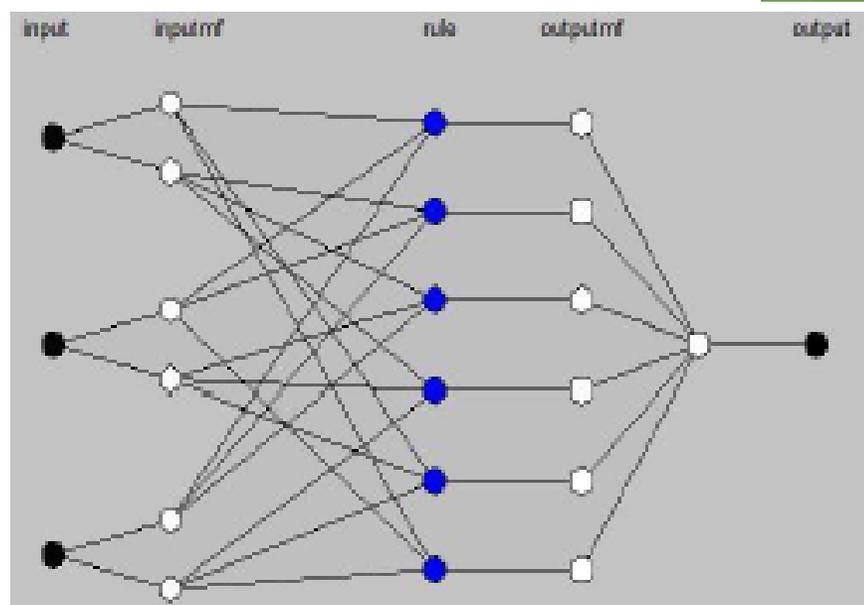


Рисунок 6 – Структура нейро-  
нечеткого вывода на основе данных  
потерь ХХ

Таблица 5 – Основные характеристические параметры сети для ОТС твердой изоляции трансформатора

ANFIS данные	Значения	
Тип функций принадлежности	Прямоугольная	Пи-подобная
Число пар в обучающей выборке	74	74
Число пар в тестируемой выборке	70	70
Средняя ошибка обучения, %	0,054	0,050
Средняя ошибка тестирования, %	4,0	3,5
Ошибки первого рода, шт.	2	3
Ошибки второго рода, шт.	1	0

Таблица 8 – Исходные данные для ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ

Хроматографический анализ газов							
Газ	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_4$	$C_2H_6$	$C_2H_2$	Дата	
% об	0,000304	0,000395	0,00167	0,0000548	0,00391	12.04.11	
% об	0,000376	0,00044	0,00183	0,0000574	0,00454	27.04.11	
% об	0,000546	0,000501	0,00193	0,0000566	0,00498	03.05.11	
Потери холостого хода							
Фаза	При вводе в эксплуатацию			Последнее измерение			Дата
	АВ	ВС	СА	АВ	ВС	СА	
$\Delta P_{xx}$ , Вт	9,2	9,3	11,4	10,5	11,0	15,5	27.04.11
Сопротивление изоляции							
Схема	При вводе в эксплуатацию			Последнее измерение			Дата
	ВН- СН+Н Н+К	СН- НН+ВН +К	НН- ВН+СН +К	ВН- СН+НН +К	СН- НН+ВН +К	НН- ВН+СН +К	
$R_{60}$ , Ом	3000	2500	3000	4600	4100	3900	27.04.11
$R_{60}$ , Ом	3000	2500	3000	2400	2100	3300	03.05.11
Год. изгот.	1993						
Кап. ремонт	2008						

Результаты расчетов разработанной системы ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Результаты ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ

№	Элемент трансформатора	Данные	Оценка состояния	Балл
1	Хар-ка трансформаторного масла как хар-ка общего состояния трансформатора	ХАРГ (электр. дефект)	0,83	5
		ХАРГ (терм. дефект)	0	1
2	Магнитопровод	Потери холостого хода	0	1
3	Твердая изоляция	Сопротивление изоляции	0,79	5
4	Общее состояние обмоток	Омическое сопротивление	0,3	3
		Год выпуска и год кап. ремонта	0	1
Оценка состояния трансформатора:			0,628	
Количественная характеристика решения:			0,706	

В результате полученных расчетов состояние трансформатора ТДТН-110/35/10 можно характеризовать как неисправное, но работоспособное состояние  $D_2$  с вероятностью 74,4%, и как предельное состояние  $D_3$  – с вероятностью 26,6% (Рисунок 10).

- ▶ В результате полученных расчетов состояние трансформатора ТДТН- 110/35/10 можно характеризовать как неисправное, но работоспособное состояние  $D_2$  с вероятностью 74.4%, и как предельное состояние  $D_3$  - с вероятностью 26,6% (Рисунок 10).
- ▶ По результатам полученной ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10 кВ могут быть приняты следующие решения (Рисунок 11):
  - ▶ а. выполнить ремонт (вероятность принятия данного решения составляет 88,3%);
  - ▶ б. вывести из эксплуатации (вероятность принятия данного решения составляет 11,7%).

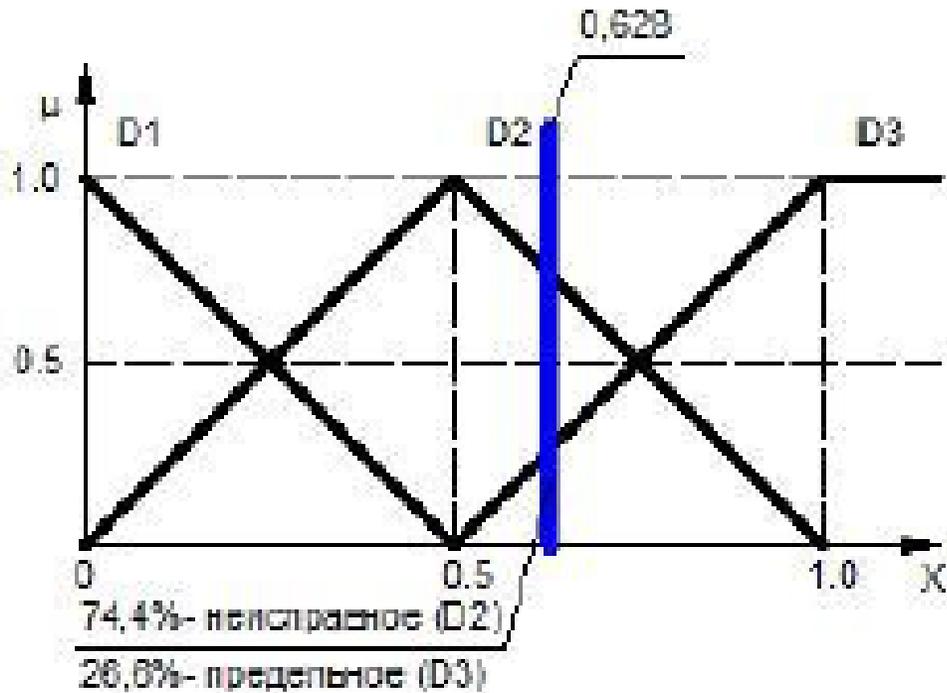


Рисунок 10 - ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10

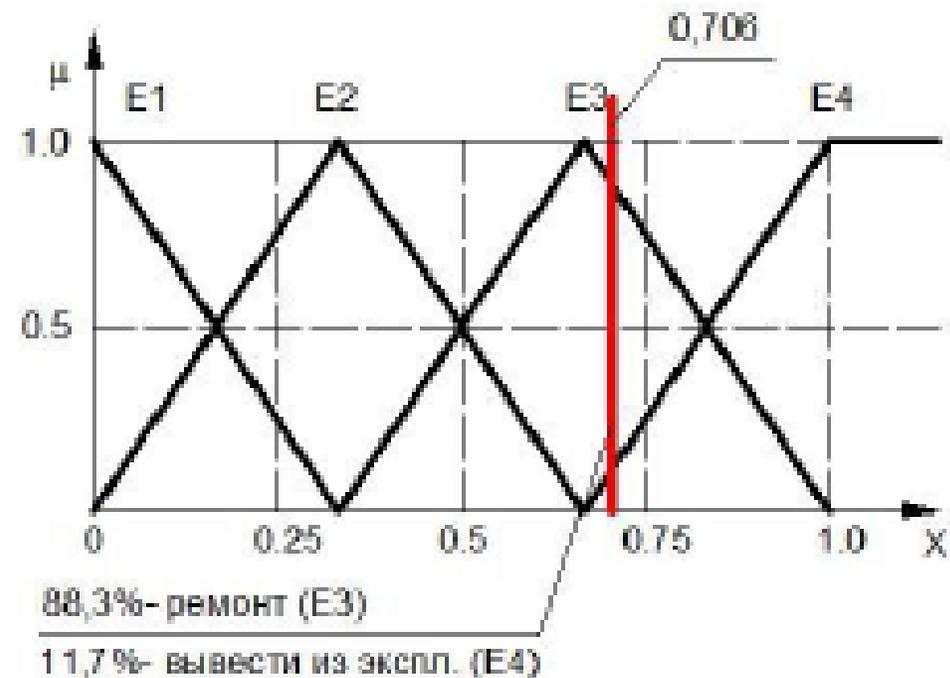


Рисунок 11 - Решения на основе ОТС трансформатора ТДТН-110/35/10

Спасибо за внимание!!!