

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 20.01.2021 15:08:23

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра вычислительной техники

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2016 г.



### ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ANFIS В ПАКЕТЕ FUZZY LOGIC TOOLBOX

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Теория нечеткой логики и множеств»  
для студентов специальности 09.03.01 «Информатика  
и вычислительная техника»

Курск 2016

УДК 621.37(075)

Составитель: М.В. Бобырь

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Е.О. Брежнева*

**1. Проектирование модели ANFIS в пакете Fuzzy Logic Toolbox** : методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Теория нечеткой логики и множеств» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: М.В. Бобырь. – Курск, 2016. – 13 с.: ил. 7, табл. 3. – Библиогр.: с.13.

Рассмотрены базовые понятия теории нечеткой логики. Показан численный расчет модели ANFIS.

Методические указания соответствуют требованиям программы дисциплины «Теория нечеткой логики и множеств».

Предназначены для студентов специальности 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» дневной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 19.10. Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 0,7. Уч.-изд. л. 0,6. Тираж 50 экз. Заказ. 978 Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ANFIS В ПАКЕТЕ FUZZY LOGIC TOOLBOX

## 1. Цель работы

Получение практических навыков по проектированию модели ANFIS в пакете Fuzzy Logic Toolbox.

## 2. Синтез упрощенного нечеткого алгоритма вывода

В настоящее время для синтеза моделей нечетко-логического вывода (НЛВ) наиболее часто используются схемы вычислений Мамдани и Такаги-Сугэно. С целью снижения вычислительной сложности традиционных алгоритмов применяется так называемый упрощенный нечетко-логический вывод, отличающийся тем, что в заключениях нечетких правил управления (НПУ) используются синглтонные функции принадлежности (ФП). Данный алгоритм состоит из трех этапов: фаззификации, НЛВ и дефаззификации. Рассмотрим пример его работы. Пусть ФП входных и выходных величин заданы треугольными функциями (рис. 1), а сама система управления работает на основе двух НПУ:

НПУ<sub>1</sub>: ЕСЛИ « $a$  есть  $A_1$ » И « $b$  есть  $B_1$ » ТО « $v$  есть  $V_1$ »;  
НПУ<sub>2</sub>: ЕСЛИ « $a$  есть  $A_2$ » И « $b$  есть  $B_2$ » ТО « $v$  есть  $V_2$ ».

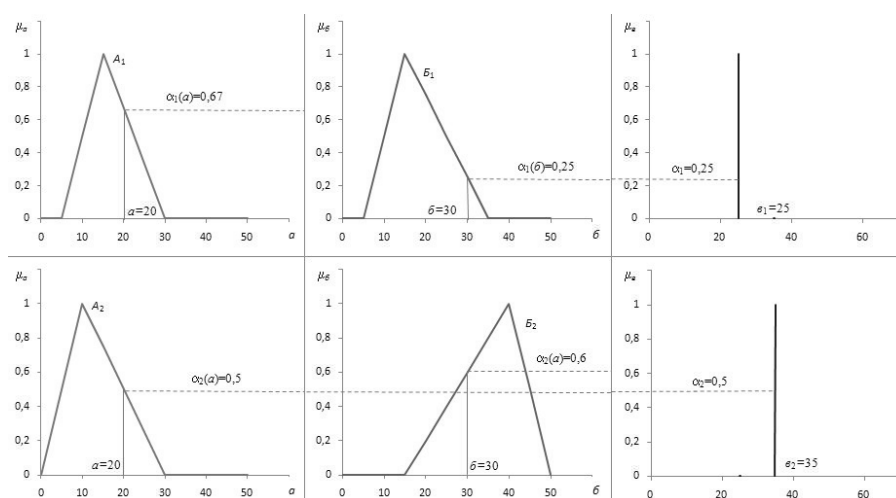


Рис. 1. Структура упрощенного алгоритма нечеткого вывода

Треугольные ФП термов входных и выходной переменных  $A$ ,  $B$  и  $B$  заданы следующими выражениями:

$$A = \{A_1\} + \{A_2\} = \left\{ \int_5^{15} \left( \frac{a-5}{15-5} \right) / a + \int_{15}^{30} \left( \frac{30-a}{30-15} \right) / a \right\} + \left\{ \int_0^{10} \left( \frac{a}{10} \right) / a + \int_{10}^{30} \left( \frac{30-a}{30-10} \right) / a \right\},$$

$$B = \{B_1\} + \{B_2\} = \left\{ \int_5^{15} \left( \frac{b-5}{15-5} \right) / b + \int_{15}^{35} \left( \frac{35-b}{35-15} \right) / b \right\} + \left\{ \int_{15}^{40} \left( \frac{b-15}{40-15} \right) / b + \int_{40}^{50} \left( \frac{50-b}{50-40} \right) / b \right\},$$

$$B = \{e_1\} + \{e_2\} = \left\{ \int_0^{70} 25 / e \right\} + \left\{ \int_0^{70} 35 / e \right\}.$$

Пусть на вход информационно-измерительной системы поступили значения  $a=20$  и  $b=30$ . Тогда на первом этапе определяются степени принадлежности:

$$\alpha_1(a)=0,67; \alpha_1(b)=0,25; \alpha_2(a)=0,5; \alpha_2(b)=0,6.$$

На этапе логического вывода находятся уровни отсечения

$$\alpha'_1 = \alpha_1(a) \wedge \alpha_1(b) = \min\{0,67; 0,25\} = 0,25; \alpha'_2 = \alpha_2(a) \wedge \alpha_2(b) = \min\{0,5; 0,6\} = 0,5.$$

При реализации третьего шага методом центра тяжести рассчитывается выходная величина

$$y = \frac{\alpha'_1 e_1 + \alpha'_2 e_2}{\alpha'_1 + \alpha'_2} = \frac{0,25 \cdot 25 + 0,5 \cdot 35}{0,25 + 0,5} = 31,67.$$

Например, если на вход информационно-измерительной системы поступят данные  $a=10$  и  $b=40$ , то выходным значением, будет результат 35.

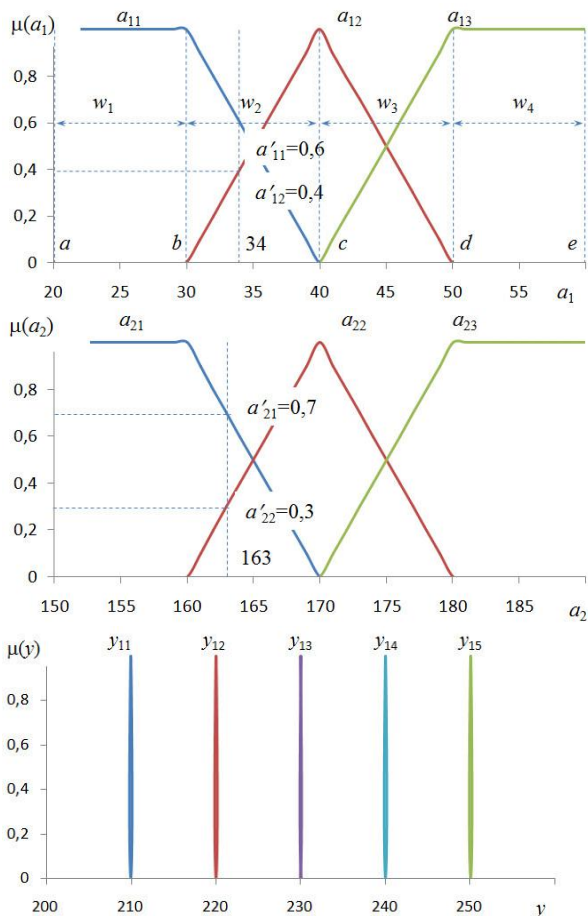
### *Нейро-нечеткий алгоритм обучения информационно-измерительной системы на основе жестких и мягких вычислений*

Рассмотрим процесс обучения ANFIS, использующей упрощенный алгоритм НЛВ. Для расчета используются как жесткие, так и мягкие арифметические операции. Пусть имеются следующие НПУ, заданные нечеткой базой знаний:

Таблица 1. Нечеткая база знаний

НП	Если		То	НП	Если		То	НП	Если		То
$r_1$	$a_{11}$	$a_{21}$	$y_{15}$	$r_4$	$a_{12}$	$a_{21}$	$y_{14}$	$r_7$	$a_{13}$	$a_{21}$	$y_{13}$
$r_2$	$a_{11}$	$a_{22}$	$y_{14}$	$r_5$	$a_{12}$	$a_{22}$	$y_{13}$	$r_8$	$a_{13}$	$a_{22}$	$y_{12}$
$r_3$	$a_{11}$	$a_{23}$	$y_{13}$	$r_6$	$a_{12}$	$a_{23}$	$y_{12}$	$r_9$	$a_{13}$	$a_{23}$	$y_{11}$

При этом ФП заданы следующими параметрическими формулами:



*входные ФП*

$$w_1 = \begin{cases} 1, & x \in \text{если } [a, b) \\ 0, & x \in \text{если } [a, b) \end{cases} \quad w_3 = \begin{cases} 1, & x \in \text{если } [c, d) \\ 0, & x \in \text{если } [c, d) \end{cases}$$

$$w_2 = \begin{cases} 1, & x \in \text{если } [b, c) \\ 0, & x \in \text{если } [b, c) \end{cases} \quad w_4 = \begin{cases} 1, & x \in \text{если } [d, e) \\ 0, & x \in \text{если } [d, e) \end{cases}$$

$$f(x; a, b, c, d, e) = \begin{cases} w_1 + w_2 \cdot \left( \frac{c-x}{c-b} \right) \\ w_2 \cdot \left( \frac{x-b}{c-b} \right) + w_3 \cdot \left( \frac{d-x}{d-c} \right) \\ w_3 \cdot \left( \frac{d-x}{d-c} \right) + w_4 \end{cases}$$

*выходная ФП*

$$f(x; a) = \begin{cases} 1, & x = y_{nm} \\ 0, & x \neq y_{nm} \end{cases}$$

Рис. 2 Функции принадлежности входных и выходных переменных

Обучение системы осуществляется следующим образом:

**1 этап.** Для каждой из входных переменных  $a_1$  и  $a_2$  определяются степени истинности (рис. 2), согласно данным, полученным от сенсоров:

$$a_{1\text{сн}} = (\alpha'_{11}, \alpha'_{12}, \alpha'_{13}); a_{2\text{сн}} = (\alpha'_{21}, \alpha'_{22}, \alpha'_{23}). \quad (1)$$

Например, если от измерительной системы поступила информация  $a_1=34$  и  $a_2=163$ , то степени истинности согласно (1) будут равны:

$$a_{1\text{си}} = (0.6, 0.4, 0); a_{2\text{си}} = (0.7, 0.3, 0).$$

**2 этап.** На этапе логического вывода с учётом нечеткой базы знаний (табл. 1) рассчитываются усеченные степени истинности:

жесткие формулы	$\alpha''_1 = \min(\alpha'_{11}; \alpha'_{21})$	$\alpha''_2 = \min(\alpha'_{11}; \alpha'_{22})$	$\alpha''_3 = \min(\alpha'_{11}; \alpha'_{23})$
	$\alpha''_4 = \min(\alpha'_{12}; \alpha'_{21})$	$\alpha''_5 = \min(\alpha'_{12}; \alpha'_{22})$	$\alpha''_6 = \min(\alpha'_{12}; \alpha'_{23})$
	$\alpha''_7 = \min(\alpha'_{13}; \alpha'_{21})$	$\alpha''_8 = \min(\alpha'_{13}; \alpha'_{22})$	$\alpha''_9 = \min(\alpha'_{13}; \alpha'_{23})$
	$\alpha''_1 = \min_{\delta}(\alpha'_{11}; \alpha'_{21})$	$\alpha''_2 = \min_{\delta}(\alpha'_{11}; \alpha'_{22})$	$\alpha''_3 = \min_{\delta}(\alpha'_{11}; \alpha'_{23})$
мягкие формулы	$\alpha''_4 = \min_{\delta}(\alpha'_{12}; \alpha'_{21})$	$\alpha''_5 = \min_{\delta}(\alpha'_{12}; \alpha'_{22})$	$\alpha''_6 = \min_{\delta}(\alpha'_{12}; \alpha'_{23})$
	$\alpha''_7 = \min_{\delta}(\alpha'_{13}; \alpha'_{21})$	$\alpha''_8 = \min_{\delta}(\alpha'_{13}; \alpha'_{22})$	$\alpha''_9 = \min_{\delta}(\alpha'_{13}; \alpha'_{23})$

где  $\min$  – операция жесткого минимума;  $\min_{\delta}$  – операция мягкого минимума [6]:

$$\min_{\delta}(a_1, b_1) = \frac{a_1 + b_1 + \delta^2 - \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + \delta^2}}{2}, \quad \text{где } \delta = 0,05. \quad (3)$$

Так при использовании жесткого минимума  $\min(0,7; 0) = 0$ , а на основе формулы (3)  $\min_{\delta}(0,7; 0) = \frac{0,7 + 0 + 0,05^2 - \sqrt{(0,7 - 0)^2 + 0,05^2}}{2} = 0,0076$ , на выходе будет значение отличное от нуля, следовательно, информационно-измерительная система обладает свойством аддитивности.

Далее, используя матрицу нечетких отношений, осуществляется расчет уровней отсечения выходной ФП:

жесткие формулы	$\beta_1 = \alpha''_9$	$\beta_2 = \max(\alpha''_8; \alpha''_6)$	$\beta_3 = \max(\alpha''_7; \alpha''_5; \alpha''_3)$
	$\beta_4 = \max(\alpha''_4; \alpha''_2)$	$\beta_5 = \alpha''_1$	
мягкие формулы	$\beta_1 = \alpha''_9$	$\beta_2 = \max_{\delta}(\alpha''_8; \alpha''_6)$	$\beta_3 = \max_{\delta}(\alpha''_7; \alpha''_5; \alpha''_3)$
	$\beta_4 = \max_{\delta}(\alpha''_4; \alpha''_2)$	$\beta_5 = \alpha''_1$	

где  $\max$  – операция жесткого максимума;  $\max_{\delta}$  – операция мягкого максимума:

$$\max_{\delta}(a_1, b_1) = \gamma \cdot \max(a_1, b_1) + 0,5(1 - \gamma)(a_1 + b_1), \quad \text{где } \forall a \in A, \forall b \in B, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – оператор параметризации, при  $\gamma=1$  формула сводится к операции жесткого максимума, при  $\gamma=0$  формула сводится к операции среднего арифметического.

На заключительном шаге НЛВ осуществляется объединение усеченных степеней истинности:

$$\mu(\gamma) = \bigcup_{i=1}^n (\beta_i; \mu(y_i)), \quad (5)$$

где  $n$  – количество усеченных ФП.

**3 этап.** Дефаззификация выходной величины производится с помощью метода центра тяжести

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(\gamma_i) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \mu(\gamma_i)}. \quad (6)$$

**4 этап.** После расчета фактического значения выходной переменной выполняется процедура адаптации информационно-измерительной системы, т.е. корректировка термов выходной переменной до тех пор, пока полученное значение  $Y$  не станет максимально приближено к заранее известному эталонному значению  $y_{\text{этал}}$  по формуле

$$y_{i+1} = y_i + \delta(Y - y_{\text{этал}}), \quad (7)$$

где  $\delta$  - скорость обучения нейро-нечеткой системы вывода (по умолчанию  $\delta=0,7$ ).

### *Структурная схема мягкой адаптивной нейро-нечеткой системы вывода*

На рисунке 3 приведена шестислойная структурная схема ANFIS.

*Слой 1.* Представляет собой процесс фаззификации входных переменных, каждый из которых имеет по три терма с функцией принадлежности, представленной на рисунке 1. Входы сети соединены только со своими термами.

*Слой 2.* Выходами данного слоя являются значения степени истинности, определяемые с помощью информации, поступающей от сенсоров.

**Слой 3.** Каждый узел данного слоя соответствует правилам, представленным в таблице 2. Выходами узлов данного слоя являются значения усеченных степеней истинности, рассчитанных по (2).

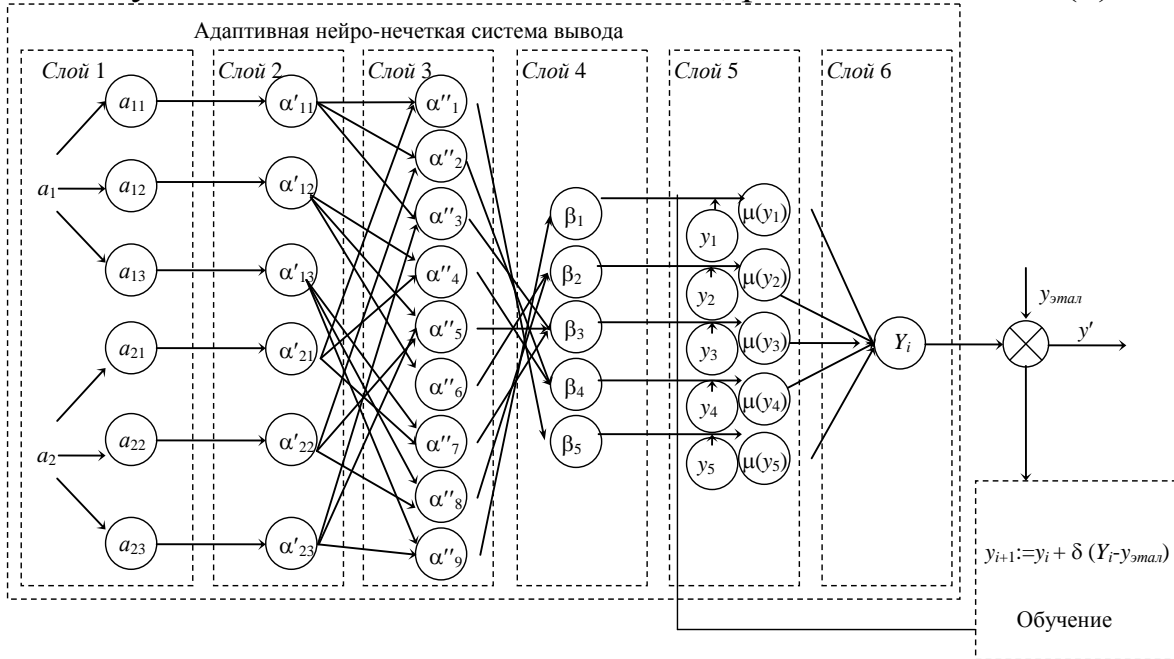


Рис. 3 Адаптивная нейро-нечеткая система вывода

**Слой 4.** В данном слое определяются уровни отсечения выходной переменной согласно уравнению (4).

**Слой 5.** Представляет собой процесс объединения усеченных степеней истинности с помощью выражения (5).

**Слой 6.** Осуществляется дефаззификация выходного параметра по формуле (6).

В процессе обучения адаптивной нейро-нечеткой сети, функционирующей на основе упрощенного алгоритма нечетко-логического вывода, происходит формирование новых термов ФП выходного параметра по итеративной формуле (7). Процесс осуществляется до тех пор, пока значение, получаемое с помощью нейро-нечеткой системы вывода, не станет равно эталонному значению  $y = y_{\text{зад}}$ .

С целью проверки адекватности и работоспособности ANFIS, реализующей мягкие и жесткие арифметические операции в условиях конкретной задачи, рассмотрим процесс моделирования её работы.

### 3. Проектирование модели ANFIS в пакете Fuzzy Logic Toolbox



**Этап 1.** Для загрузки fis-редактора напечатаем слово *anfisedit* в командной строке Matlab. После этого откроется графическое окно, показанное на рис. 4.

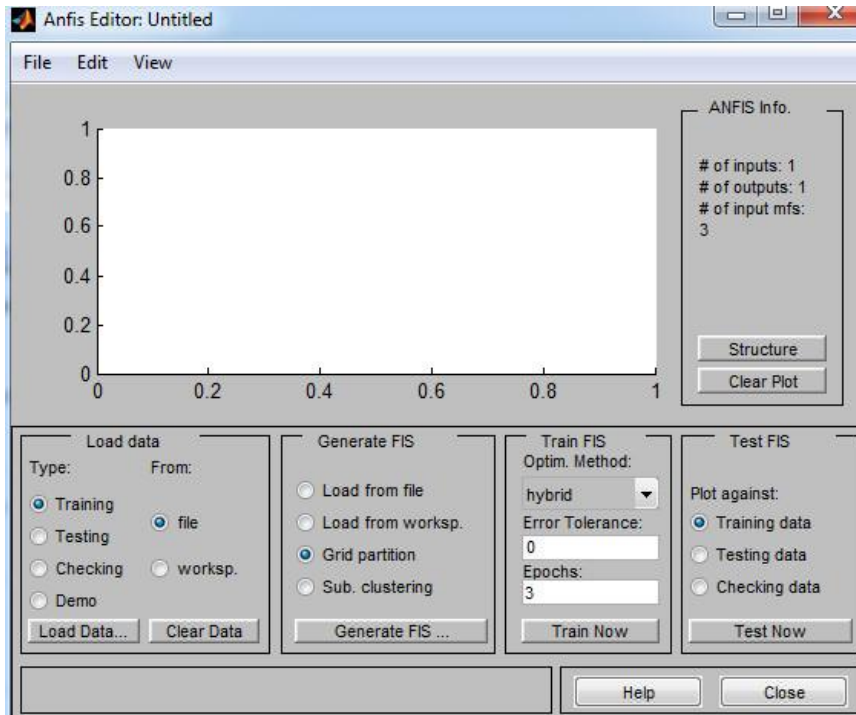


Рис. 4 Модель ANFIS

Создадим систему ANFIS, обучающейся на основе функции  $y=x^2$ .

Настройка параметров сети ANFIS осуществляются по выборкам: обучающей (Training data); проверочной (Checking data) и тестирующей (Testing data). Предварительно выборки должны быть представлены в виде текстовых файлов (расширение *dat* и разделителями-табуляциями), первые столбцы соответствуют входным переменным, а последний (правый) – единственной выходной переменной.

Так, обучающая выборка, сформированная для функции  $y=x^2$ , может быть представлена в следующем виде и сохранена в файле **obuch.dat**

№	Входная переменная, $x$	Выходная переменная, $y$
1	0,2	0,04
2	0,5	0,25
3	0,8	0,64

4	1,3	1,69
5	1,7	2,89
6	1,9	3,61
7	2,3	5,29
8	2,6	6,76
9	2,9	8,41
10	3,2	10,24

Этап 1. В окне ANFIS-редактора в поле **Load data** выберем тип загружаемых данных **Training** и нажмем кнопку **Load data...** Далее загружаем подготовленный ранее файл **obuch.dat**, который моделирует работу функции  $y=x^2$ .

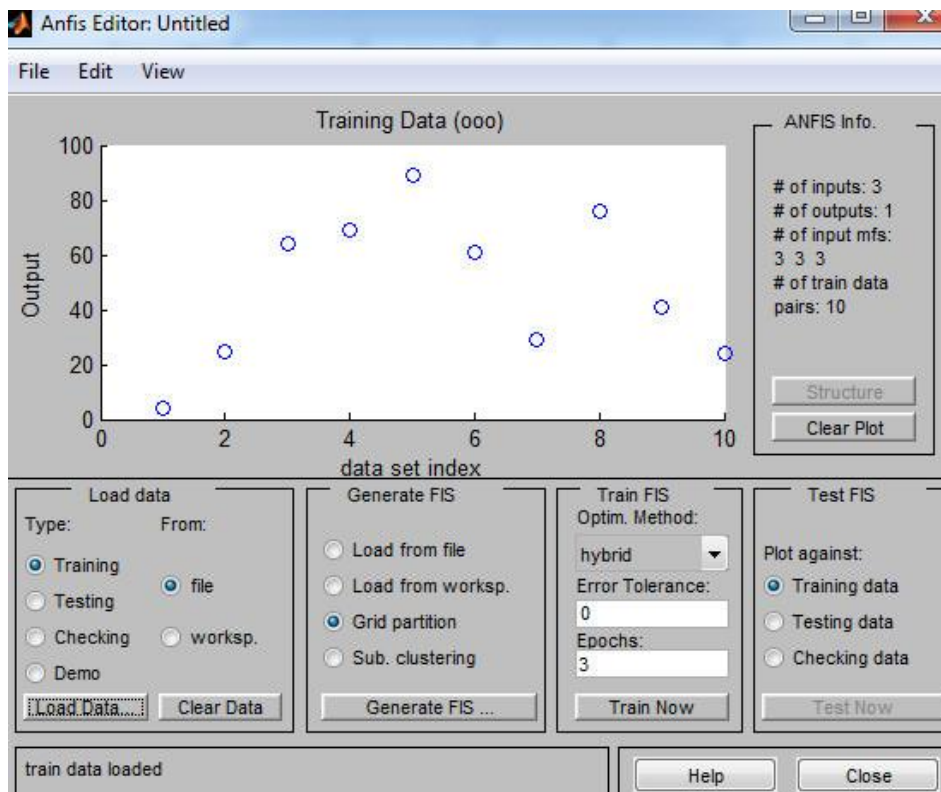


Рис. 5 Тестирующая выборка в ANFIS

Этап 2. Нажимаем кнопку **Generate FIS**, после чего появится диалоговое окно для задания числа и типов функций принадлежности. Сохраним установки по умолчанию, нажмем **ОК**. Что бы посмотреть структуру сети ANFIS необходимо нажать кнопку **Structure**.

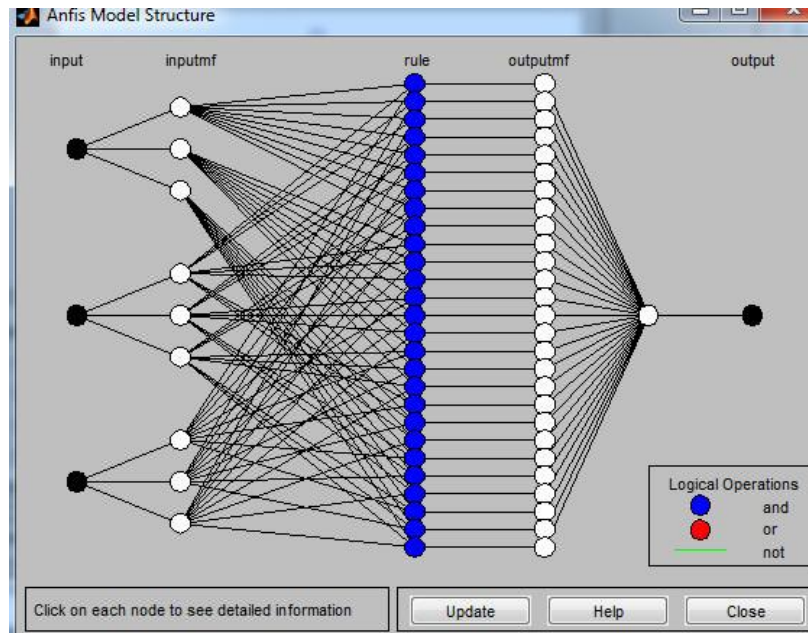


Рис. 6 Структура ANFIS

**Этап 3.** Установим количество циклов обучения равное 50, и нажмем кнопку обучения **Train Now**. Получился результат в виде графика ошибки сети в зависимости от числа проведенных циклов обучения.

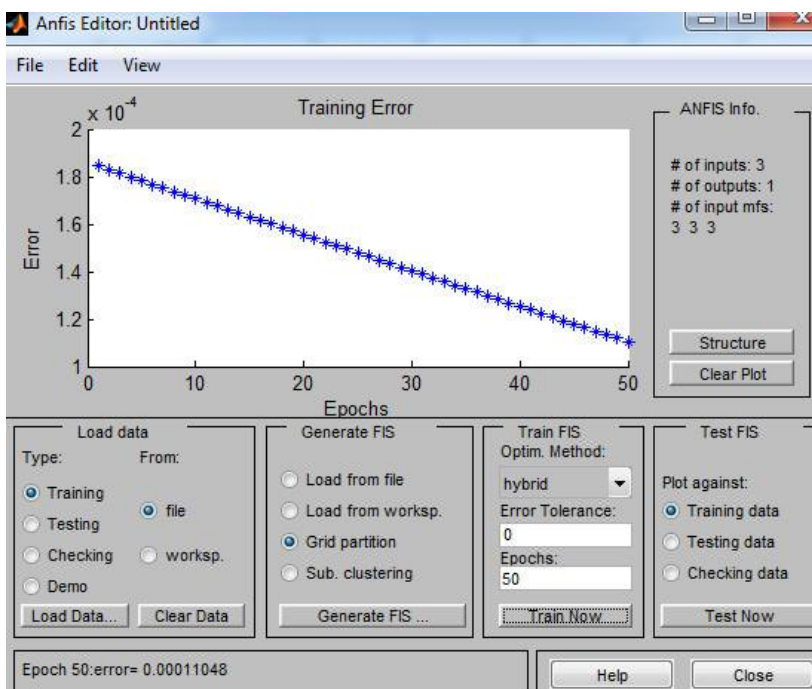


Рис. 6 Обучение ANFIS

**Этап 4.** Для тестирования нечеткой сети необходимо нажать кнопку **Test Now**.

5. Сохраним разработанную систему на диске в файле с именем **Obuch.fis** для исследования разработанной системы средствами FIS-редактора из командной строки MATLAB выполним команду Fuzzy, а затем через пункты меню File | Open FIS from disk откроем созданный файл. С созданной системой можно теперь выполнять все приемы редактирования и исследования, которые были рассмотрены выше. В результате убеждаемся, что качество аппроксимации существенно не улучшилось – слишком мало данных.

#### 4. Задания для проектирования модели ANFIS

Ниже располагаются варианты для создания студентом модели ANFIS. Вариант назначает преподаватель.

##### *Варианты заданий*

1. Найти на сайтах [sciencedirect.com](http://sciencedirect.com) и [link.springer.com](http://link.springer.com) статьи по ключевому слову **fis (fuzzy inference system sugeno)**. Выбрать **Open access articles**. И скачать статью с готовыми нечетко-логическими системами.

2. Разработать собственную нечеткую систему.

3. Промоделировать разработанную нечеткую систему в среде Matlab.

4. Согласно заданным вариантам промоделировать работу сети ANFIS

№	Функция	Интервал определения функции		
1	$y=x^{2.5}$	[1, 4]		
2	$y=x^{3.5}$	[2, 5]		
3	$y=x^{1.5}$	[3, 6]		
4	$y=x^{1.7}$	[4, 7]		
5	$y=x^{1.8}$	[5, 8]		
6	$y=x^{2.3}$	[6, 9]		
7	$y=x^{2.7}$	[7, 10]		
8	$y=x^{3.1}$	[8, 11]		
9	$y=x^{3.7}$	[9, 12]		
10	$y=x^{4.1}$	[10, 13]		

## **5. Контрольные вопросы**

1. Чем отличается модель Мамдани и модель Сугэно от ANFIS?
2. Расскажите структуру нечеткой модели ANFIS?
3. Какие типы функций принадлежности используется на входе и выходе модели ANFIS?
4. Каким образом нужно работать с окном Anfis Editor?
5. Каким образом можно добавить функции принадлежности?
6. Как можно добавить 3 правила в базу знаний модели ANFIS?

## **8. Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) наименование работы и цель исследований;
- 3) алгоритмов нечеткого вывода;
- 4) результаты расчета и графики результирующей переменной.

## **9. Библиографический список**

1. Емельянов С.Г., Интеллектуальные системы на основе нечеткой логики и мягких арифметических операций / Емельянов С.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. – М. : АРГАМАК - МЕДИА, 2014. - 341 с. - (Научное сообщество).

2. Рубанов В.Г. Адаптивные системы принятия нечетко-логических решений / Рубанов В.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. - Б.: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (Белгород). 2014. - 239.

3. Емельянов С.Г., Адаптивные нечетко-логические системы управления / Емельянов С.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. – М. : АРГАМАК - МЕДИА, 2013. - 184 с. - (Научное сообщество).

4. Емельянов С.Г., Автоматизированные нечетко-логические системы управления / Емельянов С.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. – М.:ИНФРА-М. 2011. 176 с. (Научная мысль).

5. Бобырь М.В. Теоретические основы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами на основе нечеткой логики: монография / М.В. Бобырь, С.Г. Емельянов, В.С. Титов. Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2009. 232 с.