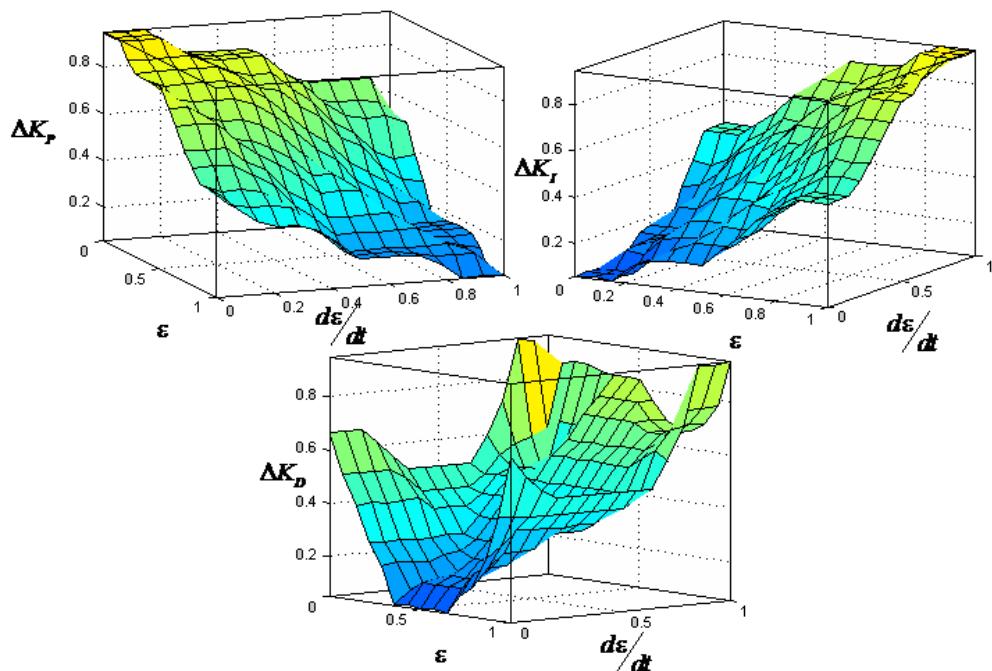


Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев

**РЕГУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**



Санкт-Петербург
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев

**РЕГУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ
ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Учебное пособие



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2017

Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

В пособии излагается основное содержание дисциплины «Интеллектуальные алгоритмы управления». Рассматриваются основные аспекты нечеткой логики, методика синтеза регуляторов на основе нечеткой логики применительно к техническим системам, приведены типовые структурные схемы регуляторов с нечеткой логикой и рассмотрены методы исследования устойчивости систем с регуляторами с нечеткой логикой.

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения по направлению 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника.

Рекомендовано к печати Ученым советом Мегафакультета Компьютерных Технологий и Управления 14.11.2017 протокол №14



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

© Демидова Г.Л., Лукичев Д.В., 2017

Оглавление

1 Введение в системы управления с нечеткой логикой.....	4
1.1 Общие сведения	4
1.2 Основные положения теории нечетких множеств	9
1.3 Понятие функции принадлежности	14
1.4 Нечеткие правила и нечеткая импликация	20
1.5 Дефазификация.....	29
2 Принцип построения регулятора с нечеткой логикой	35
3 Синтез регуляторов с нечеткой логикой с различной структурой	42
3.1 Регулятор с нечеткой логикой с одним входным сигналом.....	43
3.2 Регулятор с нечеткой логикой с двумя входными сигналами	45
3.3 Регулятор с нечеткой логикой с тремя входными сигналами	48
3.4 Гибридный регулятор с нечеткой логикой	49
3.5 Адаптивный регулятор с нечеткой логикой	50
4 Исследование устойчивости регуляторов с нечеткой логикой.....	54
Практическая работа №1	
СИНТЕЗ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ	59
Практическая работа №2	
СИНТЕЗ НЕЧЕТКОЙ ИМПЛИКАЦИИ	63
Практическая работа №3	
ДЕФАЗИФИКАЦИЯ.....	67
Практическая работа №4	
СИНТЕЗ БАЗЫ ПРАВИЛ.....	68
Практическая работа №5	
СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ.....	74
Список сокращений	77
Литература	78

1 Введение в системы управления с нечеткой логикой

1.1 Общие сведения

В настоящее время в связи с развитием вычислительных способностей технических устройств, возобновились исследования в области нечеткой логики применительно к управлению техническими объектами. Технологии, использующие нечеткую логику, в своей основе широко применимы как в управлении техническими системами: автоматическое управление воротами плотины на гидроэлектростанциях (Tokio Electric Pow.), наведение телекамер при трансляции спортивных событий (Omron), эффективное и стабильное управление автомобильными двигателями (Nissan), управление экономичной скоростью автомобилей (Nissan, Subaru), улучшение эффективности и оптимизация промышленных систем управления (Aptronix, Omron, Meiden, Sha, Micom, Mitsubishi, Nisshin-Denki, Oku-Electronics), позиционирование приводов в производстве полупроводников wafer-steppers (Canon), автоматическое управление двигателем пылесосов с автоматическим определением типа поверхности и степени засоренности (Matsushita), однокнопочное управление стиральными машинами (Matsushita, Hitatchi); так и для упрощения повседневной жизни человека: оптимизация потребления бензина в автомобилях (NOK, Nippon Denki Tools), повышение чувствительности и эффективности управления лифтами (Fujitec, Hitachi, Toshiba), оптимизированное планирование автобусных расписаний (Toshiba, Nippon-System, Keihan-Express), системы архивации документов (Mitsubishi Elec.), системы прогнозирования землетрясений (Inst. of Seismology Bureau of Metrology, Japan), диагностика рака (Kawasaki Medical School), распознавание рукописных символов в карманных компьютерах (записных книжках) (Sony), распознавание движения изображения в видеокамерах (Canon, Minolta).

Управление на основе нечеткой логики использует предложения в форме правил для того, чтобы управлять тем или иным процессом. Регулятор на основе нечеткой логики может иметь неограниченное число входных сигналов и строится на основе знаний «эксперта», а также, в отличие от традиционных систем управления (например, ПИД-регуляторов), может синтезироваться без использования специфических знаний об объекте управления. Данный тип регуляторов хорошо зарекомендовал себя в управлении сложными нелинейными системами, а также системами с нелинейными внешними возмущениями.

В 1965 году Lotfi A. Zadeh (Лотфи Заде) опубликовал исследование "Fuzzy Sets", в котором излагались, помимо теории нечетких множеств, основы нечеткой логики. Заде отметил, что обычная двоичная логика, используемая в компьютерной технике, не может оперировать данными,

представляющими собой неопределенные или субъективные суждения. В связи с этим нечеткая логика, предложенная Заде, была актуальна и позволяла «научить» технические устройства функционировать подобно процессу человеческого мышления. Первая система управления техническим устройством на базе нечеткой логики была разработана Mamdani (Мамдани) – им был малый паровой двигатель. Алгоритм управления на базе нечеткой логики, предложенный Мамдани, состоит из набора эвристических правил для управления устройством. Нечеткие множества и нечеткая логика используются для представления языковых термов и оценки составленных правил. Данные исследования привлекли интерес как исследователей, так и промышленности к нечеткой логике и к системам управления на их основе; нужно отметить, что данный тип управления актуален и по сей день.



Lotfi Askar Zadeh



Ebrahim Mamdani



Michio Sugeno



Tomohiro Takagi

Рисунок 1.1 – Основоположники использования нечеткой логики в технических системах

В 1989 году Сугено разработал адаптивный регулятор на основе нечеткой логики – двадцать лингвистических правил управляли движением автомобиля. Каждое лингвистическое правило, исходя из показаний скорости и расстояния от заданной траектории, управляло положением руля. Также Сугено совместно с Такаги продолжили работы Заде и Мамдани и вывели обобщенную модель регуляторов с нечеткой логикой, применимую для систем с явной нелинейной структурой, которая также используется для исследования устойчивости таких систем.

Традиционная двоичная логика построена на решениях: «да» - «нет», «правда» - «ложь», «ноль» - «один». С другой стороны, нечеткая логика оперирует также и решениями, которые лежат между «правдой» и «ложью». В качестве примера можно рассмотреть кондиционер воздуха, в котором установлен регулятор его автоматического включения, логика включения которого представлена на рис.1.2.



Рисунок 1.2 – Схема работы кондиционера воздуха с регулятором

Регулятор с нечеткой логикой, в отличие от регулятора с двоичной логикой, может распознать теплую и холодную температуру. Например, мы можем написать следующее правило для такого регулятора:

- Правило: **ЕСЛИ** температура в комнате теплая и повышается, **ТО** необходимо включить кондиционер.

Таким образом, ядром регулятора с нечеткой логикой является набор лингвистических (вербальных) правил в формате ЕСЛИ - ТО. Каждое правило оперирует несколькими переменными: входными – в части ЕСЛИ и выходными – в части ТО. Оперируя данными лингвистическими переменными, возможно описать желаемое управление сложной динамической системой на основе экспертизы знаний.

В примере с кондиционером воздуха регулятор с нечеткой логикой (РНЛ) оперирует данными измерения температуры воздуха. Измеренная температура – это число, которое необходимо перевести в градации «тепло» - «холодно». Для этого используют так называемое экспертное восприятие (знание) человека. Например, пусть «0» и «1» – это соответственно «точно не жарко» и «очень жарко». Соответственно, в промежутке между «0» и «1» будут температуры, которые соответствуют температурам «тепло» и т.д.

Градация теплоты	0	0	0,4	0,9	1,0
Температура °C	15	19	21	25	30

Почему нечеткая логика?

Регуляторы с нечеткой логикой активно применяются в нелинейных системах или в системах с нелинейными внешними воздействиями, в системах с большим временем задержки. Вначале рассмотрим, почему отдают предпочтение традиционной логике нечеткой в технических системах:

- Традиционный ПИД-регулятор, структурная схема которого приведена на рис.1.3, хорошо изучен специалистами и широко применяется как в цифровой, так и в аналоговой реализации, тогда как применение регуляторов на основе нечеткой логики требует некоторых знаний нечеткой логики и синтеза функций принадлежности.
- Регулятор с нечеткой логикой является нелинейным элементом и сложен для анализа и исследования устойчивости систем при его применении.
- Регулятор с нечеткой логикой требует настройки большего количества параметров, чем ПИД-регулятор. Помимо этого, настройка РНЛ часто производится онлайн.

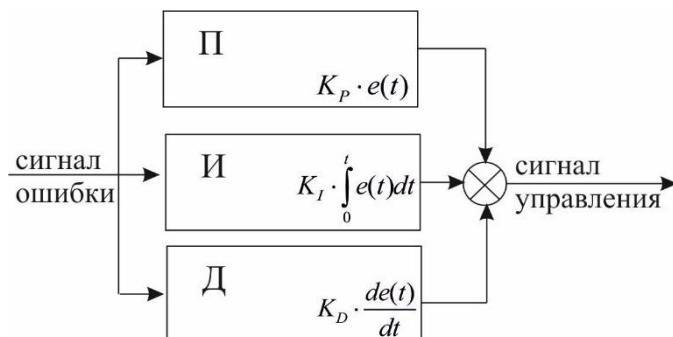


Рисунок 1.3 – Структурная схема ПИД-регулятора



Рисунок 1.4 – Структурная схема замкнутой системы с ПИД-регулятором

С другой стороны, РНЛ, структурная схема которого приведена на рис.1.5, успешно применяются в технических системах по следующим причинам:

- Система управления построена на применении правил вида «если» - «то», что облегчает процесс синтеза регулятора специалистом, так как используются слова и понятия, используемые в каждодневном общеде: «высоко», «низко» и т.д.
- РНЛ может иметь множество входных и выходных переменных, которые взаимосвязаны между собой правилами «если» - «то» и дополняются логическими связками «и», «или». Правила работают параллельно. Даже если специалистом допущен конфликт правил, то другие правила могут разрешить возникший конфликт.
- РНЛ, в связи с тем, что имеет явную нелинейную структуру, активно применяется как в системах, имеющих нелинейности в своей структуре, так и в системах с нелинейными внешними воздействиями.

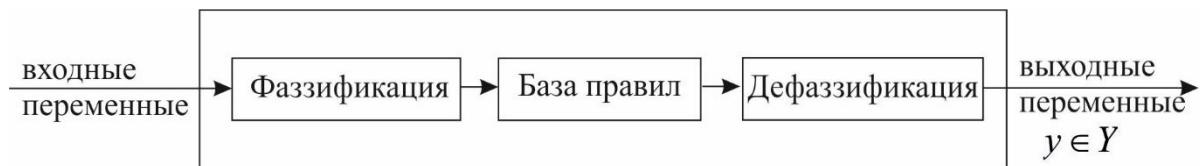


Рисунок 1.5 – Структурная схема регулятора с нечеткой логикой (РНЛ)

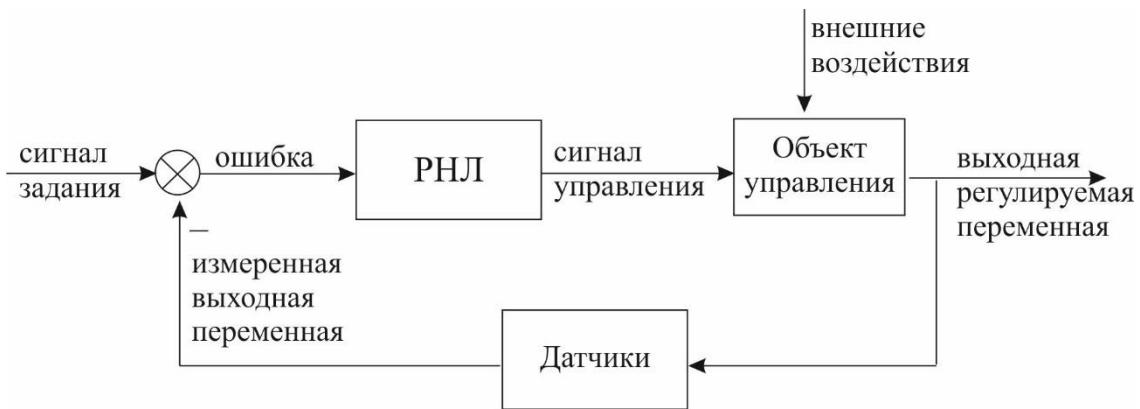


Рисунок 1.6 – Структурная схема замкнутой системы с РНЛ

1.2 Основные положения теории нечетких множеств

В теории четких множеств принадлежность элемента x некоторому множеству A записывается в формализованном виде:

$$x \in A \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1), записанное с помощью характеристической функции, эквивалентно системе (1.2) и изображено на рис.1.7а:

$$\mu_A^*(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \Leftrightarrow x \in A \quad (1.2)$$

Пусть задано арифметическое пространство \mathfrak{R}_1 , в котором задано подмножество A (дискретное или непрерывное), тогда характеристическая функция $\mu_A^*(x)$ осуществляет отображение подмножества A в множество \mathfrak{R}_1 , которое содержит два элемента 1 и 0:

$$\mu_A^*(x) : A \rightarrow \mathfrak{R}_1 = \{0, 1\} \quad (1.3)$$

Также пусть задано подмножество B (дискретное или непрерывное), такое что A и B не пересекаются: $A \subset \mathfrak{R}_1$, $B \subset \mathfrak{R}_1$, $A \cap B \neq \emptyset$ (рис.1.7 б).

В этом случае графические формы принадлежности представлены на рис.1.7б и являются совокупностью двух прямоугольников. Граница между двумя множествами четкая и переход из одного множества в другое происходит скачком.

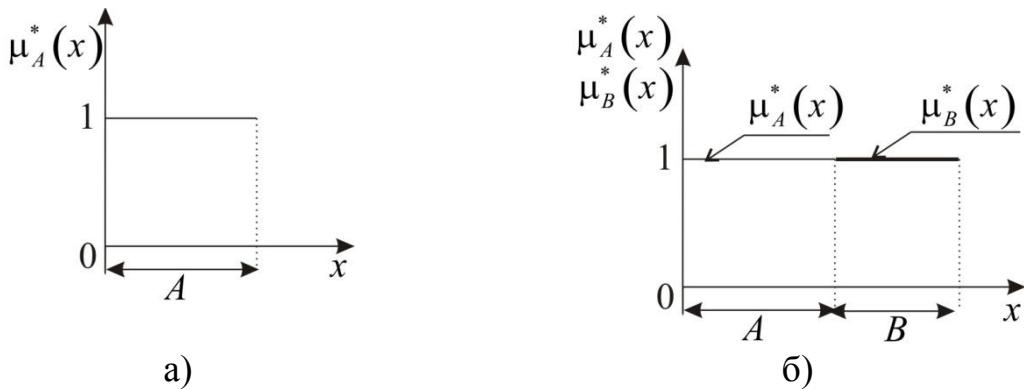


Рисунок 1.7 – Понятие принадлежности в четкой теории множеств:

- а) принадлежность в подмножеству A ; б) совокупность принадлежностей к подмножеству A и B

В теории нечетких множеств $\mu_A(x)$ называется одномерной функцией принадлежности, если область значений одномерного отображения $\mu_A(x) \in [0, 1] \subset \mathfrak{R}_1$ [34].

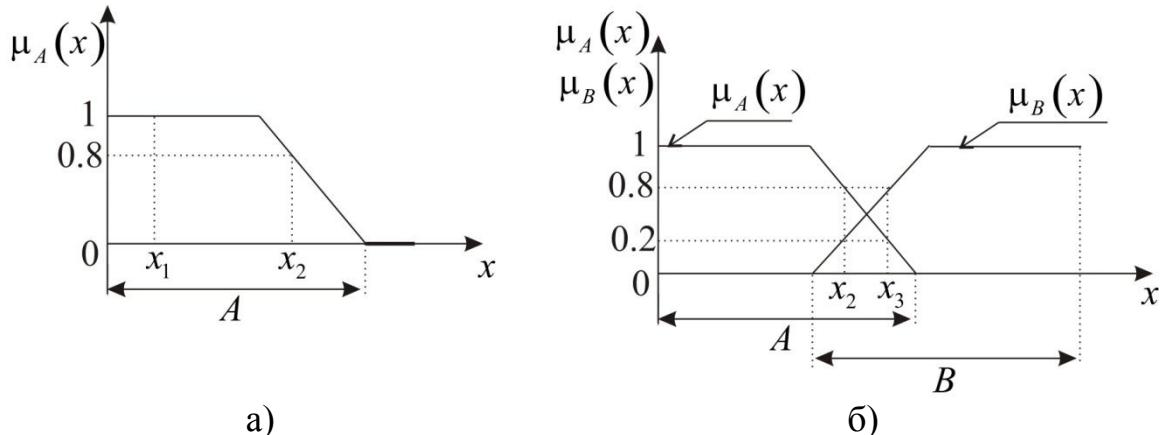


Рисунок 1.8 – Понятие принадлежности в нечеткой теории множеств: а) принадлежность в подмножеству A ; б) совокупность принадлежностей к подмножеству A и B

Графическая форма одномерной функции принадлежности представлена на рис.1.8. Подмножество $A \subset \Re_1$ имеет функцию принадлежности $\mu_A(x)$ и представлено на рис.1.8а. Возьмем элементы $x_1 \in A$ и $x_2 \in A$ с функциями принадлежности $\mu_A(x_1)=1$ и $\mu_A(x_2)=0.8$ соответственно. В теории нечетких множеств говорят, что элемент x_1 полностью принадлежит множеству A , а x_2 – частично и имеет вес, равный 0.8. На рис. 1.8б приведено пересечение двух функций принадлежности $\mu_A(x)$ и $\mu_B(x)$ ($B \subset \Re_1$). Элемент x_2 принадлежит множеству A с весом 0.8, а множеству B с весом 0.2 ($\mu_B(x_2)=0.2$). Аналогично для элемента x_3 – $\mu_A(x_3)=0.2$, $\mu_B(x_3)=0.8$. Граница между двумя множествами А и В нечеткая, переход элементов из одного множества в другое происходит плавно и имеет место условие нормировки $\mu_A(x)+\mu_B(x)=1$.

Для одномерного нечеткого подмножества $A \subset \Re_1$, являющегося совокупностью упорядоченных пар $\{x, \mu_A(x)\}, x \in \Re_1$ справедливы следующие представления нечетких множеств:

$$A = \{x / \mu_A(x)\} \Leftrightarrow A = \{\mu_A(x) / x\} \Leftrightarrow \\ A = \{x, \mu_A(x)\} \Leftrightarrow A = \{\mu_A(x), x\} \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_i \mu_A(x_i) / x_i & \text{– дискретное множество} \\ \int_A \mu_A(x) / x & \text{– непрерывное множество} \end{cases} \quad (1.4)$$

Для решения традиционных задач теории управления используется нечеткое отображение. Нечеткое отображение φ - это отображение с

нечеткой областью с функцией принадлежности $\mu_\varphi(x, y)$, где каждому элементу $x \in A_1$ ставится в соответствие элемент $y \in A_2$. Геометрическое представление нечеткого отображения приведено на рис.1.3.

На рис.1.9 изображена функция принадлежности нечеткого отображения φ . Построение функции принадлежности нечеткого множества A осуществляется проекцией на горизонтальную ось, соответствующей множеству x . Функция принадлежности нечеткого образа $\varphi(A)$ строится проекцией на ось, соответствующей множеству y как показано на рис. 1.9.

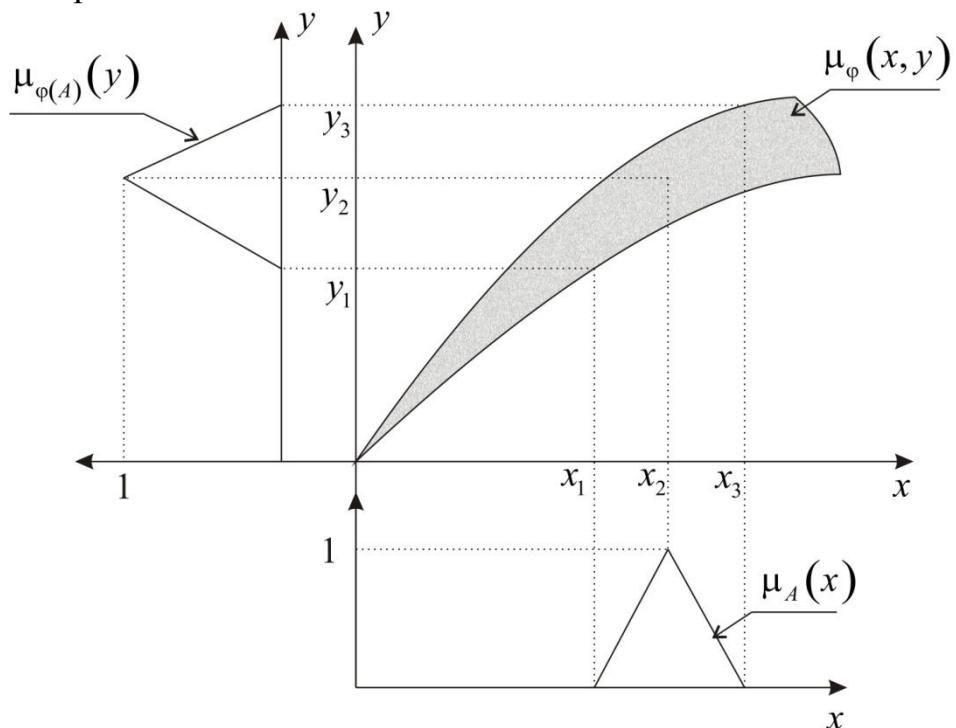


Рисунок 1.9 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

Каждое нечеткое множество в системах управления ассоциируется с лингвистической переменной. Например, нечеткому множеству $\mu_A(x)$ ставится в соответствие лингвистическая переменная «Отрицательное». При введении лингвистической переменной «Большое Отрицательное» возникает модифицированное нечеткое множество с функцией принадлежности $m_p(A)$. Степенная связность нечеткого множества A с $\mu_A(x)$ и $m_p(A)$ определяется выражением $m_p(A) = \int_x^{\mu_A^p(x)} / x$, где p - параметр модификации.

Например, для лингвистической переменной "Большое Отрицательное" $= A^2 = \int_x^{\mu_A^2(x)} / x$.

Базовые логические операции

Пусть $A, B, C \dots X, Y, Z$ - множества, а $a, b, c \dots x, y, z$ - элементы множества.

В таблице 1 приведены основные логические операции, применяемые в нечеткой логике, на рис. 1.10 - их графическое изображение.

Таблица 1 - Основные логические операции

Обозначение	Описание
$a \in A$	Элемент a принадлежит к множеству A . Символ " \in " читается как - «принадлежит к» или «элемент множества».
$a \notin A$	Элемент a не принадлежит к множеству A .
U	Универсальное множество, состоящее из элементов
$\emptyset \in A$	Пустое множество, не имеющих в своем составе элементов
$A \subseteq B$	Если каждый элемент множества A принадлежит к множеству B , то A является подмножеством B
$A = B$	Если $A \subseteq B$ и $B \subseteq A$, то A и B являются равными множествами
$A \neq B$	A и B не являются равными множествами
$A \subset B$	Если $A \subseteq B$ и $A \neq B$, тогда B в своем составе имеет как минимум один элемент, который не принадлежит к множеству A
$P(A)$	множество, состоящее из всех возможных подмножеств заданного множества A , называется множеством степеней A
$\neg A$	множество всех элементов универсального множества U , не входящих в A $\neg A = \{x x \in U \text{ and } x \notin A\}$
$A \cup B$	множество, содержащее все элементы, принадлежащие либо A , либо B $A \cup B = \{x x \in A \text{ or } x \in B\}$
$A \cap B$	множество, содержащее все элементы, принадлежащие как множеству A , так и множеству B одновременно $A \cap B = \{x x \in A \text{ and } x \in B\}$
$A - B$	множество, состоящее из всех элементов множества A , не принадлежащих множеству B $A - B = \{x x \in A \text{ and } x \notin B\}$

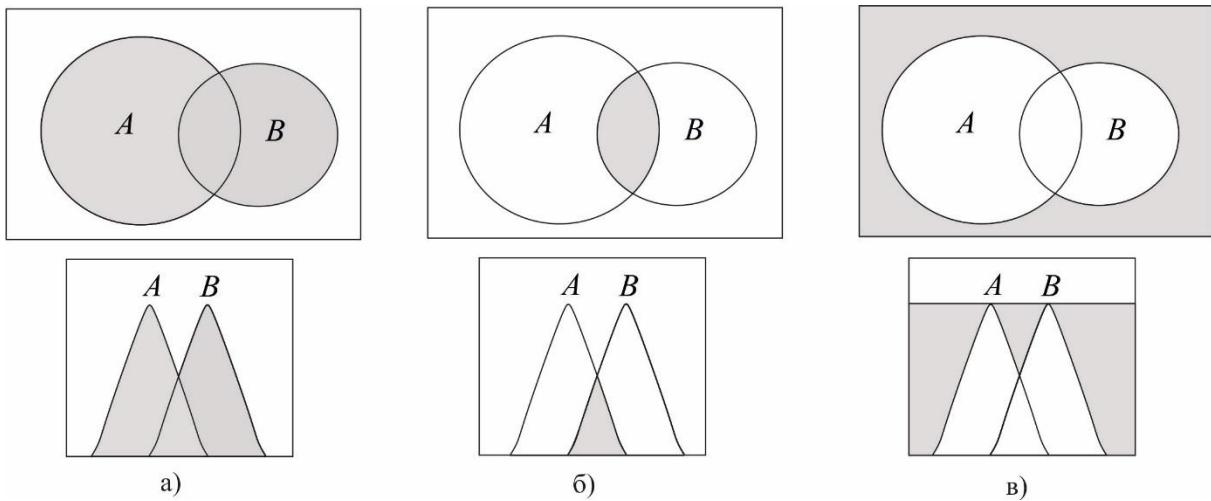


Рисунок 1.10 – Графическое изображение логических операций
 а) объединения $A \cup B$ ($\mu_{A \cup B}(x) \equiv \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$); б) пересечения $A \cap B$ ($\mu_{A \cap B}(x) \equiv \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$); в) дополнения $\overline{A \cup B}$
 $(\mu_{\overline{A \cup B}}(x) \equiv 1 - \mu_{A \cup B}(x))$

Базовые логические операции и их свойства:

- 1) $\neg \neg A = A$
- 2) $A \cap B = B \cap A$
- 3) $A \cup B = B \cup A$
- 4) $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
- 5) $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$
- 6) $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
- 7) $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
- 8) $A \cap A = A$
- 9) $A \cup A = A$
- 10) $A \cap (A \cup B) = A$
- 11) $A \cup (A \cap B) = A$
- 12) $A \cup U = U$
- 13) $A \cap U = A$
- 14) $A \cap \emptyset = \emptyset$
- 15) $A \cup \emptyset = A$
- 16) $A \cap \neg A = \emptyset$
- 17) $A \cup \neg A = U$
- 18) $\neg(A \cap B) = \neg A \cup \neg B$
- 19) $\neg(A \cup B) = \neg A \cap \neg B$

1.3 Понятие функции принадлежности

Важнейшим понятием нечеткой логики является понятие функции принадлежности.

Пусть U – универсальное множество. Нечеткое множество U характеризуется функцией принадлежности $\mu_{NCT}(x)$, которая принимает значения в интервале $[0,1]$. Нечеткое множество A , принадлежащее U , может быть представлено парой элементов - значения x и его значения функции принадлежности $A = \{(x, \mu_{NCT}(x)) | x \in U\}$. Пример функции принадлежности нечеткого множества «числа около 3» приведена на рис.1.11.

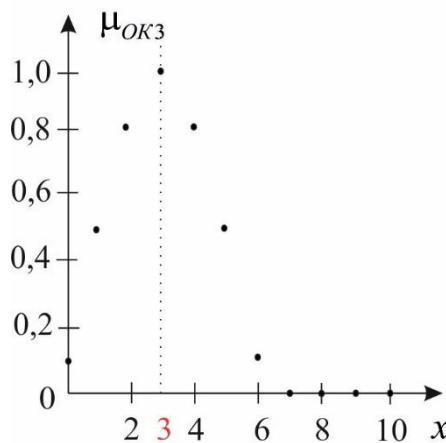


Рисунок 1.11 Функция принадлежности нечеткого множества «число около 3»

Если U - непрерывная, то A , согласно (1.4) можно вычислить формулой

$$A = \int_U \mu_{OK3}(x) / x$$

Если U - дискретная, то

$$A = \sum_U \mu_{OK3}(x) / x$$

Таким образом, для дискретного множества можем вычислить:

$$\{\text{Около } 3\} = \sum_U \mu_{OK3}(x) / x = \frac{0,1}{0} + \frac{0,5}{1} + \frac{0,8}{2} + \frac{1}{3} + \frac{0,8}{4} + \frac{0,5}{5} + \frac{0,1}{6}$$

Примером непрерывного множества может служить пример определения старого и молодого возраста у человека.

Пусть функции принадлежности определены как на рисунке 1.12.

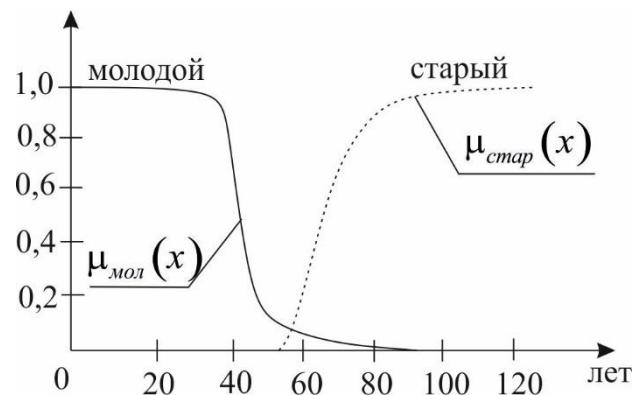


Рисунок 1.12 – Функция принадлежности нечеткого множества «молодой» и «старый»

Таким образом, для непрерывного множества можем вычислить:

$$\{Молодой\} = \int_U \mu_{mol}(x) / x = \int_0^{25} \frac{1}{x} + \int_{25}^{120} \left[1 + \left(\frac{x-25}{5} \right)^2 \right]^{-1} dx$$

$$\{Старый\} = \int_U \mu_{cmap}(x) / x = \int_{50}^{120} \left[1 + \left(\frac{x-50}{5} \right)^{-2} \right]^{-1} dx$$

На практике для решения задач систем управления наиболее распространены треугольные, трапецидальные и колоколообразные функции принадлежности, приведенные на рис.1.13. На рисунке приняты следующие обозначения: X - значение функции принадлежности μ , x_0 - начальное значение диапазона, x_n - конечное значение диапазона, x_m - значение, при котором значение функции принадлежности максимально.

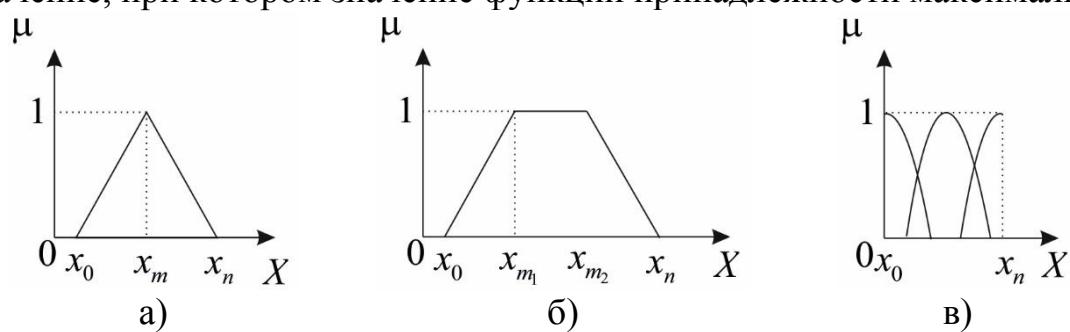


Рисунок 1.13 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

Таблица 2 - Математическое описание функций принадлежности

Форма функции принадлежности	Формула математического описания
<p>Треугольная</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x < a \text{ или } x > c \end{cases}$
<p>Нормального распределения</p>	$\mu_A(x) = e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^2}, \quad b>0$
<p>Трапециoidalная</p>	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x \leq d \\ 0, & x > d \end{cases}$

При синтезе данных функций принадлежности в пакете имитационного моделирования MatLab используют следующие подпрограммы, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 - Подпрограммы MatLab для синтеза произвольной функции принадлежности

№ п/ п	Подпрограмма для синтеза функции принадлежности	Графическое изображение функции принадлежности
1	<p>Треугольная функция принадлежности</p> <pre data-bbox="255 624 684 788">>> x = (0:0.2:10); >> y = trimf(x, [3 4 5]); >> plot(x, y);</pre>	
2	<p>Трапецеидальная функция принадлежности</p> <pre data-bbox="255 1019 684 1138">>> y = trapmf(x, [3 4 6 8]); >> plot(x, y)</pre>	
3	<p>Гауссовская функция принадлежности 1 типа</p> <pre data-bbox="255 1399 684 1495">>> y = gaussmf(x, [1 5]); >> plot(x, y)</pre>	

4	<p>Гауссовская функция принадлежности 2 типа</p> <pre>>> y = gauss2mf(x, [1 5 1.5 6]); >> plot(x, y);</pre>	
5	<p>Колокоидальная функция принадлежности</p> <pre>>> y1 = gbellmf(x, [1 1 5]); >> y2 = gbellmf(x, [1 2 5]); >> y3 = gbellmf(x, [1 3 5]); >> plot(x, y1, x, y2, x, y3);</pre>	
6	<p>Сигмоидальная функция принадлежности</p> <pre>>> y1 = sigmf(x, [-3 5]); >> y2 = sigmf(x, [-4 5]); >> y3 = sigmf(x, [-1 5]); >> plot(x, y1, x, y2, x, y3)</pre>	

Лингвистические переменные

Важнейшей особенностью в нечеткой логике является представление знаний в нечетких рассуждениях в виде лингвистических переменных. Примером лингвистической переменной может служить оценка скорости автомобиля - «скорость автомобиля «БЫСТРАЯ». Таким образом, лингвистическая переменная - это значение, описанное с помощью естественного языка с применением нечеткого множества, в частности, с помощью функций принадлежности.

Рассмотрим пример описания с помощью лингвистических переменных температуры окружающей среды приведенную в Фаренгейтах. Каждая лингвистическая переменная представлена в виде треугольной функции принадлежности, как показано на рис. 1.14. Мы будем оперировать такими лингвистическими переменными как «Очень холодно», «Холодно», «Тепло», «Жарко».

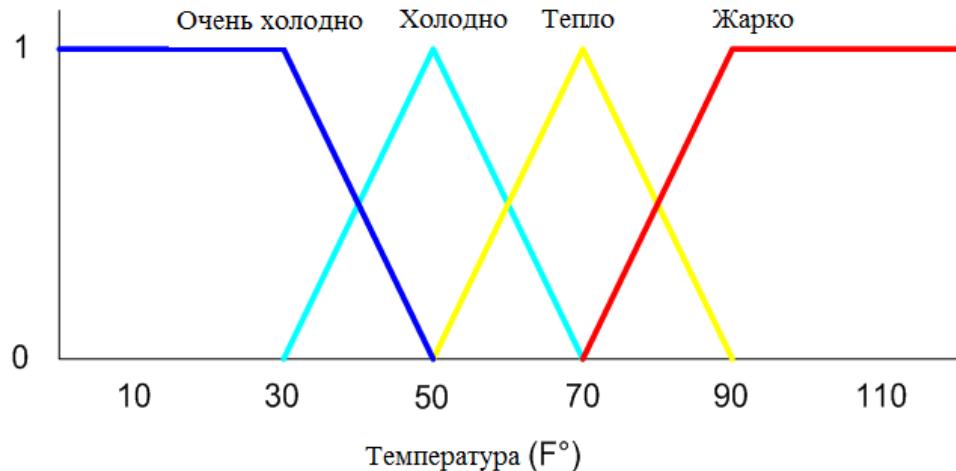


Рисунок 1.14 – Функции принадлежности лингвистических переменных описания температуры внешней среды

Необходимо с помощью функций принадлежности оценить какой лингвистической переменной принадлежит температура $36F^{\circ}$ (рис.1.15).

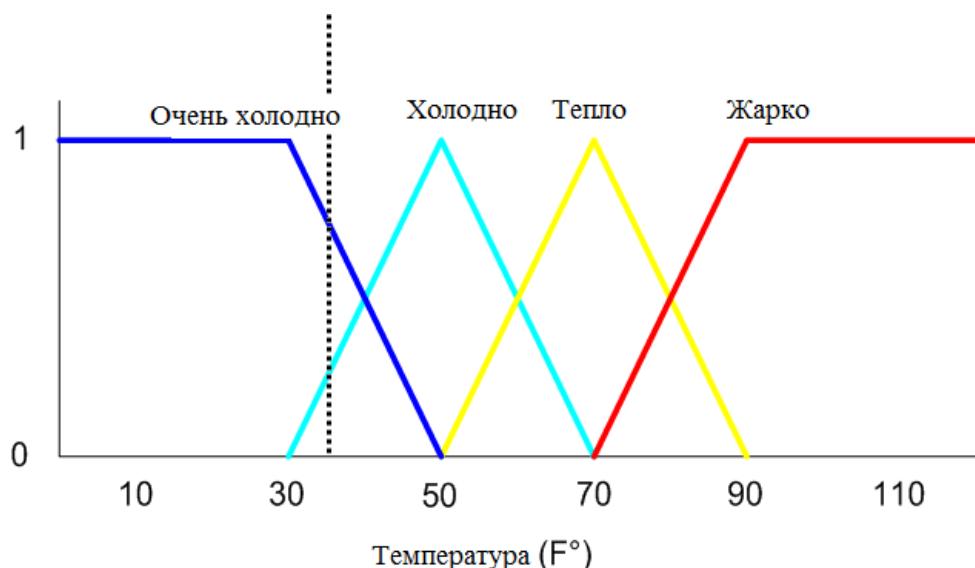


Рисунок 1.15 – Функции принадлежности лингвистических переменных - поиск $36F^{\circ}$

Как видно из рисунка, $36F^\circ$ принадлежит на 30% к лингвистической переменной «Холодно» и на 70% - к «Очень холодно».

1.4 Нечеткие правила и нечеткая импликация

В теории нечетких множеств для управления параметрами большое значение имеют нечеткие предложения – высказывания типа « $\text{pr}: x \text{ есть } A$ », где x - физическая величина (скорость, ток), A - лингвистическая переменная, pr - предложение. Например, «скорость есть высокая» – « $\text{pr}: x = A$ ». Нечеткие предложения дополняются связками «И» и «ИЛИ», которые реализуются с помощью Т- и S- норм, соответственно. Логические связки «И» и «ИЛИ» приведены в таблице 2.1.

Таблица 4 - Логические связки «И» и «ИЛИ»

Логическая Связка	«И»	«ИЛИ»
Метод		
Заде	$\min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x))$	$\max(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x))$
Лукашевич	$\max(\mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) - 1; 0)$	$\min(\mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) - 1; 0)$
Бандлер, Кохоут	$\mu_{A_1}(x) \cdot \mu_{A_2}(x)$	$\mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) - \mu_{A_1}(x) \cdot \mu_{A_2}(x)$

Метод Заде при реализации логических связок «И» и «ИЛИ» (Т- и S- нормы) наиболее предпочтителен, т.к. не имеет избыточности, а именно, комбинация двух равных нечетких предложений:

$$\begin{aligned} \mu_{A \cap A} &= \min(\mu_A(x), \mu_A(x)) = \mu_A(x); \\ \mu_{A \cup A} &= \max(\mu_A(x), \mu_A(x)) = \mu_A(x). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Нечеткие предложения, дополненные логическими связками «И» и «ИЛИ» называют условиями и дополняются условием «ЕСЛИ»: «Если $\text{pr}_1 : x_1 = A_1$ и $\text{pr}_2 : x_2 = A_2$ ».

Совокупность условий дополняется заключением «ТОГДА» и называется выводом.

Совокупность условий и выводов называется нечетким правилом R_1 :

« R_i : ЕСЛИ $x_1 = A_1$ и $x_2 = A_2$, ТОГДА $y_1 = B_1$ и $y_2 = B_2$ ».

Совокупность нечетких правил образуют нечеткую базу правил $\{R_i\}_{i=1}^k$: R_i : ЕСЛИ ..., ТОГДА ...; $i = 1, k$. Нечеткая база правил имеет следующие свойства: непрерывность, непротиворечивость, полнота данных.

Нечеткой импликацией называется логическая операция «ЕСЛИ...ТОГДА...». Результатом нечеткой импликации является значение в результате выводов нечеткого высказывания.

Пусть правило содержит один вывод. База правил запишется следующим образом:

$$R_i: \mu_{B_{i1}} = \mu_{A_{1i}}(x_1) \rightarrow \mu_{A_{2i}}(x_2); i = 1, k, \quad (1.6)$$

В формуле 1.6 приняты следующие обозначения: « \rightarrow » - нечеткая импликация, A_{1i}, A_{2i} - нечеткие множества (условий), B_{i1} - нечеткое множество (вывода), $\mu_{A_{1i}}(x_1), \mu_{A_{2i}}(x_2), \mu_{B_{i1}}$ - функции принадлежности.

Возможны следующие обозначения нечеткой импликации:

$$\mu_B(y) = I(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(x)) \equiv \mu_{A_1}(x) \rightarrow \mu_{A_2}(x) \quad (1.7)$$

Различают несколько типов нечетких импликаций:

1) Нечеткая импликация S -типа.

$$y = I(u_1, u_2) = S(u_1^{(-)}, u_2), \quad (1.8)$$

где S - норма.

Примером является нечеткая импликация Клине (рис.2.5):

$$y = I(u_1, u_2) = u_1^{(-)} \vee u_2 = (1 - u_1) \vee u_2 \quad (1.9)$$

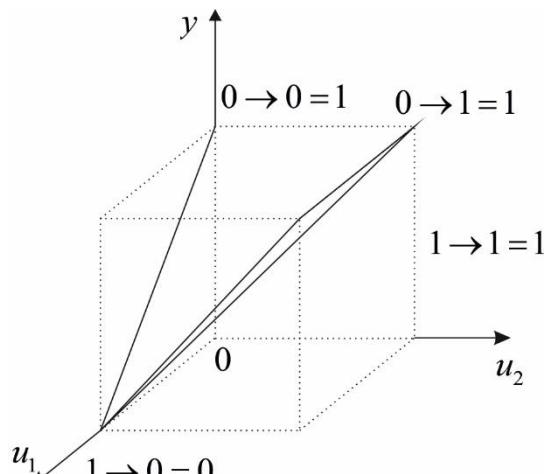


Рисунок 1.16 – Границные условия импликации S -типа

2) Нечеткая импликация QL -типа.

$$y = I(u_1, u_2) = S(u_1^{(-)}, T(u_1, u_2)). \quad (1.10)$$

Примерами являются:

2.1) Нечеткая импликация Рейшенбах:

$$y = I(u_1, u_2) = S(u_1^{(-)}, T(u_1, u_2)) = u_1^{(-)} + u_1 \cdot u_2 = 1 - u_1 + u_1 \cdot u_2 \quad (1.11)$$

2.2) Нечеткая импликация Ли:

$$y = I(u_1, u_2) = S(T(u_1^{(-)}), u_2^{(-)}, u_2). \quad (1.12)$$

2.3) Нечеткая импликация *QL*-типа:

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 1 - u_1, & \text{если } u_2 = 0, \\ u_2, & \text{если } u_1 = 1, \\ 1, & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (1.13)$$

3) Нечеткая импликация *R*-типа.

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } u_1 \leq u_2, \\ 0, & \text{если } u_1 = 1 \wedge u_2 = 0, \\ \in (0;1), & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (1.14)$$

Примером являются:

3.1) Нечеткая импликация Гогаена:

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 1, & \text{если } u_1 = 0 \\ \min\left(\frac{u_2}{u_1}; 1\right), & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1.15)$$

3.2) Нечеткая импликация *R*-типа (рис.2.5):

$$y = I(u_1, u_2) = \sup \left\{ \gamma = [0;1] \middle/ T(u_1, \gamma) \leq u_2 \right\},$$

или

$$I(u_1, u_2) = 1 - \inf \left\{ \gamma = [0;1] \middle/ S(u_2, \gamma) \geq u_1 \right\}.$$
(1.16)

4) Нечеткая импликация *T*-типа.

$$y = I(u_1, u_2) = T(u_1, u_2), \quad (1.17)$$

где *T* - норма.

Примером являются:

4.1) Нечеткая импликация Мамдани

$$y = I(u_1, u_2) = u_1 \wedge u_2 = \min(u_1, u_2) \quad (1.18)$$

4.2) Нечеткая импликация Ларсена

$$y = I(u_1, u_2) = u_1 \cdot u_2 \quad (1.18)$$

5) Нечеткая импликация, отражающая частичный порядок.

$$y = I(u_1, u_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } u_1 + u_2 \leq 1, \\ 1, & \text{если } u_1 = 1 \wedge u_2 = 1 \\ \in (0;1), & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1.19)$$

Примером является нечеткая импликация Ягера:

$$y = I(u_1, u_2) = u_2^{u_1} \quad (1.18)$$

Композиция нечетких отношений в символьической форме для двумерного нечеткого отношения представляется в виде:

$$B = A \circ R, \quad (1.19)$$

где \circ – композиция, $A = A_1 \times A_2$ - заданное одномерное нечеткое множество в A_1 , $\mu_A(x)$ – функция принадлежности множества A , B – нечеткое искомое множество в A_2 , R – данное двумерное нечеткое отношение в $A_1 \times A_2$, $\mu_R(x_1, x_2)$ - функция принадлежности $R \subset A$.

$$R = \int_{A=A_1 \times A_2} \mu_R(x_1, x_2) / (x_1, x_2) \quad (1.20)$$

Операция проектирования нечеткого отношения $R \subset A$ на одномерное нечеткое множество A_2 определяется по (2.21) и приведено на рис.2.6.

$$A_2 = \{\mu_{A_2}(x_2); x_2\} = \text{proj}(R, A_2) = \int_{A_2} \sup_{x_1} \mu_R(x_1, x_2) / x_2 \quad (1.21)$$

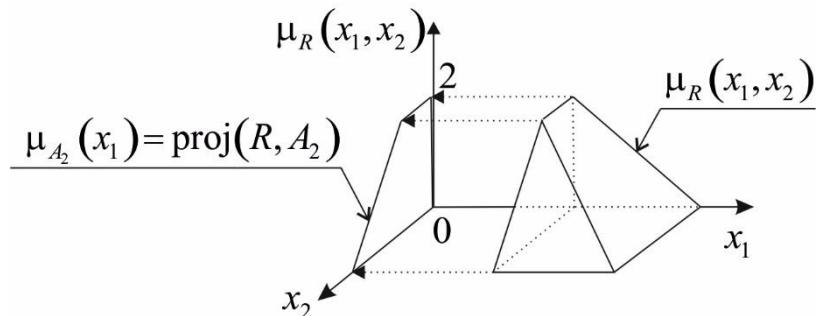


Рисунок 1.17 – Графическое изображение операции проектирования

Операция цилиндрического расширения по Заде определяется в виде (1.22):

$$R = \text{cext}(A; A_1 \times A_2) = \int_{A_1 \times A_2} \mu_R(x_1) / (x_1, x_2) \quad (1.22)$$

С учетом (2.21) и (2.22) определяем нечеткое множество B :

$$B = \text{proj} \left(R \cap \text{cext}(A; A_1 \times A_2); A_2 \right) \quad (1.23)$$

В качестве операции \cap используется операция T -нормы и вычисляется как логическое произведение по Заде:

$$\mu_B(x_2) = \sup_{x_1} T(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, x_2)) = \sup_{x_1} \min(\mu_A(x_1), \mu_R(x_1, x_2)) \quad (1.24)$$

Объединение локальных выводов B_i по каждому правилу R_i в общий вывод B называется агрегацией: $B = \bigcup_{i=1}^k B_i$, где \bigcup - объединение локальных выводов.

Пример агрегации вывода B («приблизительно число 5») по локальным выводам B_1, B_2, B_3 приведен на рис.1.18.

База правил $\{R_i\}_{i=1}^3$ содержит следующие правила:

$$\{R_i\}_{i=1}^3 = \begin{cases} R_1 : \text{если } x = A_1 \text{ и } y = A_2, \text{ тогда } z = A_3; \\ \text{или} \\ R_2 : \text{если } x = A_4 \text{ и } y = A_2, \text{ тогда } z = A_4; \\ \text{или} \\ R_3 : \text{если } x = A_3 \text{ и } y = A_2, \text{ тогда } z = A_1. \end{cases} \quad (1.25)$$

где $A_i (i = \overline{1, 4})$ - нечеткие множества с соответствующими треугольными функциями принадлежности.

Функции принадлежности B_i вычисляются по методу Заде (1.5) и представляют собой:

$$\begin{aligned} \mu_{B_1}(z) &= \max \left\{ \mu_{A_3}(z), \min \left(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(y) \right) \right\}; \\ \mu_{B_2}(z) &= \max \left\{ \mu_{A_4}(z), \min \left(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(y) \right) \right\}; \\ \mu_{B_3}(z) &= \max \left\{ \mu_{A_1}(z), \min \left(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(y) \right) \right\}. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Общий вывод B равен:

$$\mu_B(z) = \mu_{B_1}(z) + \mu_{B_2}(z) + \mu_{B_3}(z) \quad (1.27)$$

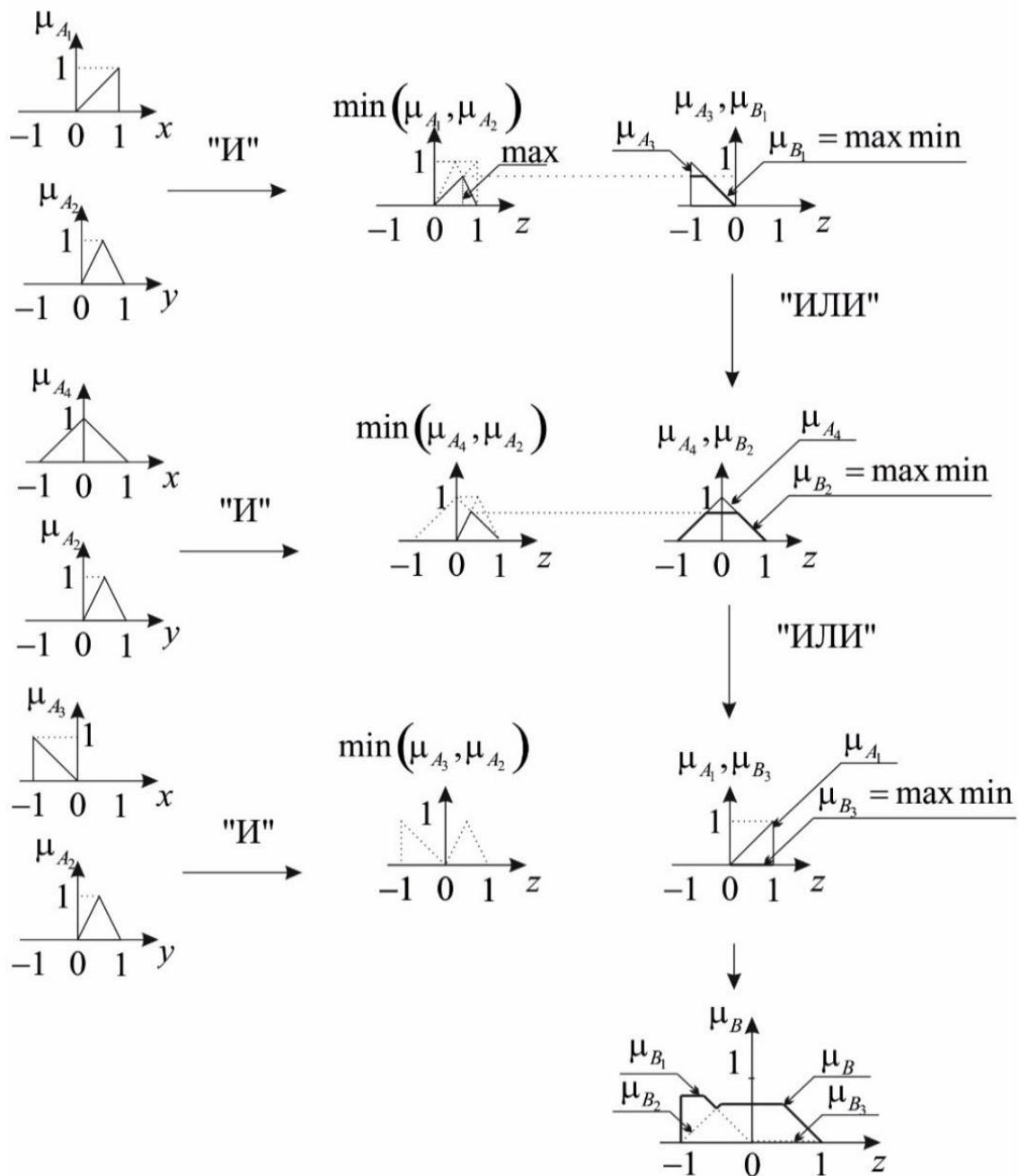
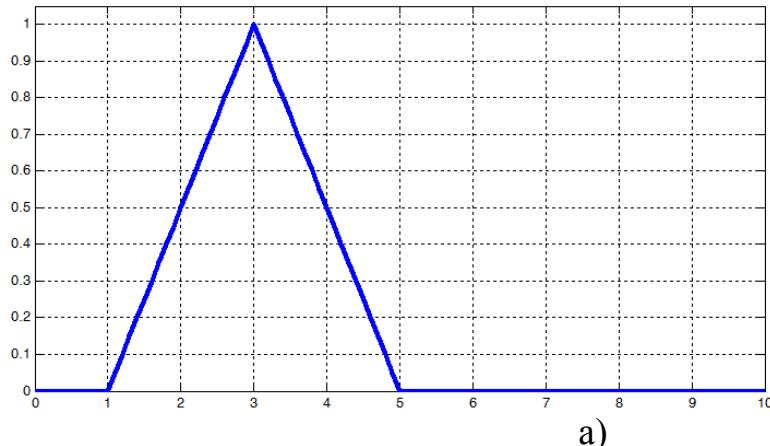


Рисунок 1.18 – Графическое построение общего вывода B

Рассмотрим методы нечеткой импликации в пакете имитационного моделирования MatLab.

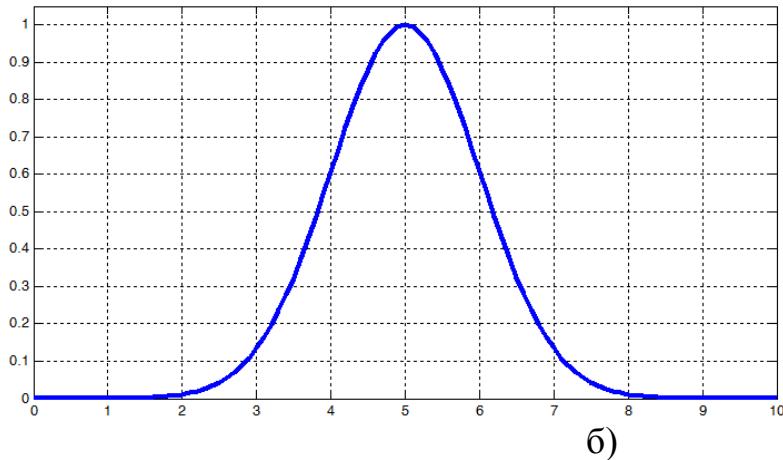
Задание 1.

Пусть заданы две функции принадлежности: треугольная и гауссовская, приведенные на рис. 1.19а, б, соответственно.



а)

```
>> x = (0:0.1:10);
>> y = trimf(x, [1 3 5]);
>> plot(x, y);
```



б)

```
>> x = (0:0.1:10);
>> y = gaussmf(x, [1 5]);
>> plot(x, y);
```

Рисунок 1.19 – Функции принадлежности и их математическое построение в MatLab

Найдем нечеткую импликацию $I(A, B) = \min(A, B)$ при значении $\mu=1$.

```
>> x1 = (0:0.1:10);
>> x2 = (0:0.1:10);
>> [X, Y] = meshgrid(x1, x2);
>> Z = min(trimf(X, [1 3 5]), gaussmf(Y,[1 5]));
>> plot3(X,Y,Z)
```

В результате получаем решение, показанное на рисунке 1.20 кривой 1.

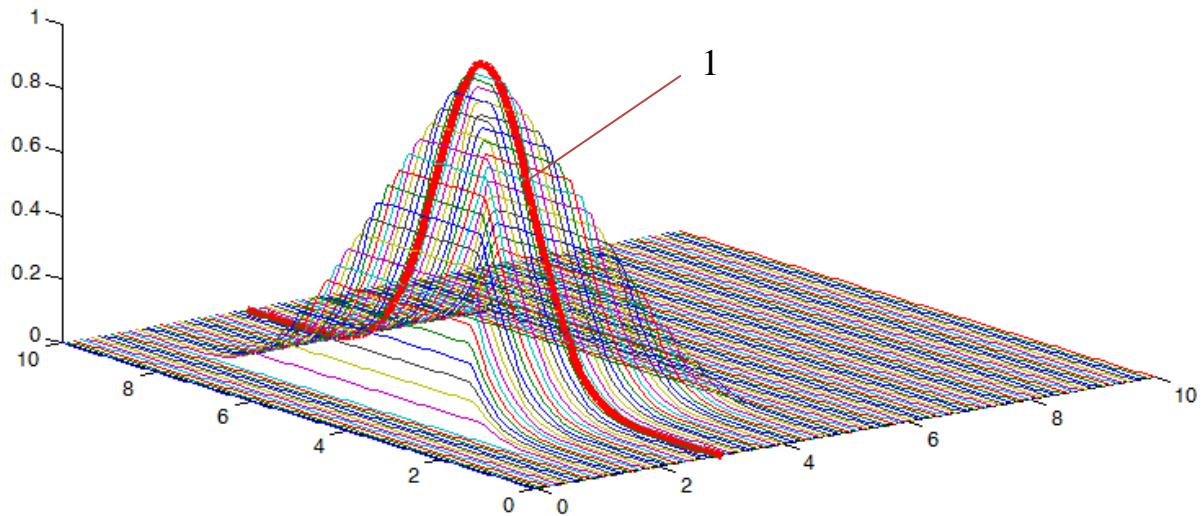


Рисунок 1.20 – Решение нечеткой импликации

Все множество решений показано на рис.1.21.

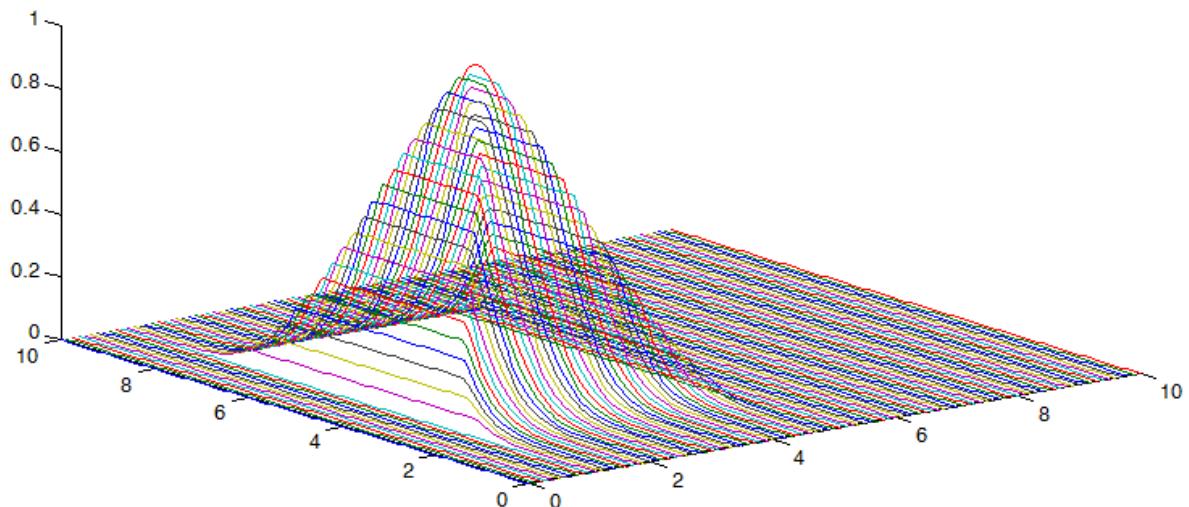


Рисунок 1.21 – Множество решений нечеткой импликации

Задание 2.

Вторым примером рассмотрим нахождение нечеткой импликации двух треугольных функций принадлежности, приведенных на рис.1.22 а), б) при значении $\mu=0,4$.

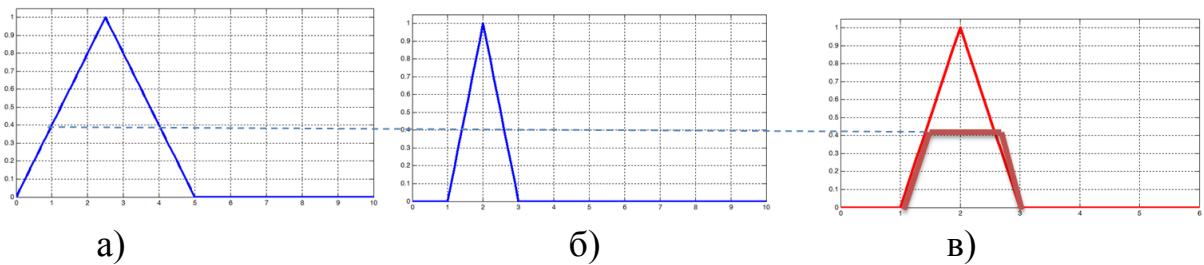


Рисунок 1.22 – Заданные функции принадлежности - а), б) и их нечеткая импликация - в)

Заданная функция принадлежности (рис.1.22 а):

```
>> x = (0:0.1:10);
>> y = trimf(x, [0 2.5 5]);
>> plot(x, y);
```

Заданная функция принадлежности (рис.1.22 б):

```
>> x = (0:0.1:10);
>> y = trimf(x, [1 2 3]);
>> plot(x, y);
```

Поиск нечеткой импликации (рис.1.22 в):

```
>> x2 = (0:0.1:6);
>> x1 = (0:0.1:6);
>> [X, Y] = meshgrid(x1, x2);
>> Z = min(trimf(X,[0 2.5 5]),trimf(Y,[1 2 3]));
>> plot3(X,Y,Z)
```

В результате получаем решение нечеткой импликации в определенной точке – кривая 1, рис.1.23.

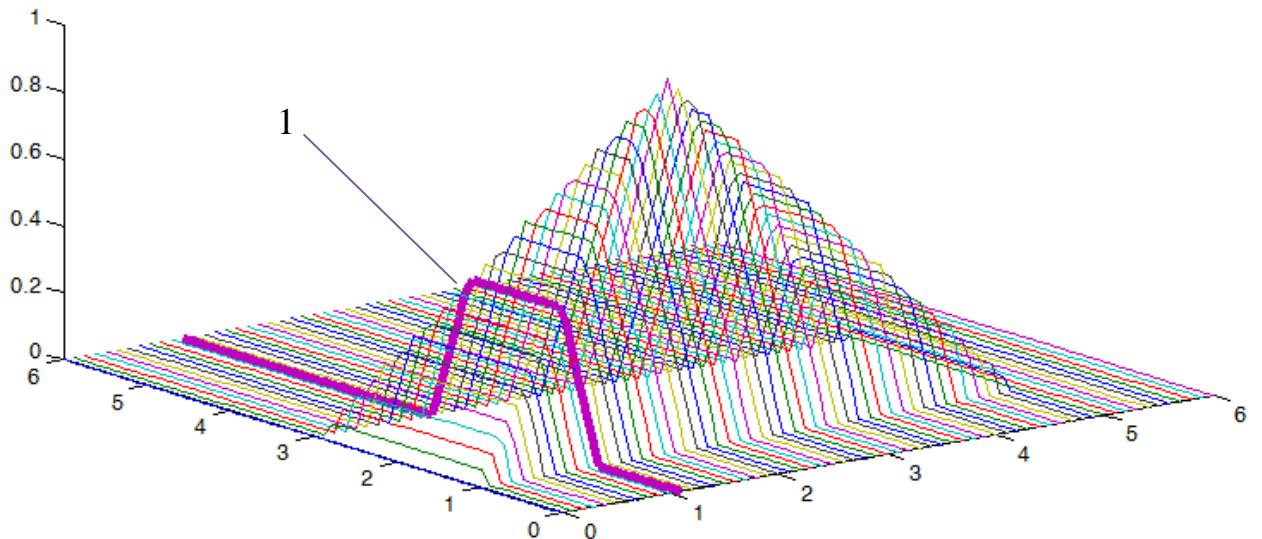


Рисунок 1.23 - Решение нечеткой импликации

1.5 Дефазификация

Переход от нечеткого логического вывода B к физической величине производится с помощью операции дефазификации (dfz) и осуществляется одним из нижеприведенных методов.

а) Дефазификация методом центра тяжести (cog).

$$z_{cog}(B) = \frac{\int \mu_B(z) \cdot z dz}{\int \mu_B(z) dz} \quad \text{непрерывный случай, (рис.1.24а)}$$

$$z_{cog}(B) = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_B(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N \mu_B(z_i)} \quad \text{дискретный случай, (рис.1.24б)} \quad (1.28)$$

$$z_{jcog}(B) = \frac{\int \mu_B(z_1 \dots z_n) \cdot z_j dz_1 \dots dz_n}{\int \mu_B(z_1 \dots z_n) dz_1 \dots dz_n} \quad \text{- } n\text{-мерный случай,}$$

где N - число разбиений при дискретизации, z - произведение пространств.

б) Дефазификация методом центра области (соа).

Для многомерного двумерного случая:

$$\begin{aligned}
z_{1coa}(B) &= \int_{\inf z_2}^{\sup z_2} \int_{\inf z_1}^{z_{1coa}(B)} \mu_B(z_1, z_2) dz_1 dz_2 = \int_{\inf z_2}^{\sup z_2} \int_{z_{1coa}(B)}^{\sup z_1} \mu_B(z_1, z_2) dz_1 dz_2 , \\
z_{2coa}(B) &= \int_{\inf z_2}^{z_{2coa}(B)} \int_{\inf z_1}^{\sup z_1} \mu_B(z_1, z_2) dz_1 dz_2 = \int_{z_{2coa}(B)}^{\sup z_2} \int_{\inf z_2}^{\sup z_1} \mu_B(z_1, z_2) dz_1 dz_2 .
\end{aligned} \tag{1.29}$$

В частности, для случая (1.25):

$$z_{coa}(B) = \int_{\inf z}^{z_{coa}(B)} \mu_B(z) dz = \int_{z_{coa}(B)}^{\sup z} \mu_B(z) dz \quad (\text{рис.2.8в}) \tag{1.30}$$

в) Дефазификация методом среднего максимума (mom).

Данный метод имеет фильтрующие свойства, т.к. теряется большой объем информации за счёт применения α -разреза по высоте множества B .

$$z_{mom}(B) = \text{cog}\{B \cap C\}, \quad C = \alpha - \text{cut}B|_{\alpha=\text{hgt}B} \quad (\text{рис.1.24г}), \tag{1.31}$$

где С - сечение множества В.

При сочетании с методами соди соа:

$$z_{mom}(B) = \text{cog}\{B \cap C\} = \text{icog}\{B, \text{hgt}B\} = \text{icoa}\{B, \text{hgt}B\} .$$

г) Дефазификация индексными методами (idfz).

Данные методы обладают фильтрующими свойствами и сочетаются с методами соди соа. α -разрез обычно задан и $\alpha = \beta_t$. В практических задачах $\beta_t = 0,5$.

$$\begin{aligned}
z_{idfz}(B, \beta_t) &= \text{cog}\{B \cap C_{\beta_t}\}, \quad C_{\beta_t} = \alpha - \text{cut}B|_{\alpha=\beta_t} \\
z_{idfz}(B, \beta_t) &= \text{coa}\{B \cap C_{\beta_t}\}, \quad C_{\beta_t} = \alpha - \text{cut}B|_{\alpha=\beta_t} \quad (\text{рис.1.24д})
\end{aligned} \tag{1.32}$$

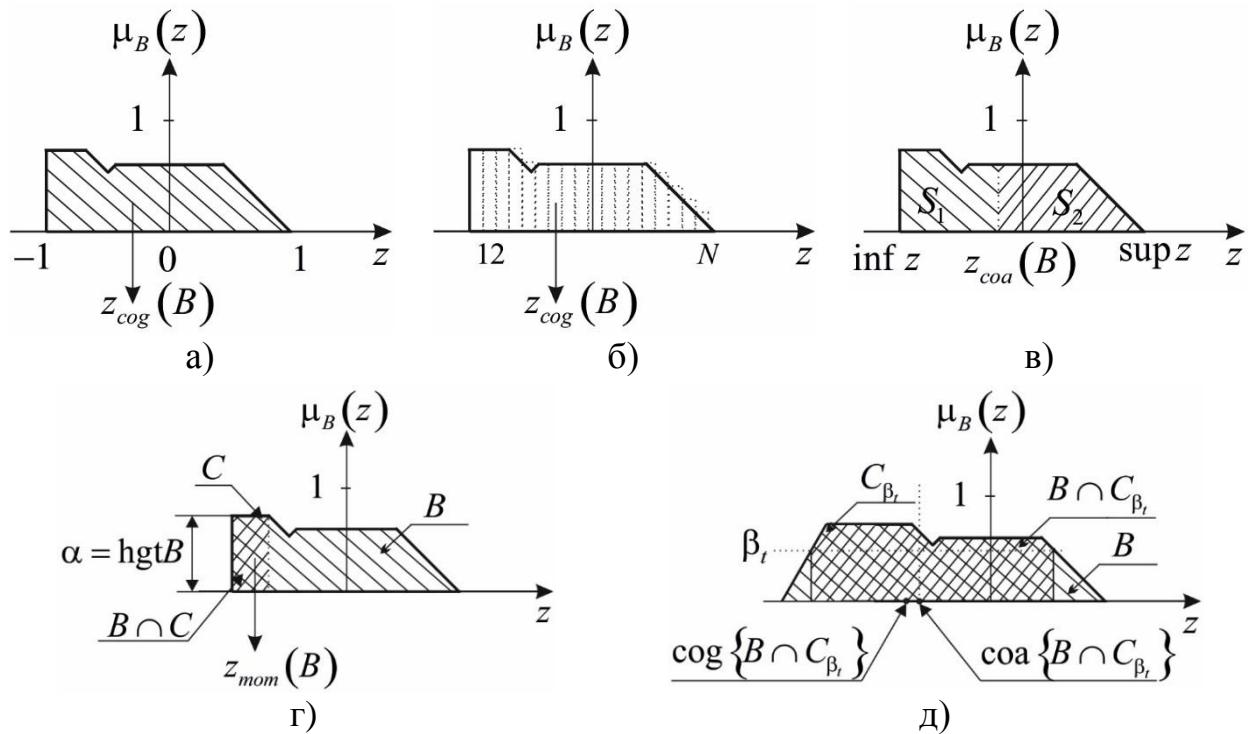


Рисунок 1.24 – Графическое представление методов дефазификации:
а) непрерывный метод cog, б) дискретный метод cog, в) метод соа, г)
метод том, д) индексный метод общего вывода, приведенного на
рис.1.18

Таблица 5 - Результаты при использовании различных методов дефазификации

Название метода		$dfzB$	$idfz(B, \beta_t = 0,5)$
центра тяжести (cog)	непрерывный	$4\frac{4}{9}$	$4\frac{4}{29}$
	дискретный	$4\frac{4}{9}$	4
центра области (коа)		$4\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{16}$
среднего максимума (том)		$3\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$

Сравнение численных значений при использовании различных методов дефазификации при решении задачи «приблизительно число 5» приведено в табл.5. Как видно из табличных значений, наиболее точен метод центра тяжести (cog), однако, при необходимости фильтрации случайных возмущений, наиболее предпочтителен метод среднего максимума (tom).

Рассмотрим методы дефазификации в пакете имитационного моделирования MatLab.

Пусть даны функции принадлежности, приведенные на рис.1.25.

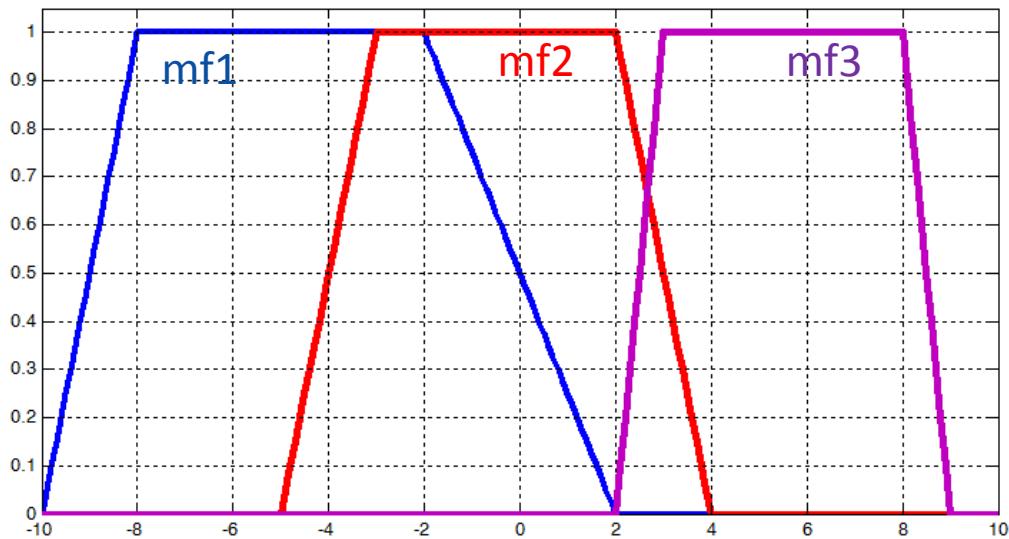


Рисунок 1.25 – Заданные функции принадлежности

Построим нечеткую импликацию (рис.1.26):

```
>> x = -10:0.1:10;
mf1 = trapmf(x,[-10 -8 -2 2]);
mf2 = trapmf(x,[-5 -3 2 4]);
mf3 = trapmf(x,[2 3 8 9]);
mf1 = max(0.5*mf2,max(0.9*mf1,0.1*mf3));
figure('Tag','defuzz');
plot(x,mf1,'LineWidth',3);
h_gca = gca;
h_gca.YTick = [0 .5 1];
ylim([-1 1]);
```

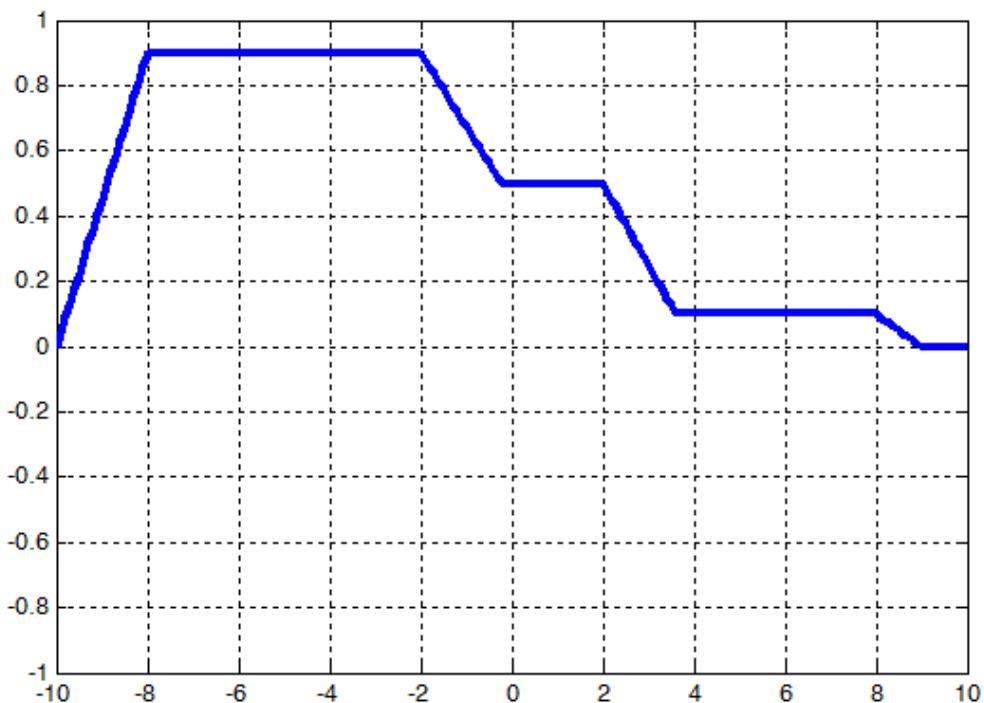


Рисунок 1.26 – Решение нечеткой импликации

Проведем дефаззификацию методами

а) методом центра тяжести (cog)

```
>> x1 = defuzz(x,mf1,'centroid');
h1 = line([x1 x1],[-0.2 1.2],'Color','k');
t1 = text(x1,-0.2,'cog','FontWeight','bold');
```

б) методом центра области (coa)

```
>> x2 = defuzz(x,mf1,'bisector');
gray = 0.7*[1 1 1];
h1.Color = gray;
t1.Color = gray;
h2 = line([x2 x2],[-0.4 1.2],'Color','k');
t2 = text(x2,-0.4,'coa','FontWeight','bold');
```

в) методом среднего максимума (mom)

```
>> x3 = defuzz(x,mf1,'mom')  
h2.Color = gray;  
t2.Color = gray;  
h3 = line([x3 x3],[-0.7 1.2],'Color','k');  
t3 = text(x3,-0.7,'mom','FontWeight','bold');
```

Выведем решение на график.

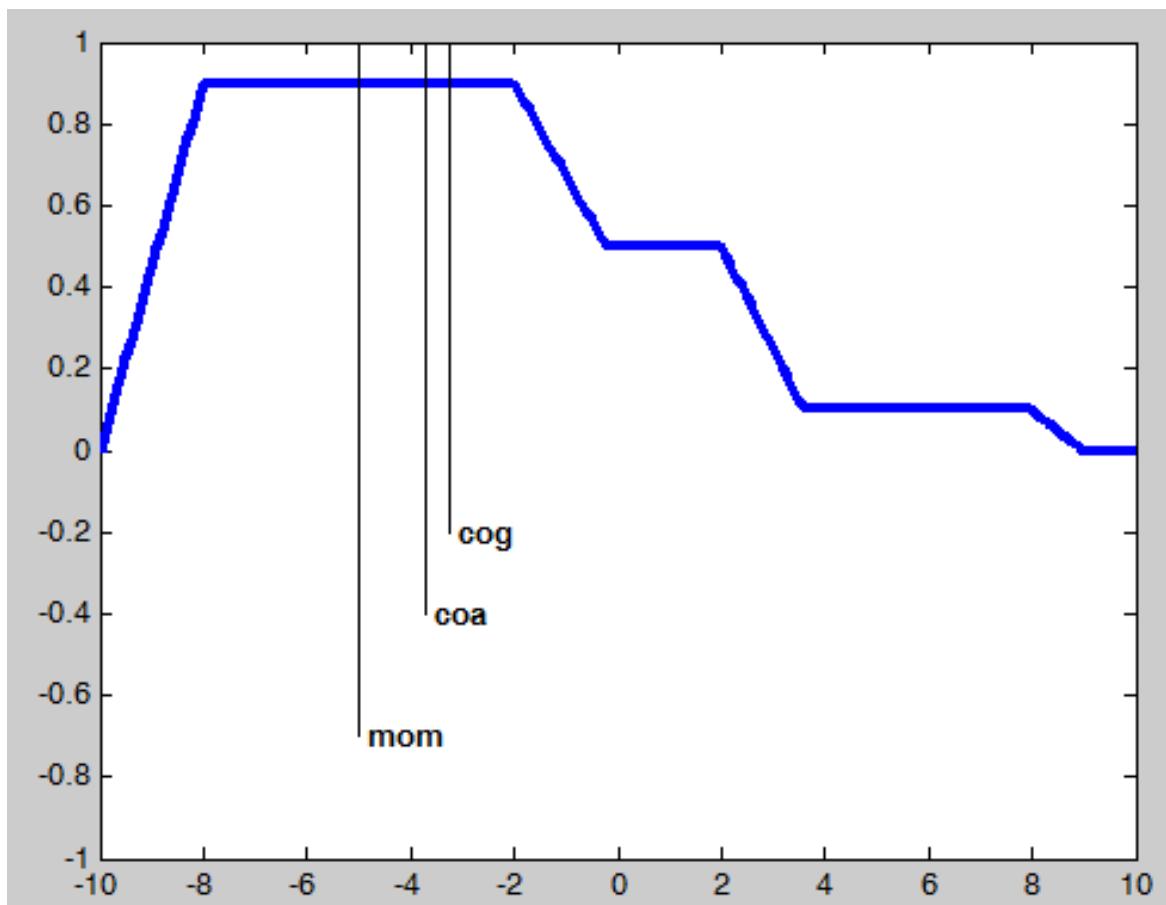


Рисунок 1.27 – Графическое изображение дефазификации

2 Принцип построения регулятора с нечеткой логикой

Ядром любого регулятора с нечеткой логикой (РНЛ) является блок с нечеткой логикой (БНЛ), в котором происходят процессы фазификации и дефазификации.

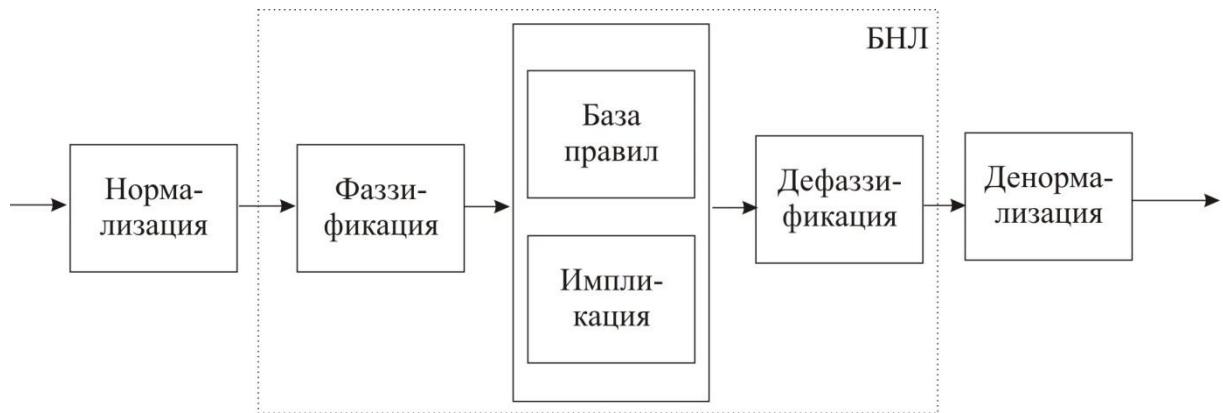


Рисунок 2.1 – Структурная схема регулятора с нечеткой логикой

Алгоритм функционирования БНЛ возможно представить, как модель в виде «вход-выход» на рис.2.2 и описать системой уравнений (2.1). Переход из пространства физических переменных в нечеткие осуществляется с помощью операции фазификации (fuzz) и определяется типом задания нечетких функций принадлежности (в виде треугольников, трапеций, колоколообразных и т.д.). Обратный переход к физическим переменным выполняется операцией дефазификации (dfz) и производится методами центра тяжести (cog), центра области (coa), среднего максимума (mom) и т.д.

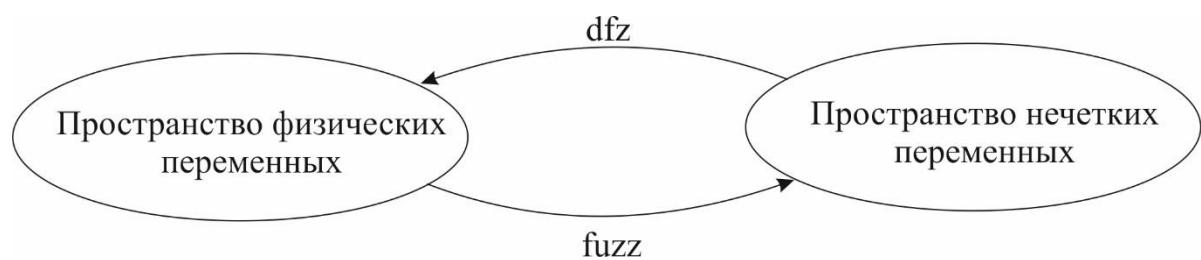


Рисунок 2.2 – Схема преобразования переменных в нечетком регуляторе

$$\begin{aligned} \{R_i\}_{i=1}^k = & \begin{cases} R_1 : A_1 \circ r_1 = A_1 \circ (A_{11} \rightarrow A_{21}) = B_1; \\ R_2 : A_2 \circ r_2 = A_2 \circ (A_{12} \rightarrow A_{22}) = B_2; \\ \vdots \\ R_k : A_k \circ r_k = A_k \circ (A_{1k} \rightarrow A_{2k}) = B_k; \end{cases} \\ A_i (i = \overline{1, k}) &= \text{fuzz}(x_i), A_{jl} = \text{fuzz}(x_j, x_l); \quad , \\ B = \bigcup_{i=1}^k B_i, \quad z &= \text{dfz}B \end{aligned} \quad (2.1)$$

где R_i - правило, $\{R_i\}_{i=1}^k$ - база правил, \circ - композиция нечетких отношений, \rightarrow - нечеткая импликация, $B_i (i = \overline{1, k})$ - локальный вывод, B - общий вывод, fuzz - операция фазификации, dfz - операция дефазификации.

Там образом, БНЛ (рис.2.1) включает в себя три основных блока: блок фазификации, блок формирования логического решения, блок деффазификации. В блоке формирователя логического решения происходит обработка нечетких множеств, выходной сигнал блока определяется способами задания нечеткой импликации и композиции.

Входной вектор E и выходной вектор Y БНЛ определяются на основе выражения (2.2):

$$\begin{aligned} E &= \left\{ \left(\varepsilon_i, L_i, \left\{ T_{\varepsilon_i}^1, T_{\varepsilon_i}^2, \dots, T_{\varepsilon_i}^{k_i} \right\}, \left\{ \mu_{\varepsilon_i}^1, \mu_{\varepsilon_i}^2, \dots, \mu_{\varepsilon_i}^{k_i} \right\} \right) \right|_{i=\overline{1, n}} \right\}; \\ Y &= \left\{ \left(u_i, V_i, \left\{ T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{k_i} \right\}, \left\{ \mu_{y_i}^1, \mu_{y_i}^2, \dots, \mu_{y_i}^{k_i} \right\} \right) \right|_{i=\overline{1, m}} \right\}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где ε_i - входные переменные, L_i - нечеткое лингвистическое множество входов $L = L_1 \times L_2 \times \dots \times L_n$, y_i - выходные переменные, V_i - нечеткое лингвистическое множество выходов $V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_m$, $T(\varepsilon_i) = \{T_{\varepsilon_i}^1, T_{\varepsilon_i}^2, \dots, T_{\varepsilon_i}^{k_i}\}$, $T(y_i) = \{T_{y_i}^1, T_{y_i}^2, \dots, T_{y_i}^{k_i}\}$ - множество термов входной и выходной величин соответственно.

Степень детализации объекта зависит от количества термов (разбиений на подмножества). Декомпозиция очень важна и влияет на производительность контроллера в реальных устройствах управления. На рис.2.3 показана грубая нечеткая декомпозиция с 3 термами и тремя нечеткими подмножествами (рис.2.3а) и более детальная (рис.2.3б) с семью подмножествами.

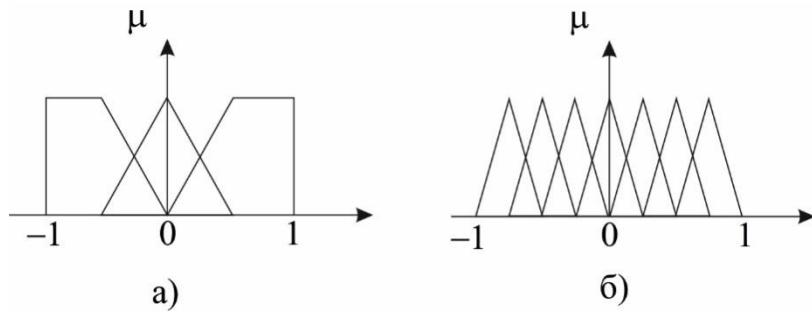


Рисунок 2.3 – Нечеткая декомпозиция а) грубая, б) детальная

Формирователь логического решения и процедура дефазификации описаны в п.1 данного пособия

В блоке нормализации РНЛ происходит обработка четких данных, полученных от измерительного оборудования (датчиков обратных связей) для дальнейшего их лингвистического описания. Примерами нормализации (предварительной обработки) могут являться:

- квантование по уровню;
- нормализация или масштабирование в конкретном стандартном диапазоне;
- фильтрация для устранения шума;
- усреднение сигнала;
- дифференциация и интеграция, или их приближения в дискретное время.

В блоке денормализации РНЛ происходит масштабирование выходного дефазифицированного сигнала в инженерные единицы - вольты, метры и т.д. Примером такого масштабирования может служить перевод из единиц множества $[-1, 1]$ в физические единицы $[-10, 10]$ Вольт.

Процедуры фазификации, композиции базы правил, импликации, дефазификации в комплексе являются алгоритмом **Мамдани**.

Если при импликации выходным сигналом лингвистического решения является не лингвистическое решение в виде нечетких функций, а конкретное число или линейная функция, то такой алгоритм называется алгоритмом **Такаги-Сугено**, иногда называемый просто алгоритмом **Сугено**.

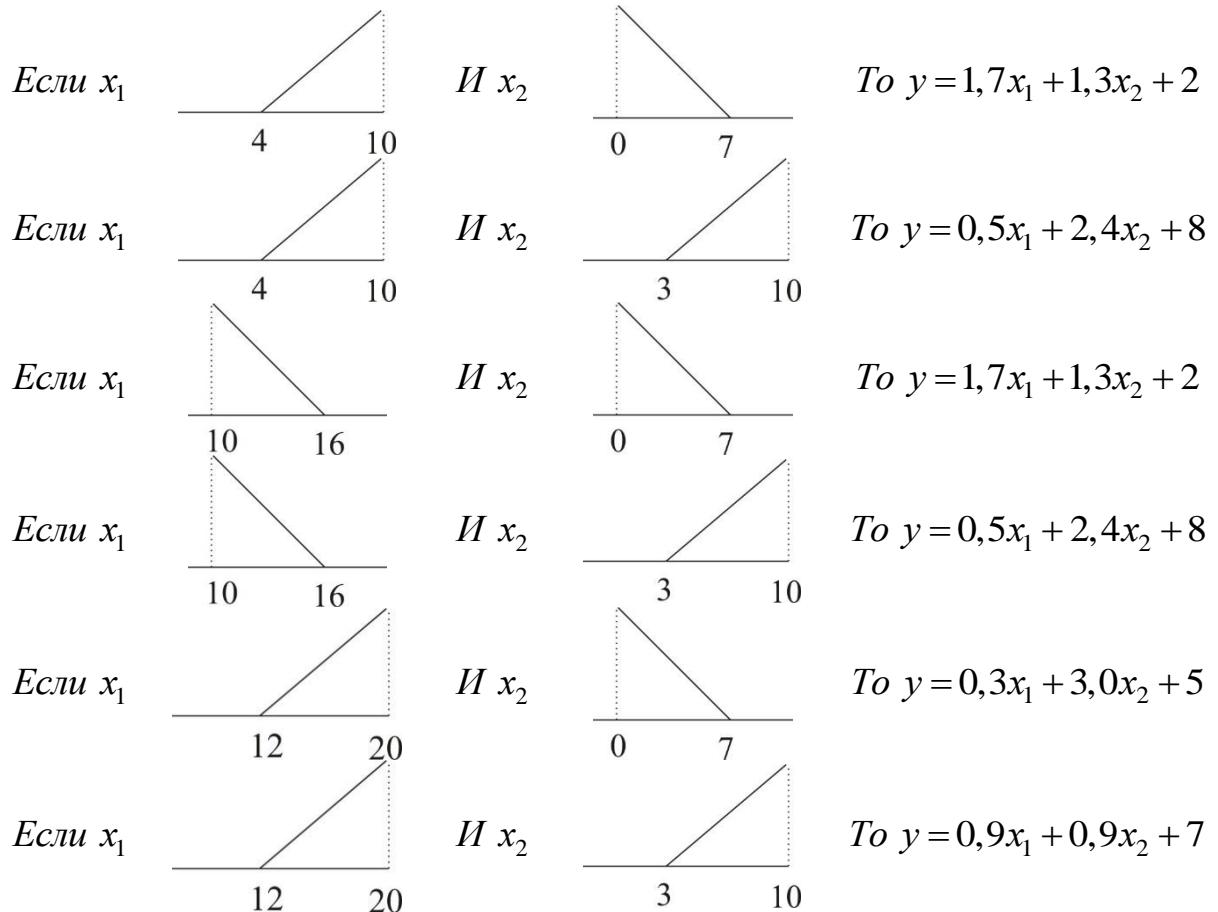
Можно представить структуру правил и импликации алгоритма Сугено в виде (2.3):

$$\text{ЕСЛИ } f(e_1 \text{ is } A_1, e_2 \text{ is } A_2, \dots, e_k \text{ is } A_k), \text{ ТО } y = g(e_1, e_2, \dots, e_k) \quad (2.3)$$

Например:

ЕСЛИ x_1 Положительное и x_2 Положительное, ТО $y = c$, где y - сигнал управления, а c - положительное вещественное число.

Пример 1: Алгоритм базы правил Сугено



Структурная схема системы управления с РНЛ представлена на рис.2.4, где f_1 - внешний сигнал шумовых помех, f_2 - помехи сигнала управления, u - сигнал управления, y - выходной сигнал, g - входной сигнал.

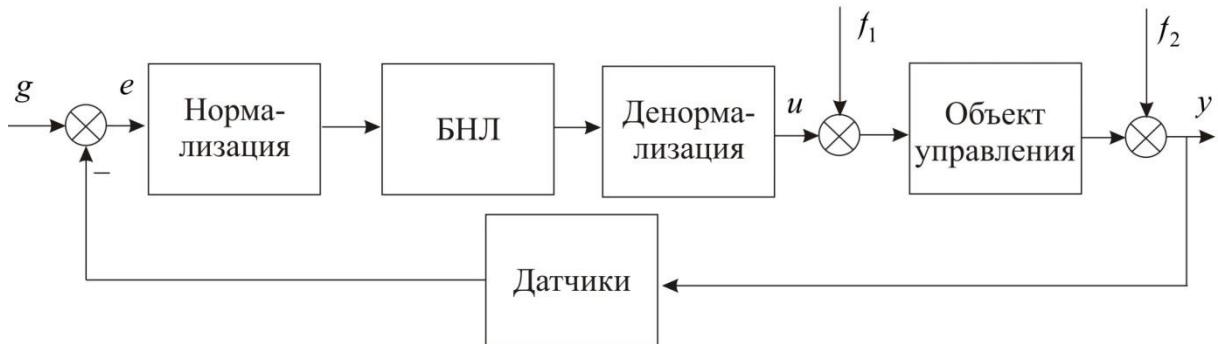


Рисунок 2.4 – Структурная схема системы управления с РНЛ

Для обеспечения стабилизации выходного сигнала специалисты используют две выходных переменных – ошибку и скорость изменения ошибки (формула (2.4)). Структурная схема такой системы представлена на рис.2.5.

$$e(n) = g - y; \\ \frac{de(n)}{dt} = e(n) - e(n-1). \quad (2.4)$$

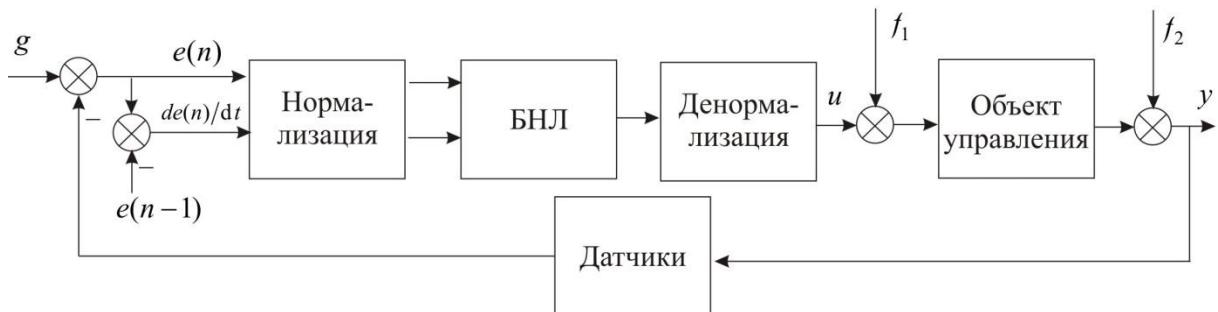


Рисунок 2.5 – Структурная схема системы управления с РНЛ с двумя входными сигналами

Задание 3.

Синтезируем базу правил для желаемого процесса поведения выходного сигнала при скачке задающего сигнала (рис.2.6).

Будем использовать следующие лингвистические переменные для сигналов управления, ошибки и изменения ошибки:

- negative big - **BN** - большое отрицательное
- negative - **N** - отрицательное
- positive - **P** - положительное
- positive big - **BP** - большое положительное
- zero - **Z** - ноль.

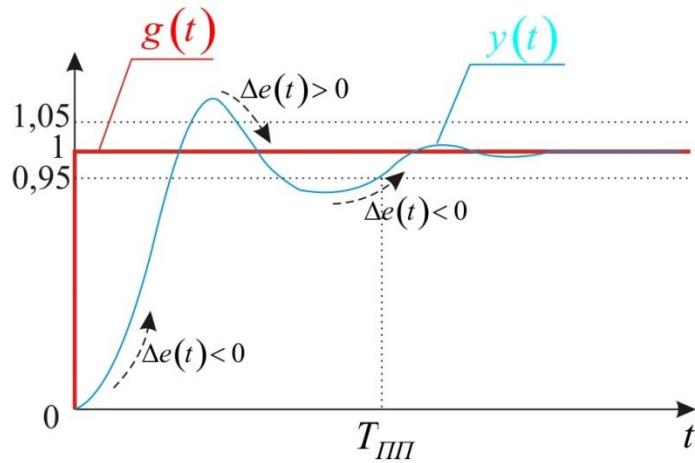


Рисунок 2.6 - Временные характеристики входного и желаемого выходного сигнала

В действительности, **ЕСЛИ** ошибка большая и отрицательная (**BN**) **И** изменение ошибки большое и отрицательное (**BN**), **ТО** необходимо подать большое отрицательно отрицательное (**BN**) управление на объект управления.

Данные лингвистические высказывания сводят в таблицу, вид которой приведен на рис. 2.7, где μ_e и $\mu_{\Delta e}$ - сигналы ошибки и изменения ошибки после нормализации.

$\mu_{\Delta e} \backslash \mu_e$	BN	N	Z	P	BP
BN	BN	BN	N	N	Z
N	BN	N	N	Z	P
Z	N	N	Z	P	P
P	N	Z	P	P	BP
BP	Z	P	P	BP	BP

Рисунок 2.7 - База правил регулятора с двумя входными сигналами

После синтеза базы правил и синтеза функций принадлежности (в нашем примере - треугольные функции принадлежности) мы можем посмотреть с помощью программы MatLab механизм синтеза общего вывода (рис.2.8) и поверхность РНЛ (рис.2.9).

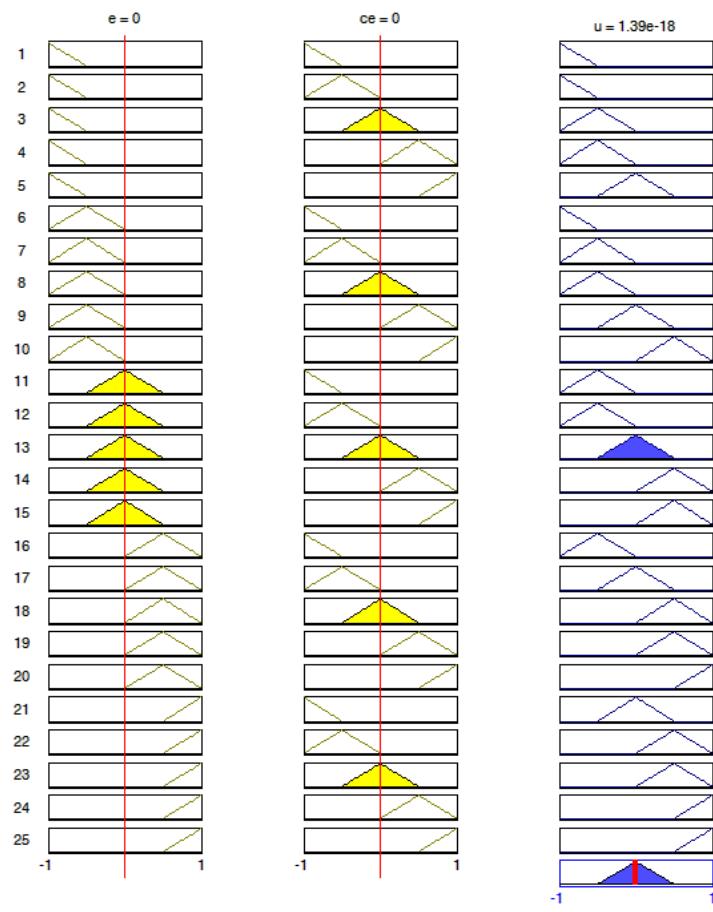


Рисунок 2.8 - Поиск общего вывода

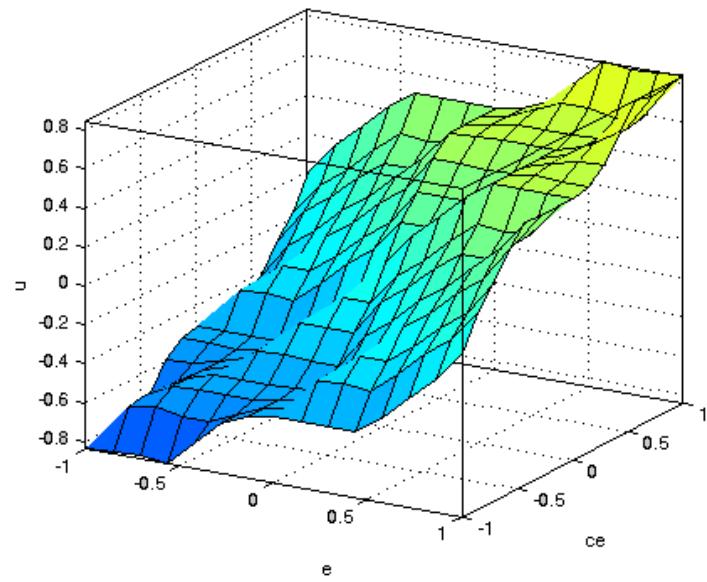


Рисунок 2.9 - Поверхность синтезированного РНЛ

3 Синтез регуляторов с нечеткой логикой с различной структурой

Классификация регуляторов с нечеткой логикой приведена на рис.3.1. РНЛ классифицируются по структуре: с одним (сигнал ошибки), двумя (сигналы ошибки и изменения ошибки) или тремя (сигналы ошибки, ее изменения и дифференциал) входными сигналами, гибридный РНЛ и адаптивный РНЛ; а также, классифицируются по методу настройки коэффициентов блоков нормализации и денормализации: нейро-нечеткий регулятор (настройка коэффициентов проводится обучением нейронной сети) и РНЛ с применением эволюционных алгоритмов, в частности, генетического алгоритма.



Рассмотрим основные типы реализации РНЛ. В дальнейших пунктах будем рассматривать структуру только РНЛ (блок РНЛ на рис.3.2).

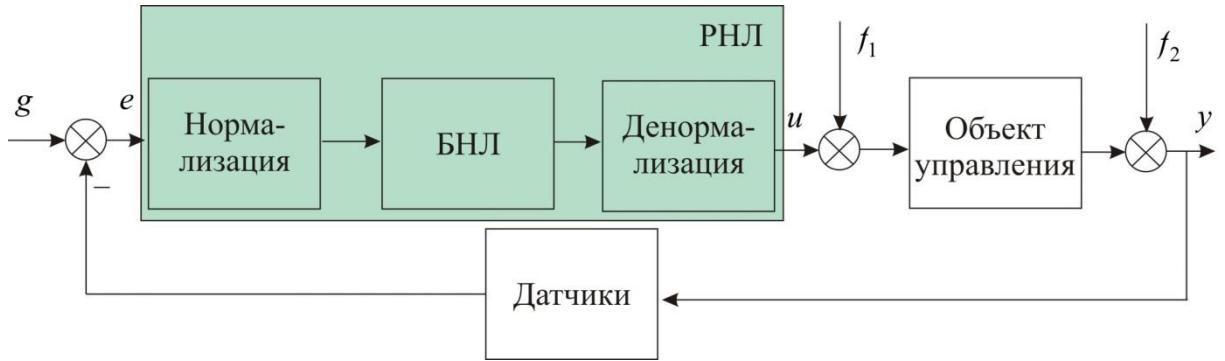


Рисунок 3.2. Структурная схема системы управления с РНЛ

Во всех дальнейших структурных схемах: e – сигнал ошибки (малые прописные буквы), E – сигнал ошибки после нормировки (заглавные буквы), U – сигнал управления до денормирования, u – сигнал управления (выхода РНЛ),

3.1 Регулятор с нечеткой логикой с одним входным сигналом

П-подобный РНЛ с один входом

Структурная схема РНЛ с один входным сигналом - ошибки - представлена на рис.3.3. Такой тип РНЛ называют П-подобным РНЛ.

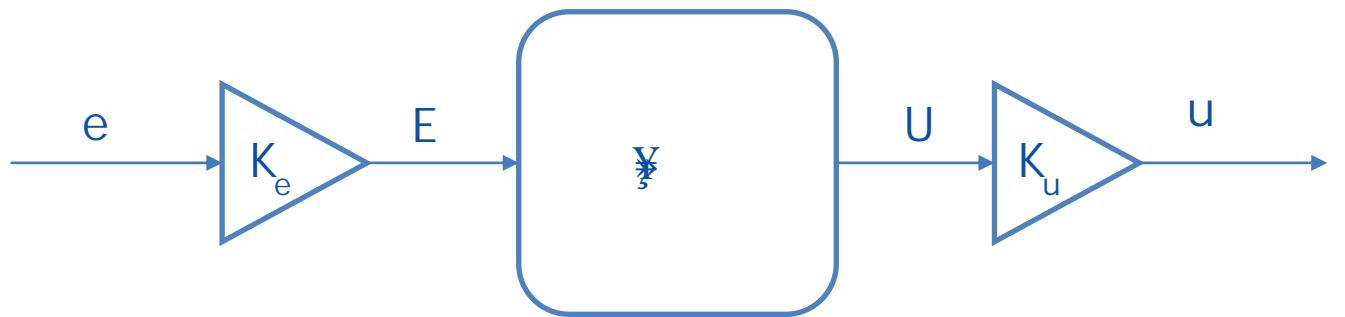


Рисунок 3.3. Структурная схема П-подобного РНЛ с одним входом

П-подобный РНЛ имеет два коэффициента - K_e и K_u , которые связаны с сигналами ошибки и управления $E = K_e * e$ и $u = U * K_u$.

Сигнал управления в моменты времени n является нелинейной функцией от входа, если обозначить f как функцию БНЛ, то

$$u(n) = f(K_e * e(n)) * K_u \quad (3.1)$$

Функция f обозначает отображение базы правил БНЛ. Сделаем допущение, что база правил выбрана так, что БНЛ является линейной функцией, тогда

$$f(K_e * e(n)) \approx K_e * e(n) \quad (3.2)$$

Подставляя (3.2) в (3.1.) получаем

$$u(n) = K_e * e(n) * K_u = K_e \cdot K_u * e(n) \quad (3.3)$$

Получаем, что коэффициент усиления для линеаризованного РНЛ равен K_p :

$$K_p = K_e \cdot K_u \quad (3.4)$$

ПИД-подобный РНЛ с один входом

Структурная схема цифрового ПИД-подобного РНЛ с один входным сигналом - ошибки - представлена на рис.3.4. Для его анализа прибегают к линеаризации функции базы правил.

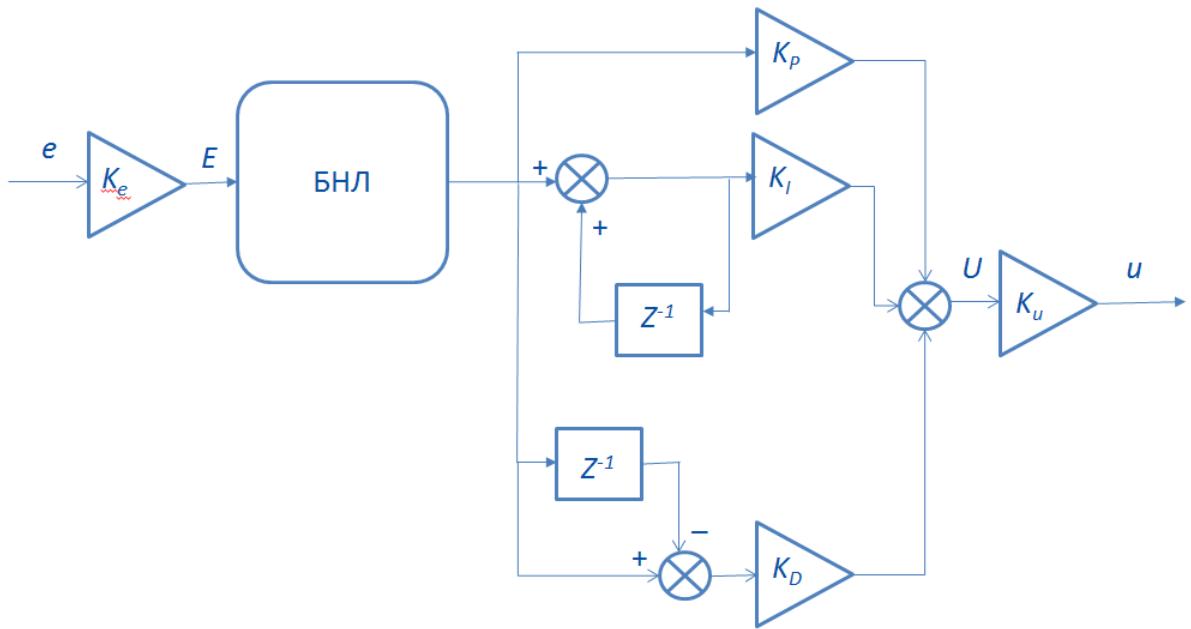


Рисунок 3.4. Структурная схема ПИД-подобного РНЛ с одним входом

3.2 Регулятор с нечеткой логикой с двумя входными сигналами

ПД-подобный РНЛ с двумя входами

Структурная схема ПД-подобного РНЛ приведена на рис.3.5. Входными сигналами являются сигнал ошибки и изменение ошибки.

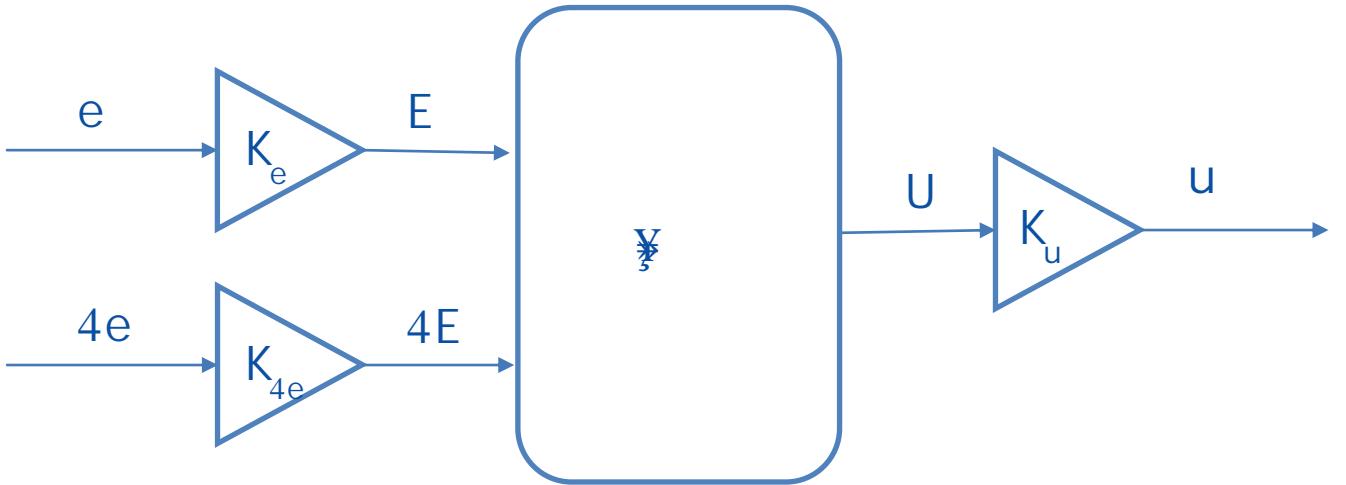


Рисунок 3.5. Структурная схема ПД-подобного РНЛ с двумя входами

Сигнал управления может быть представлен как

$$u(n) = f(K_e * e(n), K_{\Delta e} * \Delta e(n)) * K_u \quad (3.5)$$

При допущении, что база правил линейна

$$f(K_e * e(n), K_{\Delta e} * \Delta e(n)) \approx K_e * e(n) + K_{\Delta e} * \Delta e(n) \quad (3.6)$$

получаем

$$\begin{aligned} u(n) &= (K_e * e(n) + K_{\Delta e} * \Delta e(n)) * K_u = \\ &= K_e \cdot K_u \cdot \left(e(n) + \frac{K_{\Delta e}}{K_e} \Delta e(n) \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Отсюда получаем значения пропорционального и дифференциального коэффициентов ПД-подобного РНЛ:

$$K_p = K_e \cdot K_u \quad (3.8)$$

$$T_d = \frac{K_{\Delta e}}{K_e} \quad (3.9)$$

Как и в традиционном регуляторе - благодаря Д-составляющей РНЛ может быть чувствителен к шумовым помехам, а также к резкому изменению сигнала ошибки.

ПИ-подобный РНЛ с двумя входами

Наиболее распространен в практике ПИ-подобный РНЛ (рис.3.6), в отличии от ПД-подобного РНЛ, в котором присутствует постоянная ошибка. Однако, время переходного процесса, в связи с наличием интегральной составляющей больше, чем в ПД-регуляторе.

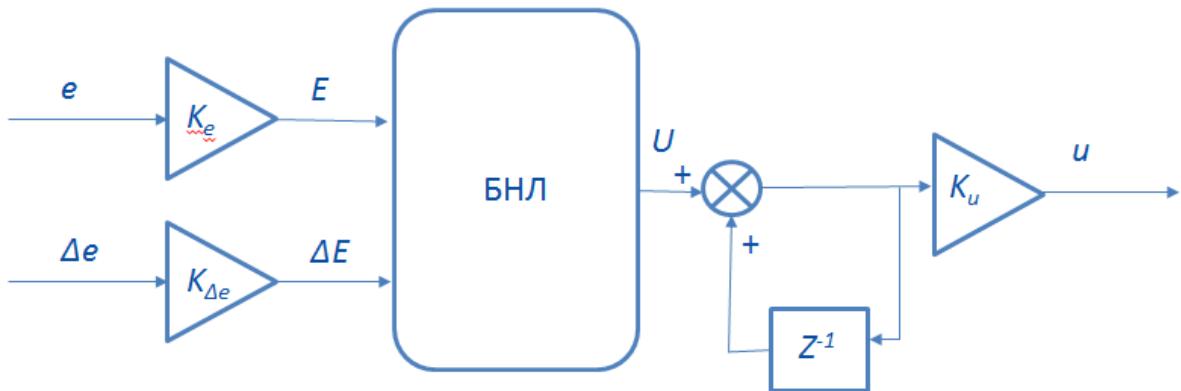


Рисунок 3.6. Структурная схема ПИ-подобного РНЛ с двумя входами

ПИД-подобный РНЛ с двумя входами

Простейший способ синтеза ПИД-подобного РНЛ - объединение ПД-подобного РНЛ с блоком интегрирования на выходе. Данный ПИД-подобный РНЛ, приведенный на рис.3.7 имеет меньшее количество правил и коэффициентов по сравнению с РНЛ, приведенным на рис.3.8.

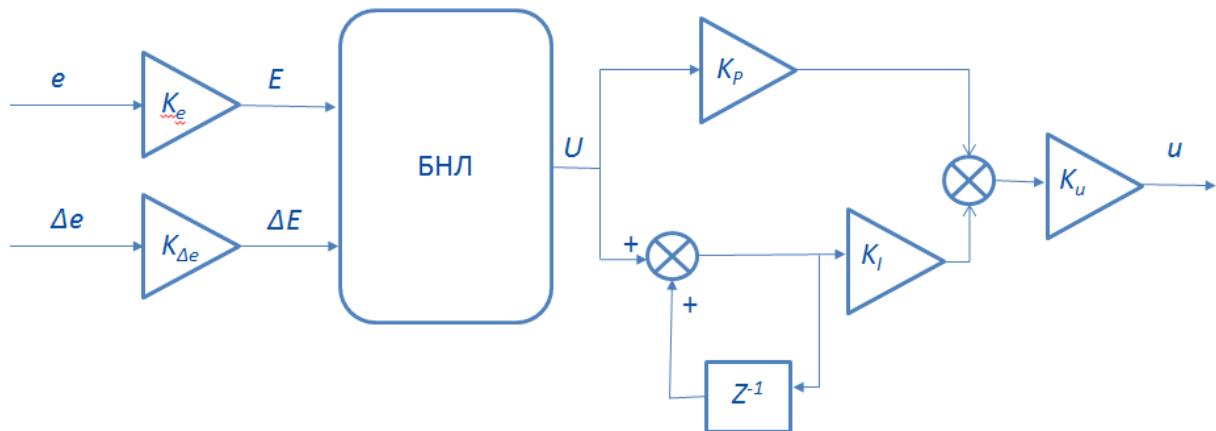


Рисунок 3.7. Структурная схема ПИД-подобного РНЛ с двумя входами

ПИ - ПД -подобный РНЛ с двумя входами

РНЛ, приведенный на рис.3.8. совмещает в себе ПД- и ПИ-составляющие, однако необходимо синтезировать две базы правил, что может оказаться на скорости вычисления.

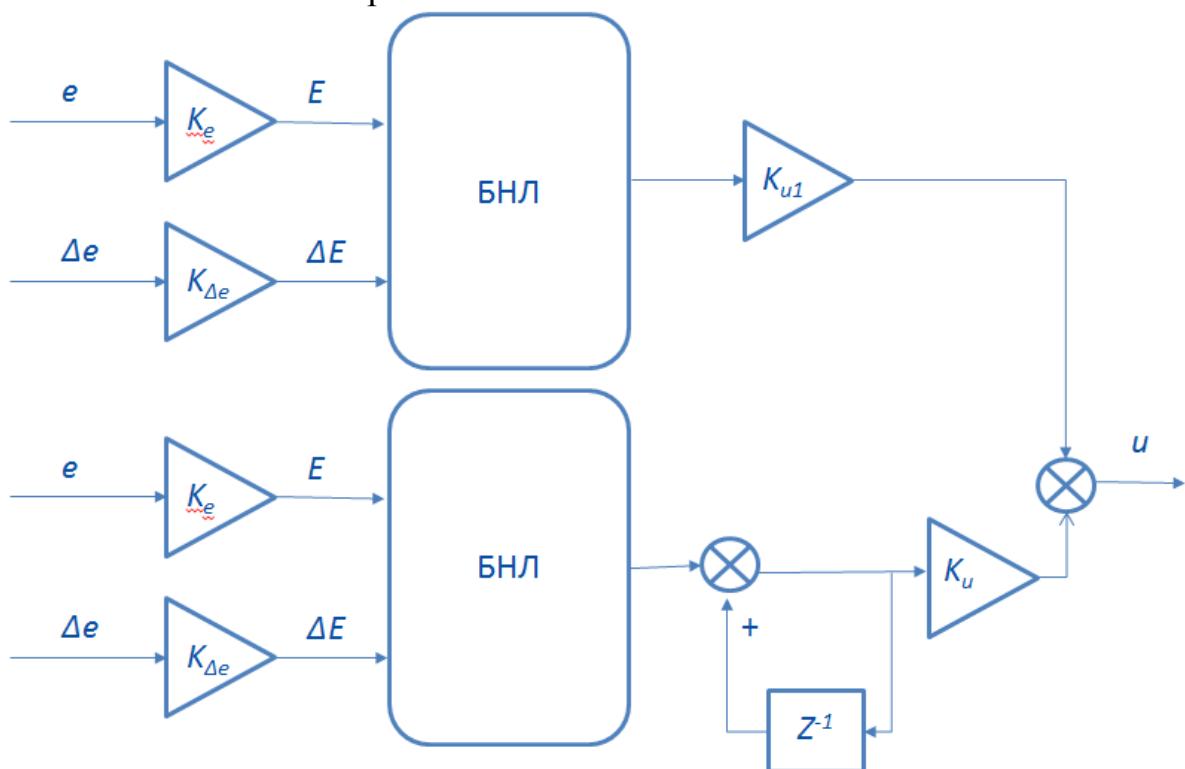


Рисунок 3.8. Структурная схема ПИ-ПД-подобного РНЛ с двумя входами

3.3 Регулятор с нечеткой логикой с тремя входными сигналами

РНЛ с тремя входным сигналами может быть реализован путем введения помимо ошибки и ее изменения - дифференциала ошибки на вход РНЛ. Такой тип регулятора (рис.3.9) требует построения 3D (трехмерной) базы правил.

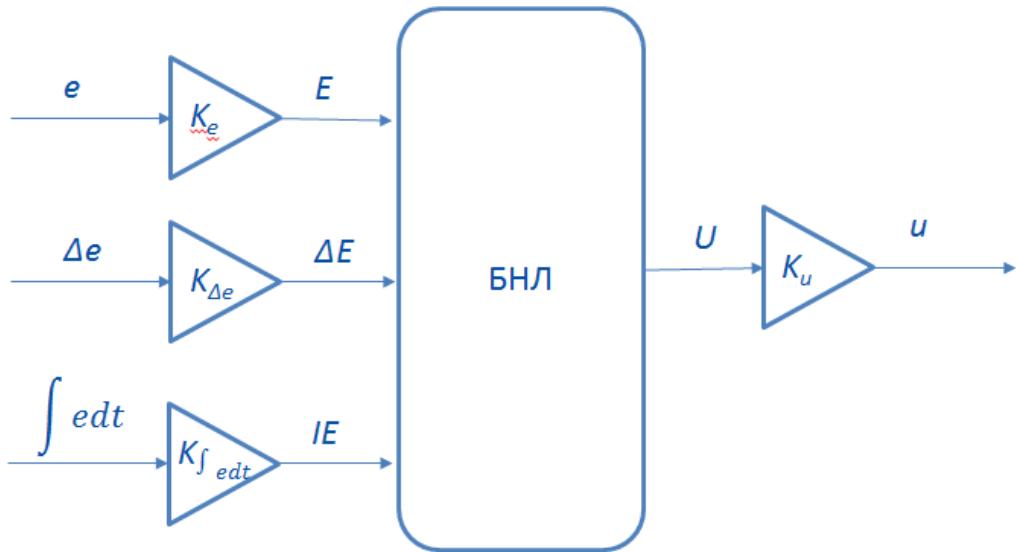


Рисунок 3.9. Структурная схема ПИД-подобного РНЛ с тремя входами

Для того, чтобы избежать синтеза 3D базы правил, ПИД-подобный РНЛ реализуют согласно схеме, приведенной на рис.3.10. Однако это не повышает производительность реальных систем с РНЛ.

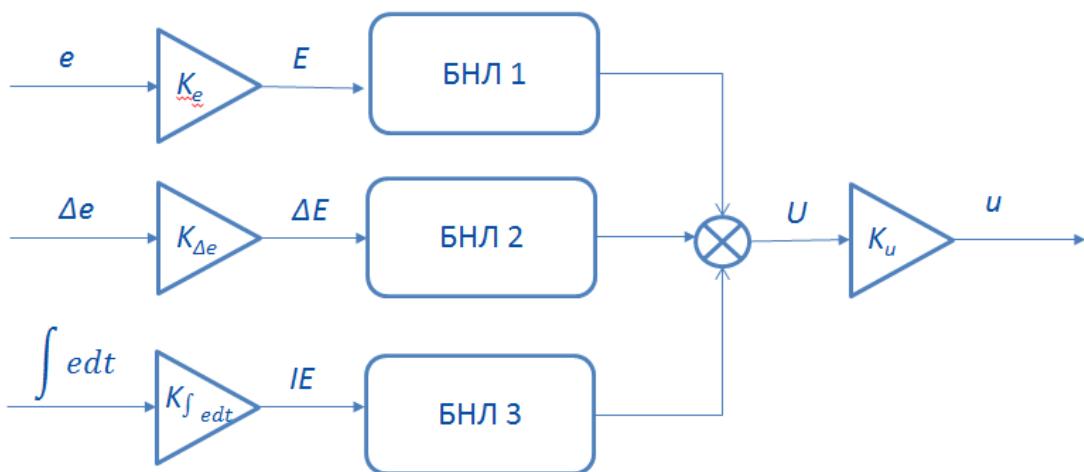


Рисунок 3.10. Структурная схема П-И-Д-подобного РНЛ с тремя входами

3.4 Гибридный регулятор с нечеткой логикой

Гибридный ПД-подобный РНЛ + И-регулятор

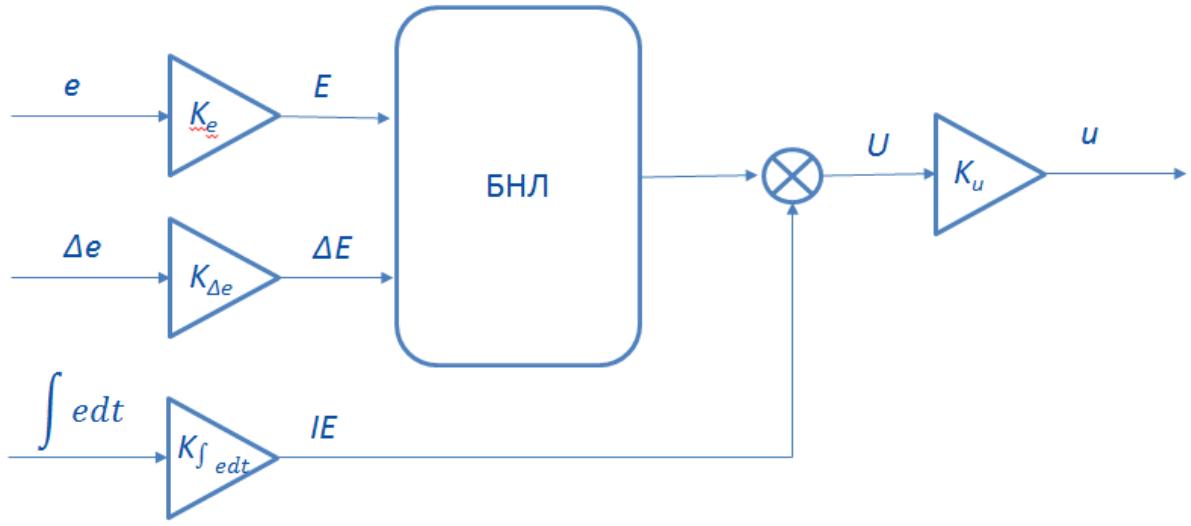


Рисунок 3.11. Структурная схема ПД-подобного РНЛ + И-регулятора

Интегральная ошибка ПД-подобный РНЛ + И-регулятора
 $IE = K_{\int edt} * \int edt$ пропорциональна сумме всех предыдущих ошибок, измеренных в дискретное время

$$\int edt \approx \sum_{j=1}^n e(j)T_s \quad (3.10)$$

Сигнал управления является нелинейной функцией ошибки, ее изменению и интегралу:

$$u(n) = \left[f(K_e * e(n), K_{\Delta e} * \Delta e(n)) + K_{\int edt} \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] * K_u \quad (3.11)$$

При допущении, что база правил линейна получаем

$$\begin{aligned} u(n) &\approx \left[K_e * e(n) + K_{\Delta e} * \Delta e(n) + K_{\int edt} \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] * K_u = \\ &= K_e \cdot K_u \cdot \left[e(n) + \frac{K_{\Delta e}}{K_e} * \Delta e(n) + \frac{K_{\int edt}}{K_e} \sum_{j=1}^n e(j)T_s \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

Отсюда получаем П-, И- и Д-составляющие данного регулятора:

$$K_p = K_e \cdot K_u \quad (3.13)$$

$$T_d = \frac{K_{\Delta e}}{K_e} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{T_i} = \frac{K_{\int e dt}}{K_e} \quad (3.15)$$

Гибридный ПИ-подобный РНЛ + ПИ-регулятор

На рис. 3.12 приведена еще одна схема гибридного РНЛ, он состоит из традиционного ПИ-регулятора и дополняющего ПИ-подобного РНЛ.

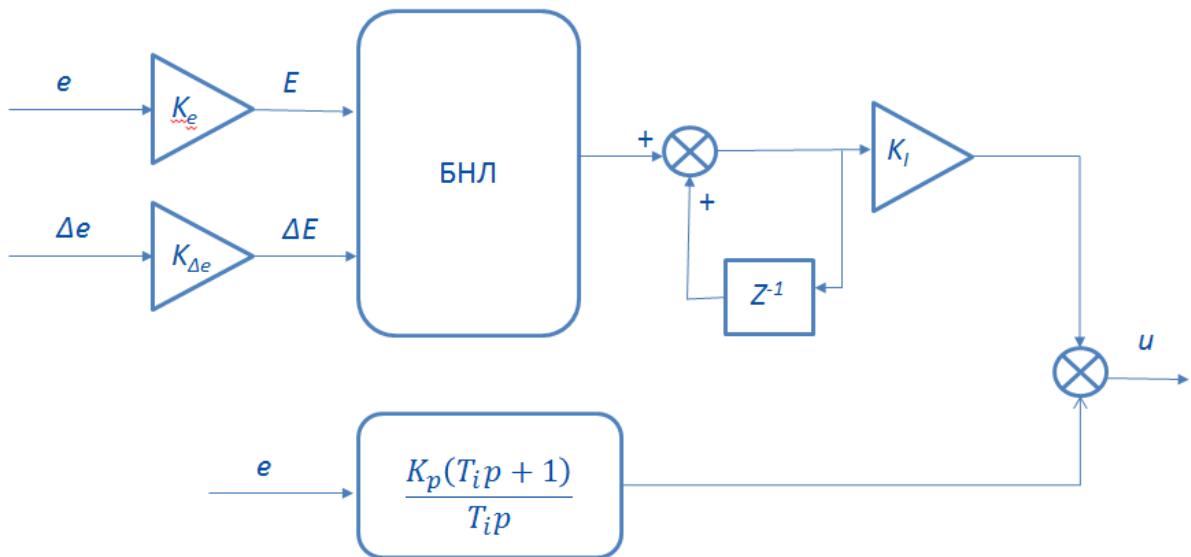


Рисунок 3.12. Структурная схема ПИ-подобного РНЛ + ПИ-регулятора

3.5 Адаптивный регулятор с нечеткой логикой

Типовая структурная схема традиционного адаптивного регулятора приведена на рис.3.13. Данный тип регуляторов применяется в системах с нелинейно изменяющимися возмущениями, или при изменении параметров самой системы с течением времени. Адаптивный регулятор имеет два контура – внутренний контур управления, являющийся основным, и внешний контур, являющийся построенным к основному.

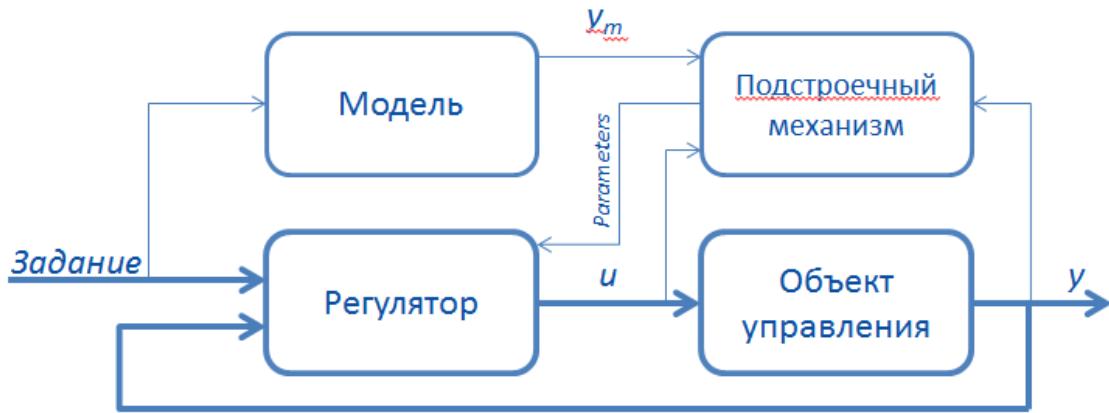


Рисунок 3.13. Структурная схема адаптивного регулятора

На рис.3.13 представлены следующие блоки:

Объект управления — мы предполагаем, что знаем математическую модель объекта управления, которая найдена посредством линеаризации нелинейной системы, однако параметры самого объекта могут изменяться с течением времени.

Модель — эталонная модель содержит в своей структуре желаемую динамику и желаемую модель процесса.

Регулятор — синтезированный регулятор во внутреннем контуре, настраивающий систему на желаемую динамику и точность.

Подстроочный механизм — является реализованным законом адаптации для минимизации ошибки в системе.

Структурная схема адаптивного РНЛ представлена на рис.3.14.

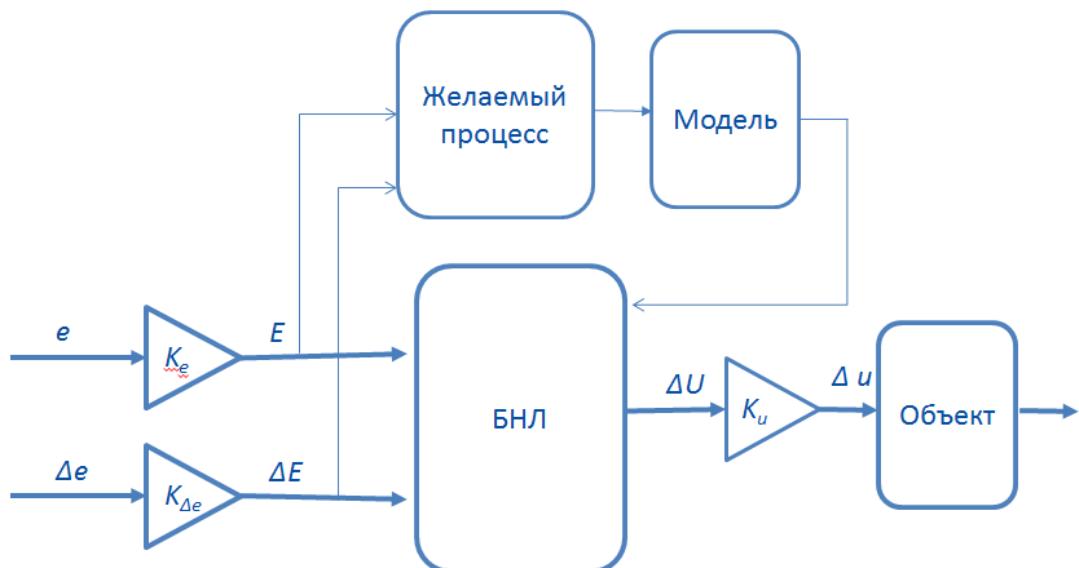


Рисунок 3.14. Структурная схема адаптивного РНЛ

На рис.3.14 приведены следующие блоки:

Желаемый процесс – в этом блоке задается желаемая динамика системы.

Модель – лингвистическое описание в виде правил переходного процесса в системе той же размерности, что и в БНЛ.

БНЛ – блок нечеткой логики с процедурами фазификации, импликации и дефазификации.

Другой схемой адаптивного РНЛ может служить структура, представленная на рис.3.15.

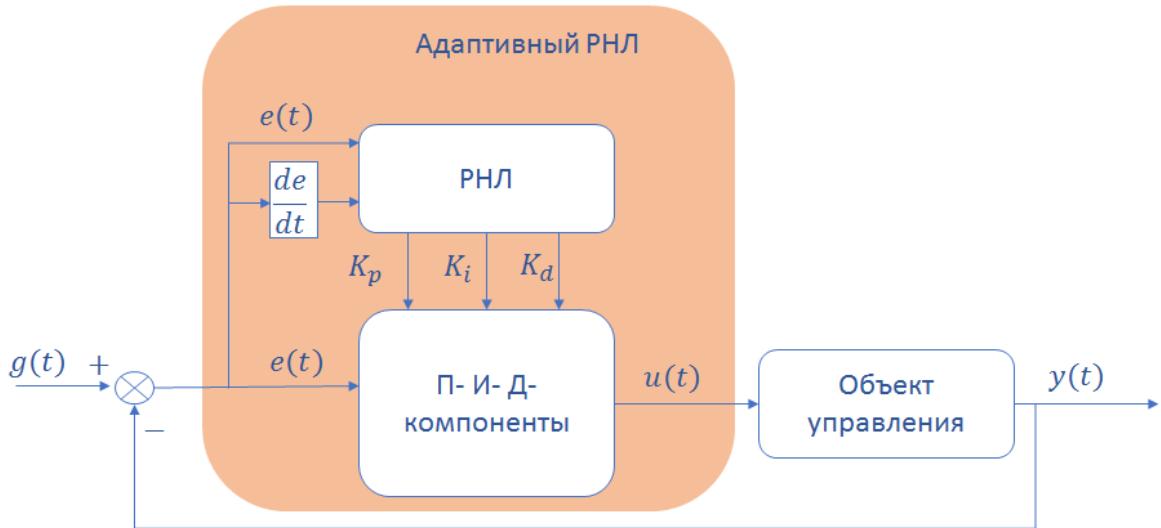


Рисунок 3.15. Структурная схема адаптивного РНЛ

Входными сигналами адаптивного РНЛ, представленного на рис.3.15, являются ошибка и ее изменение. Однако, благодаря тому, что выходными сигналами являются три составляющие - пропорциональная, интегральная и дифференциальная, необходимо синтезировать 3D базу правил.

К примеру, при функциях принадлежности, приведенных на рис.3.16, 3D база правил приведена на рис.3.17.

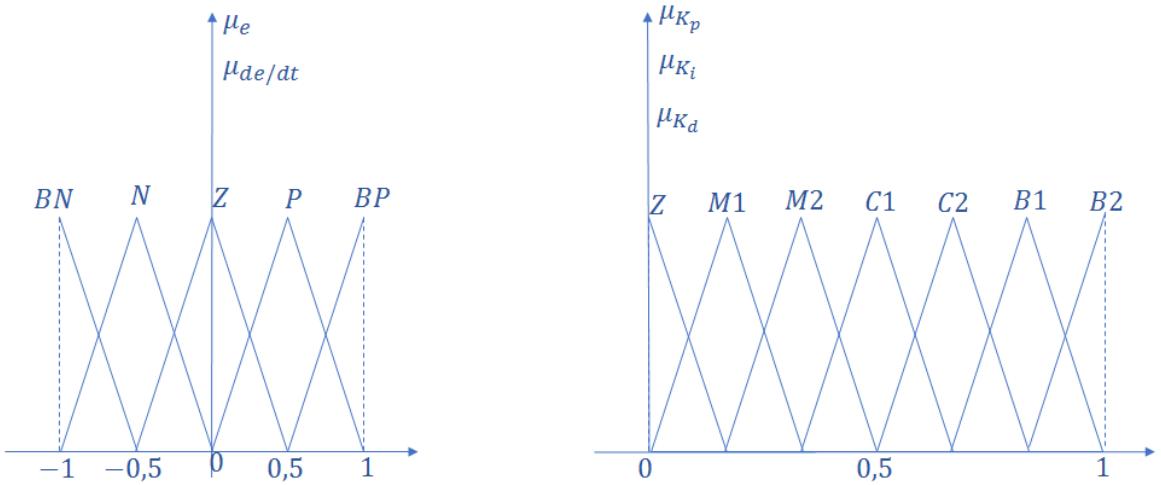


Рисунок 3.16. Функции принадлежности входных и выходных сигналов адаптивного РНЛ

K_p		de/dt					K_i		de/dt					K_d		de/dt				
		BN	N	Z	P	BP			BN	N	Z	P	BP			BN	N	Z	P	BP
e	BN	B2	B2	B2	B2	B2	e	BN	C1	C1	C1	C1	C1	e	BN	Z	M1	C1	C2	B2
	N	B1	B1	B1	C2	B2		N	M1	M1	M1	M1	M1		N	M1	B1	C2	B2	B2
	Z	Z	Z	M2	M1	M1		Z	M2	M2	Z	M2	M2		Z	C1	C2	C2	B2	B2
	P	B1	B1	B1	C2	B2		P	M1	M1	M1	M1	M1		P	B1	B2	B2	B2	B2
	BP	B2	B2	B2	B2	B2		BP	C1	C1	C1	C1	C1		BP	B2	B2	B2	B2	B2

Рисунок 3.17. 3D база правил адаптивного РНЛ

4 Исследование устойчивости регуляторов с нечеткой логикой

Одним из методов исследования устойчивости нечетких систем является метод Ляпунова и, в частности, нечеткая функция Ляпунова.

Для общего вида предикантных правил вида:

Если $z_1(t)$ есть M_{i1} и...и $z_p(t)$ есть M_{ip} ,

$$\text{то } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}, i = 1, 2, \dots, r \quad (4.1)$$

где M_{ij} - нечеткое множество, r - число нечетких правил, $x(t) \in R^n$ - фазовый вектор, $u(t) \in R^m$ - вектор входного воздействия, $y(t) \in R^q$ -вектор выходного сигнала, $A_i \in R^{n \times n}, B_i \in R^{n \times m}, C_i \in R^{q \times n}$, $z(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$ - вектор известных переменных посылок, которые могут быть функциями фазовых переменных, внешних возмущений или времени.

Пусть $w_i(z(t))$ - произведение всех различных M_{ij} , которые соответствуют i -му правилу, т.е.

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)) \quad (4.2)$$

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}, \quad (4.3)$$

тогда система уравнений примет вид (4.4)

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))C_i x(t) \end{cases} \quad (4.4)$$

при условии, что для всех t выполняется $\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1$, $h_i(z(t)) \geq 0$,

а выход РНЛ возможно представить в виде (4.5)

$$u(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t))F_i x(t) \quad (4.5)$$

Пусть $G_{ij} = A_i - B_i F_j$, то если существует общая для всех подсистем положительно определенная матрица P :

$$G_{ii}^T P + PG_{ii} < 0 \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{1}{2}(G_{ij} + G_{ji})\right)^T P + P\left(\frac{1}{2}(G_{ij} + G_{ji})\right) < 0 \quad (4.7)$$

для всех $i < j$ таких что $h_i \cap h_j \neq \emptyset$, то положение равновесия управляемой нечеткой системы асимптотически устойчиво.

С учетом (4.4), (4.5) нечеткая функция Ляпунова примет вид (4.8).

$$V(x(t)) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) x^T(t) P_i x(t), \quad (4.8)$$

где P_i - положительно определенные матрицы такие, что $P_j = \gamma_{ij} P_i$ для всех $i, j = 1, \dots, r$ и $\gamma_{ij} > 0$ для $i \neq j$, $\gamma_{ii} = 1$ для $i = j$.

Следовательно, при ограничении $|h_i(t)| \leq \delta_i$ для всех i , где δ_i - заданные положительные числа, найдутся такие положительно определенные матрицы P_i и матрицы F_i , что $\sum_{k=1}^r \delta_k P_k + (G_{jj}^T P_i + P_i G_{jj}) < 0$, $\left(\frac{1}{2}(G_{jk} + G_{kj})\right)^T P_i + P_i \left(\frac{1}{2}(G_{jk} + G_{kj})\right) < 0$ для всех $i, j, k = 1, \dots, r$, таких что $j < k$.

Пример фазовой траектории (зависимость ошибки от приращения ошибки) системы с РНЛ приведен на рис.4.1. При направленности фазовой траектории вверх под действием максимальной отрицательной силы ускорение отрицательно, и ошибка положительна и увеличивается. При воздействии максимальной силы фазовая траектория стремится вниз. При отрицательной производной ошибки ошибка отрицательна, и фазовая траектория стремится влево.

Под воздействием положительной силы все фазовые траектории направлены вниз.

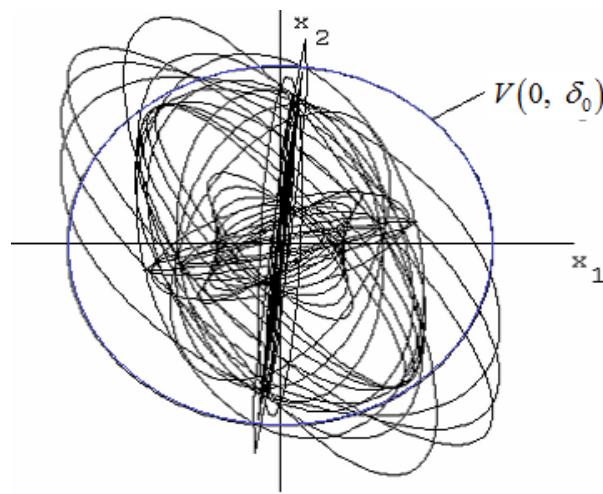


Рисунок 4.1 – Пример построения фазовой траектории нечеткой системы с ограничением функцией Ляпунов

Фазовая траектория РНЛ, построенная на базе синтеза фазового портрета нелинейной системы, оперирует двумя сигналами - ошибкой и ее изменением.

Задание 4.

Пусть заданы функции принадлежности гауссовского типа (рис.4.2) и база правил, приведенная на рис.4.3. Необходимо построить фазовый портрет системы (фазовую плоскость). Входными сигналами РНЛ являются ошибка e и изменение ошибки Δe

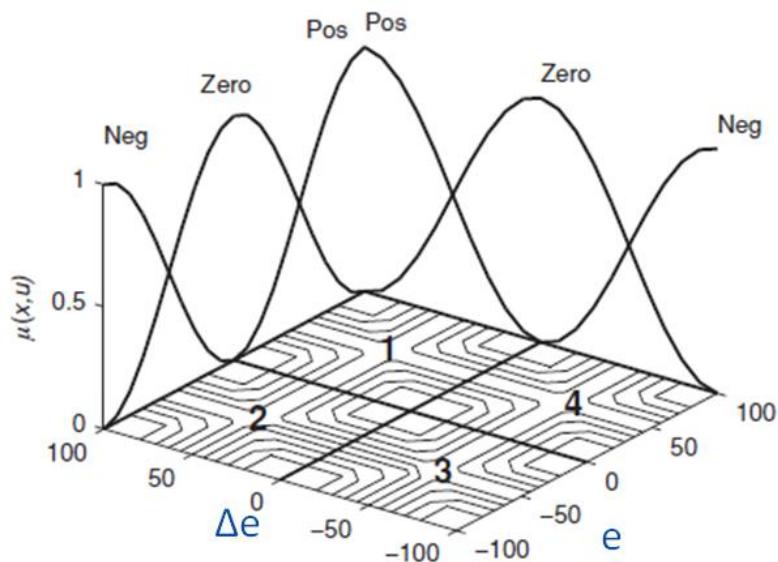


Рисунок 4.2 – Заданные функции принадлежности и фазовая плоскость

<i>№ n/n</i>	Правила					
1	<i>Если e</i>	N	<i>И Δe</i>	N	<i>Тогда и</i>	NB
2	<i>Если e</i>	N	<i>И Δe</i>	Z	<i>Тогда и</i>	NM
3	<i>Если e</i>	N	<i>И Δe</i>	P	<i>Тогда и</i>	Z
4	<i>Если e</i>	Z	<i>И Δe</i>	N	<i>Тогда и</i>	NM
5	<i>Если e</i>	Z	<i>И Δe</i>	Z	<i>Тогда и</i>	Z
6	<i>Если e</i>	Z	<i>И Δe</i>	P	<i>Тогда и</i>	PM
7	<i>Если e</i>	P	<i>И Δe</i>	N	<i>Тогда и</i>	Z
8	<i>Если e</i>	P	<i>И Δe</i>	Z	<i>Тогда и</i>	PM
9	<i>Если e</i>	P	<i>И Δe</i>	P	<i>Тогда и</i>	PB

Рисунок 4.3 – База правил

На рис.4.3 приняты следующие обозначения:

N – отрицательное,

P – положительное,

Z – ноль,

NB - отрицательное большое,

NM - отрицательное малое,

PM - положительное малое,

PB - положительное большое.

На рис. 4.2. показана фазовая плоскость одновременно с функциями принадлежности. Рассмотрим 1-е правило (рис.4.3) – «отрицательная» ошибка и ее «отрицательное» изменение отражается в 3-м квадранте фазовой плоскости, эксперт для того, чтобы нивелировать эти значения применяет «отрицательное большое» управление. Аналогично, правило 3 – 2 квадрант, правило 7 – 4 квадрант, правило 9 – 1 квадрант, правило 5 – центр фазовой плоскости, остальные правила – зоны между квадрантами.

Рассмотрим переходный процесс в системе, представленный на рис.4.4. На рисунке показан типовой переходный процесс с перерегулированием. Верхний правый график показывает траекторию фазовой плоскости. Фазовая траектория пересекает все 4 квадранта фазовой плоскости. Нижний правый график показывает проекцию траектории на поверхность РНЛ. Рассмотрим точки в каждом квадранте фазовой плоскости.

Квадрант 4 ($e > 0, \Delta e < 0$). В первый момент времени ошибка большая и положительная, выходной сигнал системы стремится к заданному. Фазовая траектория движется по часовой стрелке.

Квадрант 3 ($e < 0, \Delta e < 0$). В данном квадранте выходной сигнал превысил заданный (перерегулирование), ошибка отрицательна, изменение ошибки также отрицательно, т.к. выходной сигнал еще возрастает.

Квадрант 2 ($e < 0, \Delta e > 0$). Выходной сигнал стремится к заданному, ошибка отрицательна, т.к. выходной сигнал еще превышает заданный, изменение ошибки положительно.

Квадрант 1 ($e > 0, \Delta e > 0$). Ошибка положительна, выходной сигнал системы меньше заданного, изменение ошибки положительно, сигнал управления уменьшается.

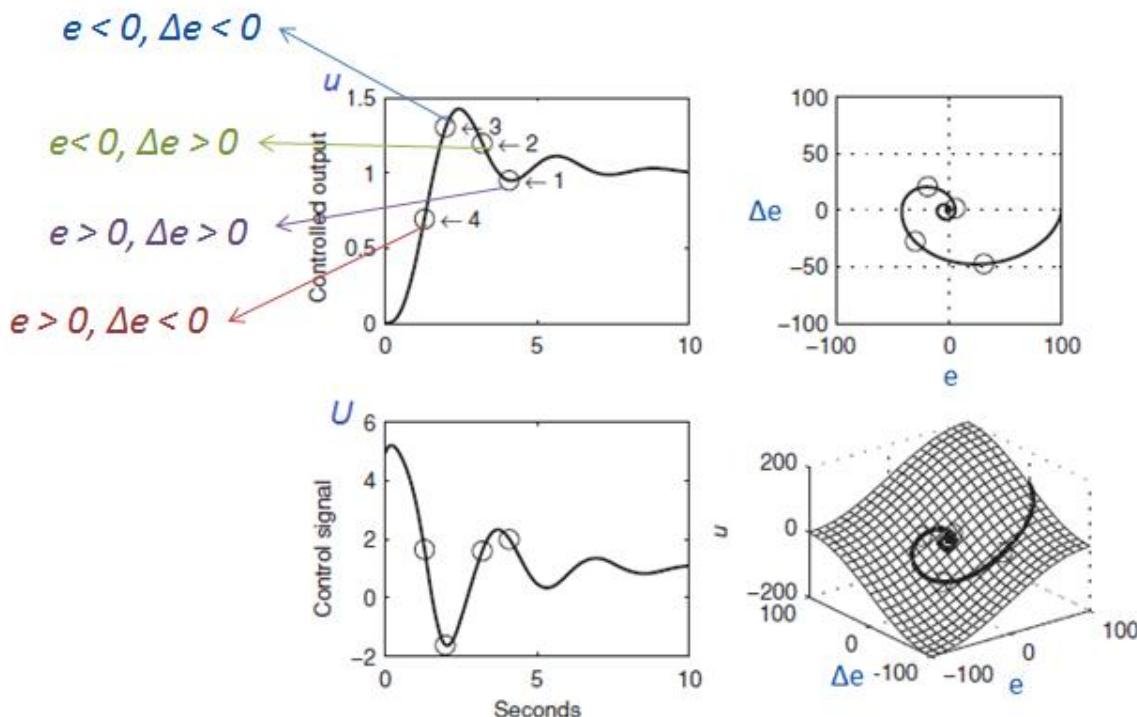


Рисунок 4.4 – Построение фазовой траектории

Линии, разделяющие квадранты фазовой плоскости соответствуют нулевому управляемому сигналу, область над нулевым значением соответствует положительным управляемым сигналам, а под ней - отрицательным, т.е. сигнал меняет свой знак, когда пересекает эти разделяющие линии фазовой плоскости. Если траектория стремится к центру, то это означает, что система находится в равновесии.

Практическая работа №1

СИНТЕЗ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

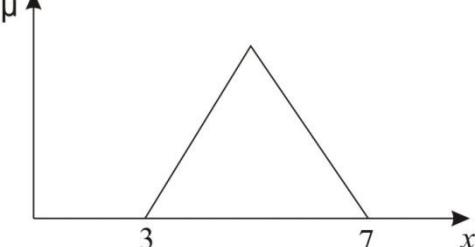
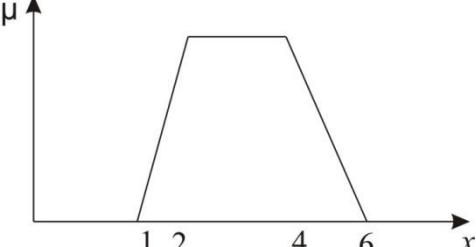
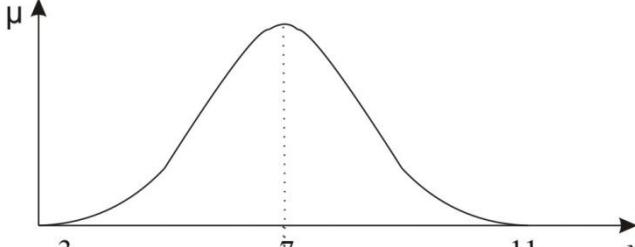
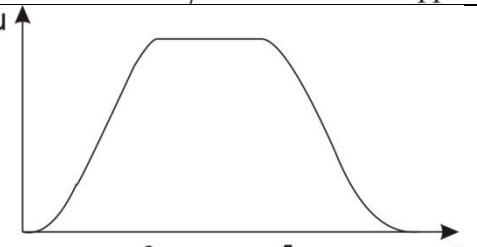
Цель работы

Синтез функций принадлежности различного типа посредством программы MatLab.

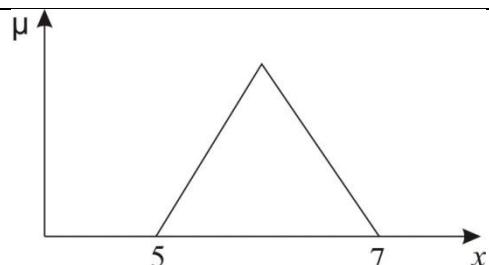
Содержание работы

Необходимо написать подпрограмму для построения функции принадлежности, графическое изображение которой представлено в соответствующей графе в таблице П1.

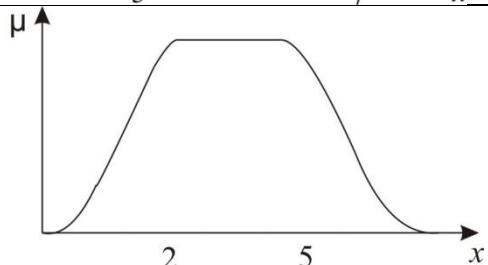
Таблица П1

Номер варианта	Тип функции принадлежности
1	
2	
3	
4	

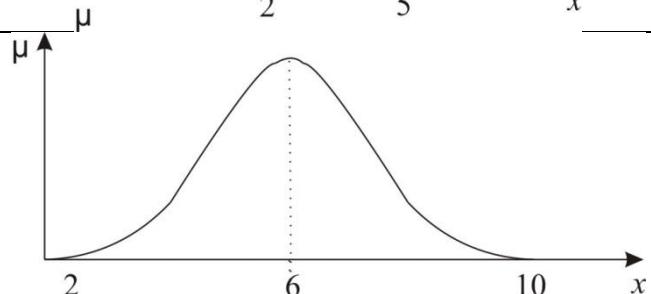
5



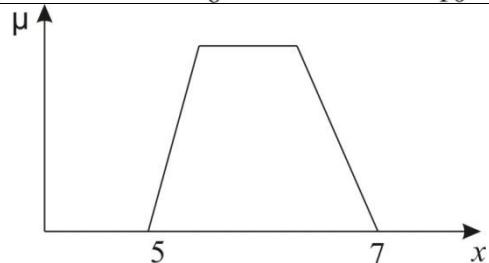
6



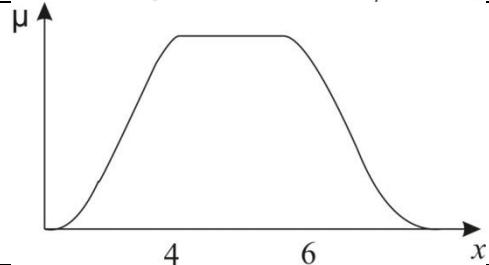
7



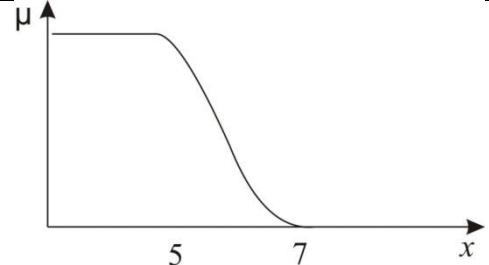
8



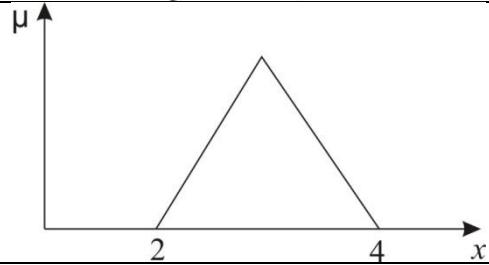
9



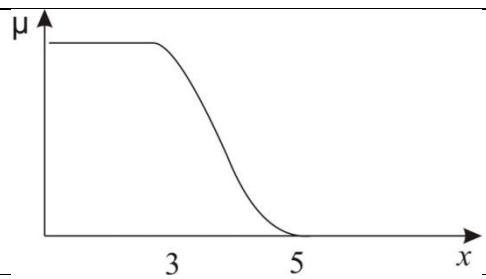
10



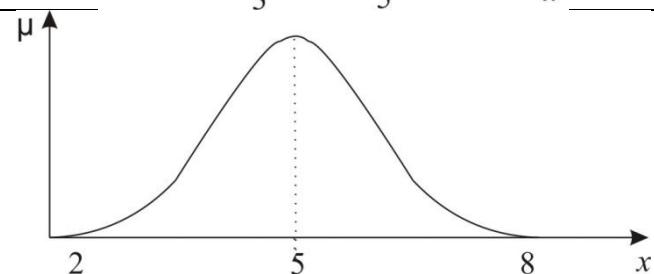
11



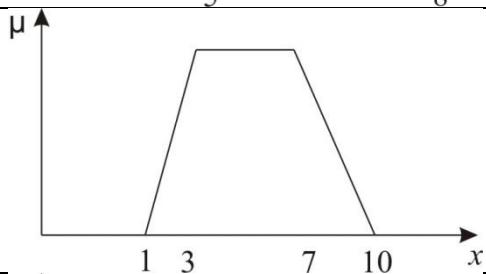
12



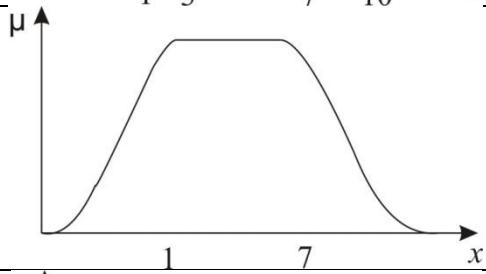
13



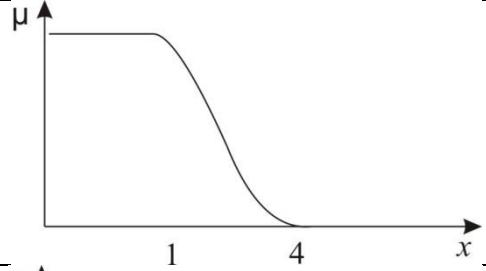
14



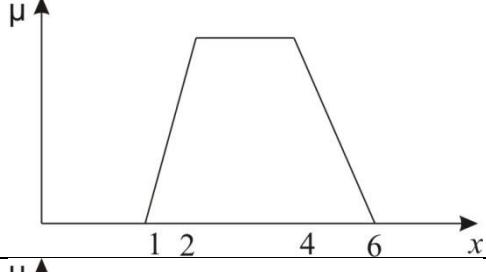
15



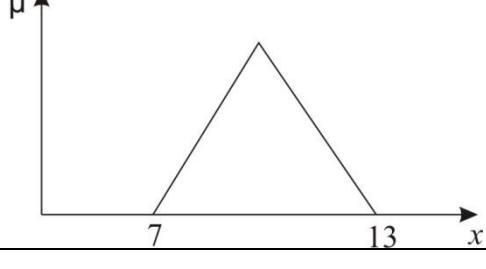
16



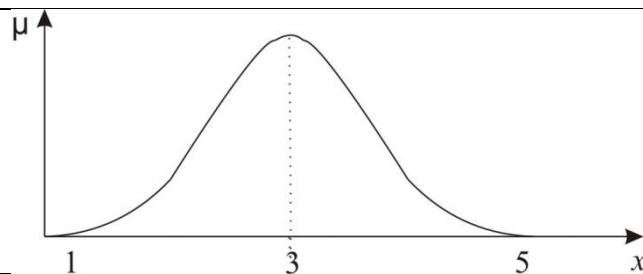
17



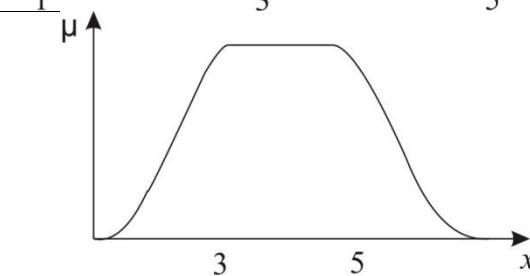
18



19



20



Содержание отчета

1. Подпрограмма в системе MatLab (m.файл)
2. Графическое изображение искомой функции принадлежности

Практическая работа №2

СИНТЕЗ НЕЧЕТКОЙ ИМПЛИКАЦИИ

Цель работы

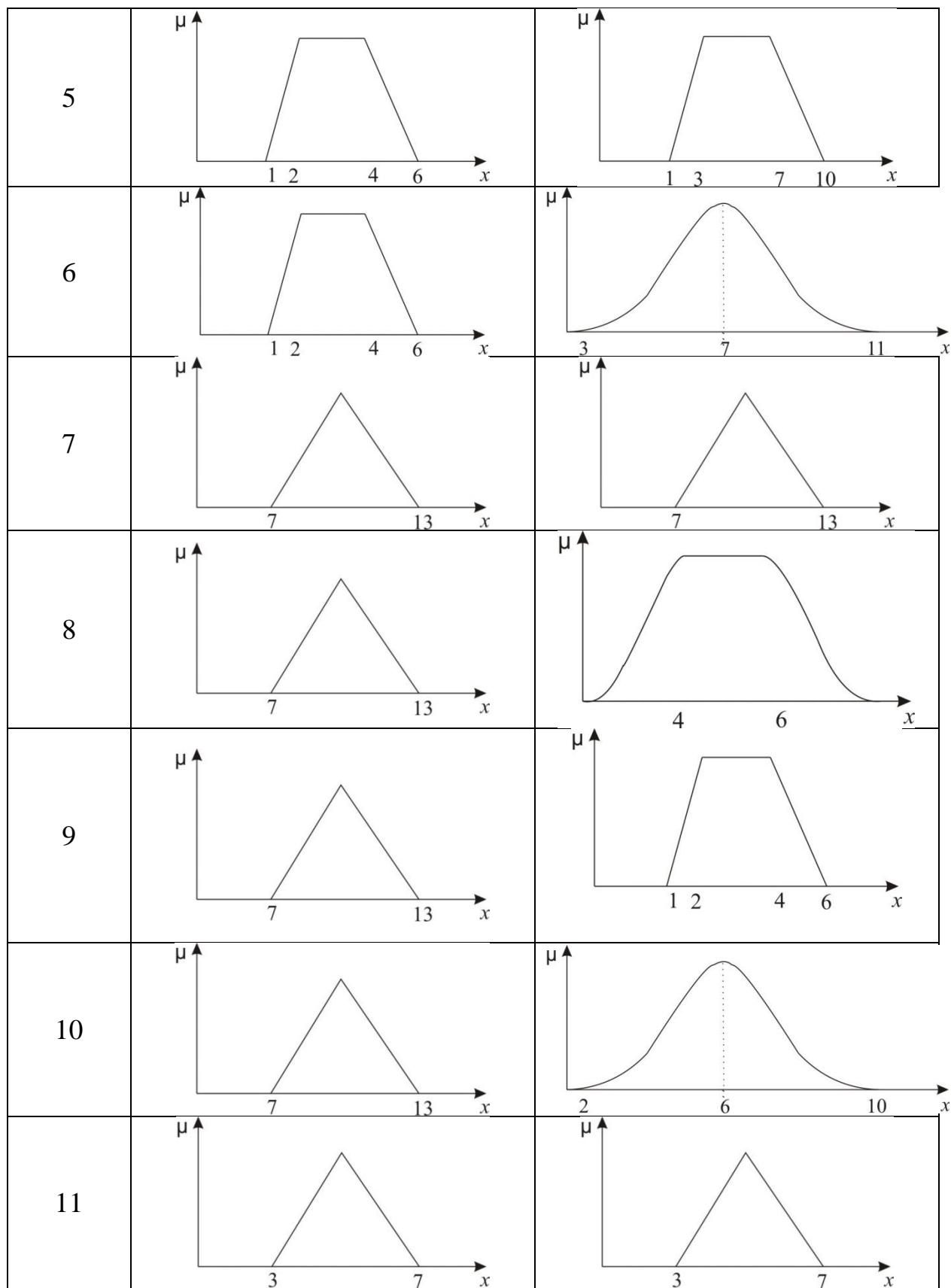
Синтез нечеткой импликации в пакете имитационного моделирования MatLab.

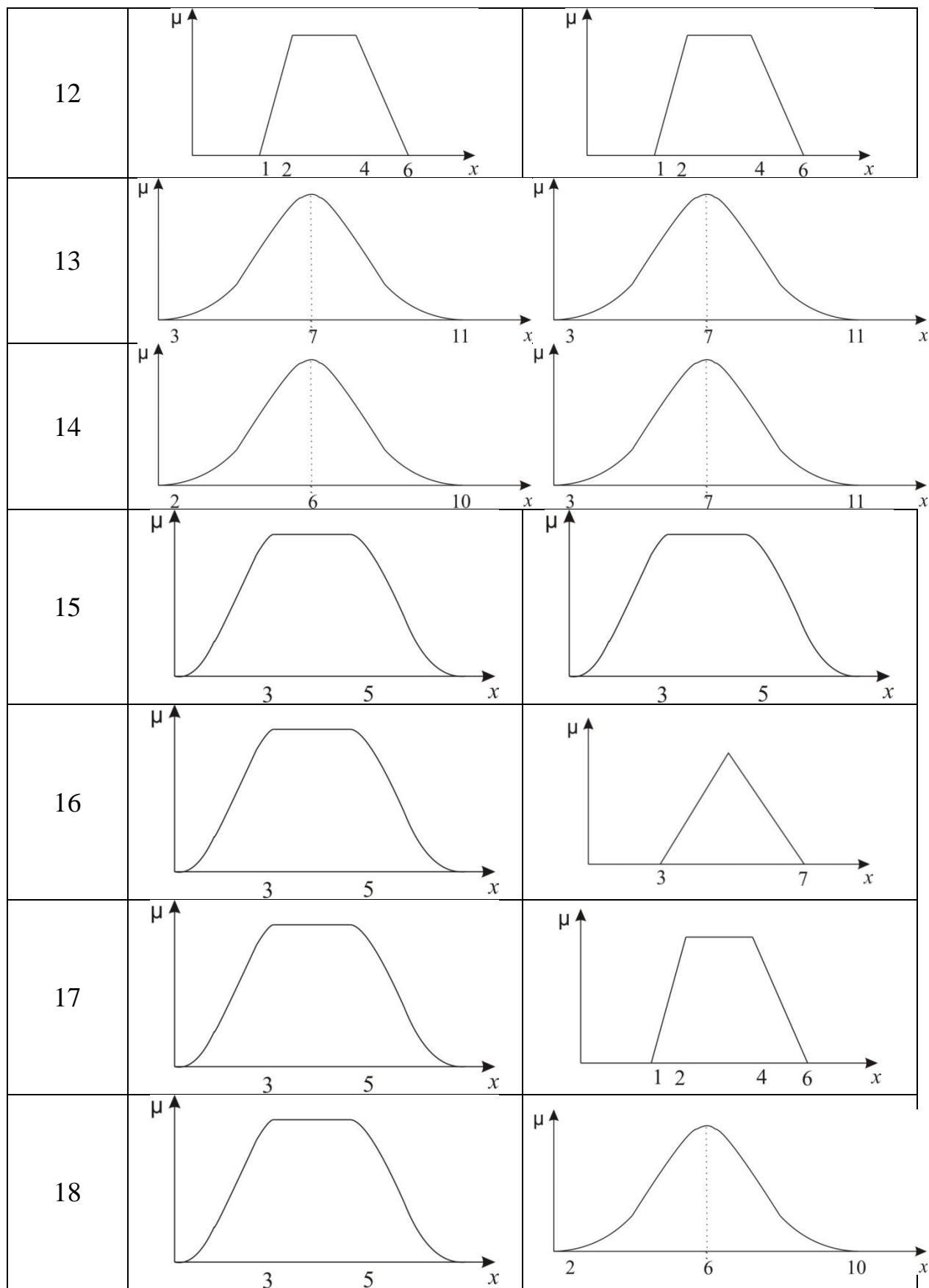
Содержание работы

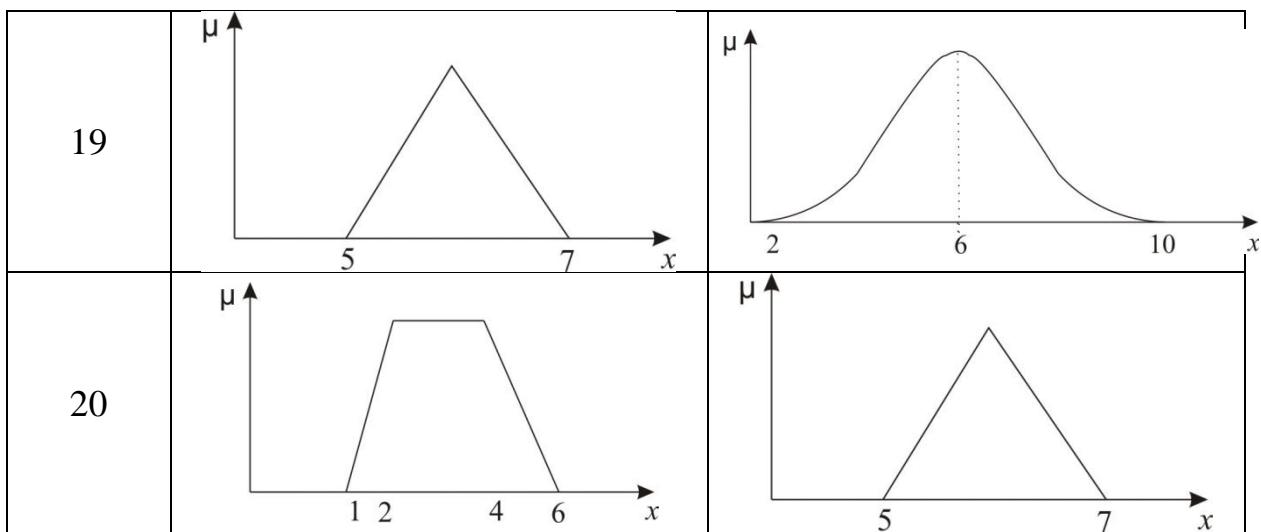
Необходимо написать подпрограмму нахождения всех возможных вариантов нечеткой импликации для двух входных сигналов, представленных функциями принадлежности, графическое изображение которых представлено в соответствующей ячейке в таблице Л2.

Таблица П2

Номер варианта а	Первая функция принадлежности	Вторая функция принадлежности
1		
2		
3		
4		







Содержание отчета

1. Подпрограмма в системе MatLab (m.файл)
2. Графическое изображение используемых функций принадлежности
3. Графическое изображение всех возможных вариантов нечеткой импликации.

Практическая работа №3

ДЕФАЗИФИКАЦИЯ

Цель работы

Провести дефазификацию различными методами в пакете имитационного моделирования MatLab.

Содержание работы

Необходимо написать подпрограмму для поиска дефазификации методом, представленным в табл.П3. Данные функций принадлежности входных сигналов представлены в табл.П2. Необходимо найти нечеткую импликацию для сигнала $\mu=1$ и выполнить дефазификацию методом, заданным в табл.П3 полученного общего вывода.

Таблица П3

Номер варианта	Метод дефазификации
1	метод центра тяжести (cog)
2	метод центра области (coa)
3	метод среднего максимума (mom)
4	метод центра тяжести (cog)
5	метод центра области (coa)
6	метод среднего максимума (mom)
7	метод центра тяжести (cog)
8	метод центра области (coa)
9	метод среднего максимума (mom)
10	метод центра тяжести (cog)
11	метод центра области (coa)
12	метод среднего максимума (mom)
13	метод центра тяжести (cog)
14	метод центра области (coa)
15	метод среднего максимума (mom)
16	метод центра тяжести (cog)
17	метод центра области (coa)
18	метод среднего максимума (mom)
19	метод центра тяжести (cog)
20	метод центра области (coa)

Содержание отчета

1. Подпрограмма в системе MatLab (m.файл)
2. Графическое изображение дефазификации

Практическая работа №4 СИНТЕЗ БАЗЫ ПРАВИЛ

Цель работы

Реализовать в системе MatLab РНЛ с предложенной базой правил.

Для того, чтобы вызвать подпрограмму, реализующую синтез РНЛ необходимо в рабочей области MatLab набрать команду:

```
>> fuzzy
```

После этого в отдельном окне возможно приступить к синтезу РНЛ (рис.П1)

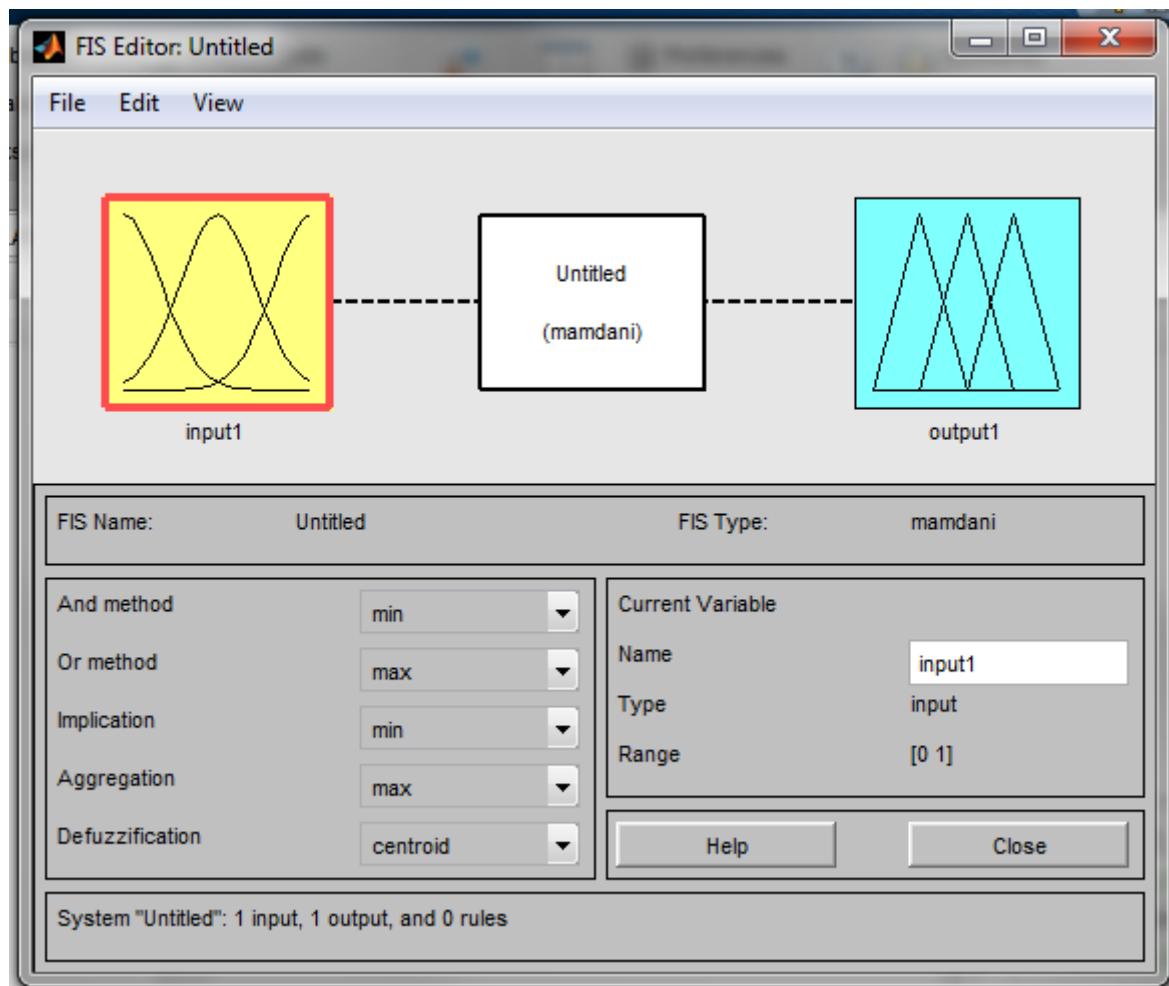


Рисунок П1 – Окно программы Fuzzy

В данной рабочей области реализуем новый РНЛ - задаем тип РНЛ - Мамдани или Сугено (рис.П2)

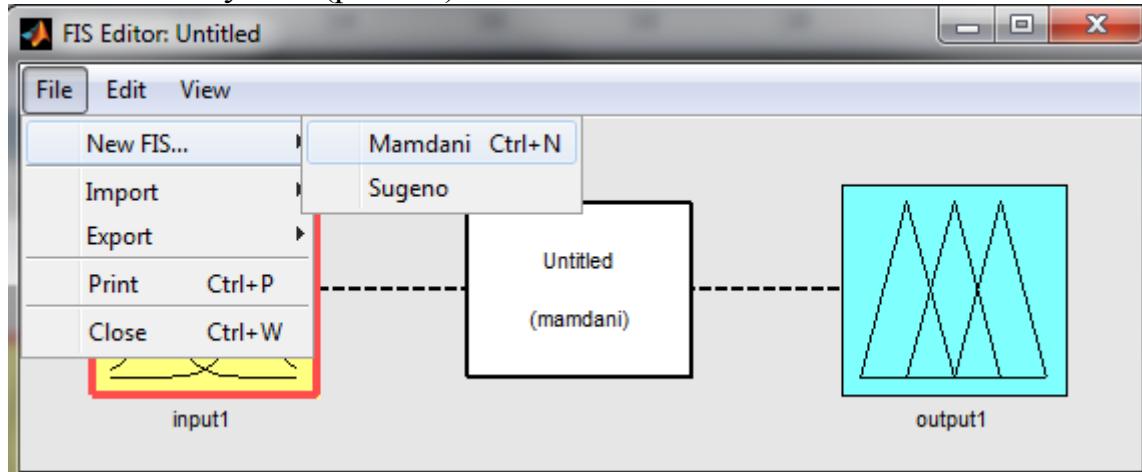


Рисунок П2 – Рабочее окно программы для выбора типа нового РНЛ

Далее, функцией *Add Variable...*, задаем необходимое количество входных и выходных переменных РНЛ (рис.П3)

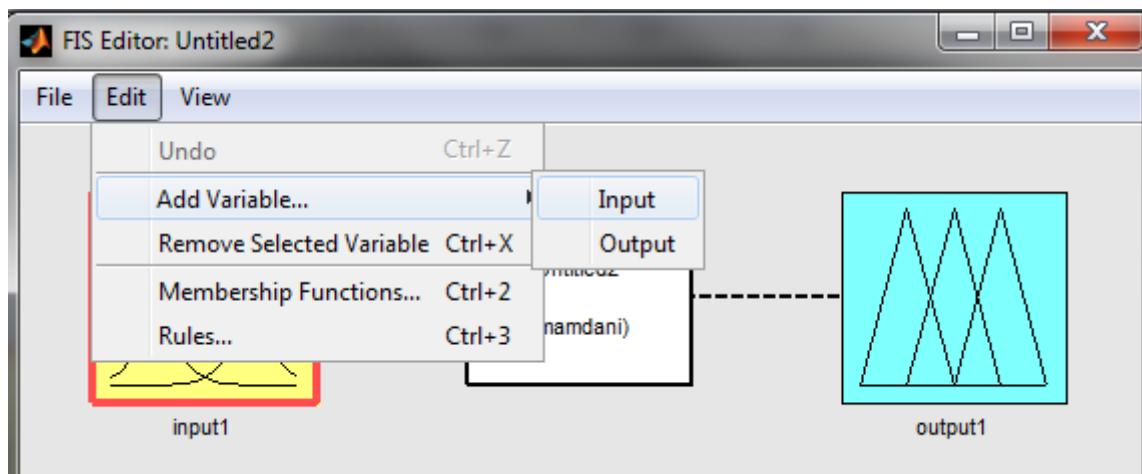


Рисунок П3 – Окно подпрограммы Fuzzy

РНЛ, структура которого представлена на рис.П4, имеет две входные и одну выходную переменную. В данном окне выбираем методы дефазификации, импликации, а также пределы, в которых находятся функции принадлежности входных и выходных переменных.

Далее, при двойном нажатии на блок функций принадлежности, мы можем синтезировать функции принадлежности (рис.П5) и выбирать их тип - треугольные, гауссовские и т.д., а также править пределы, в которых лежат функции принадлежности.

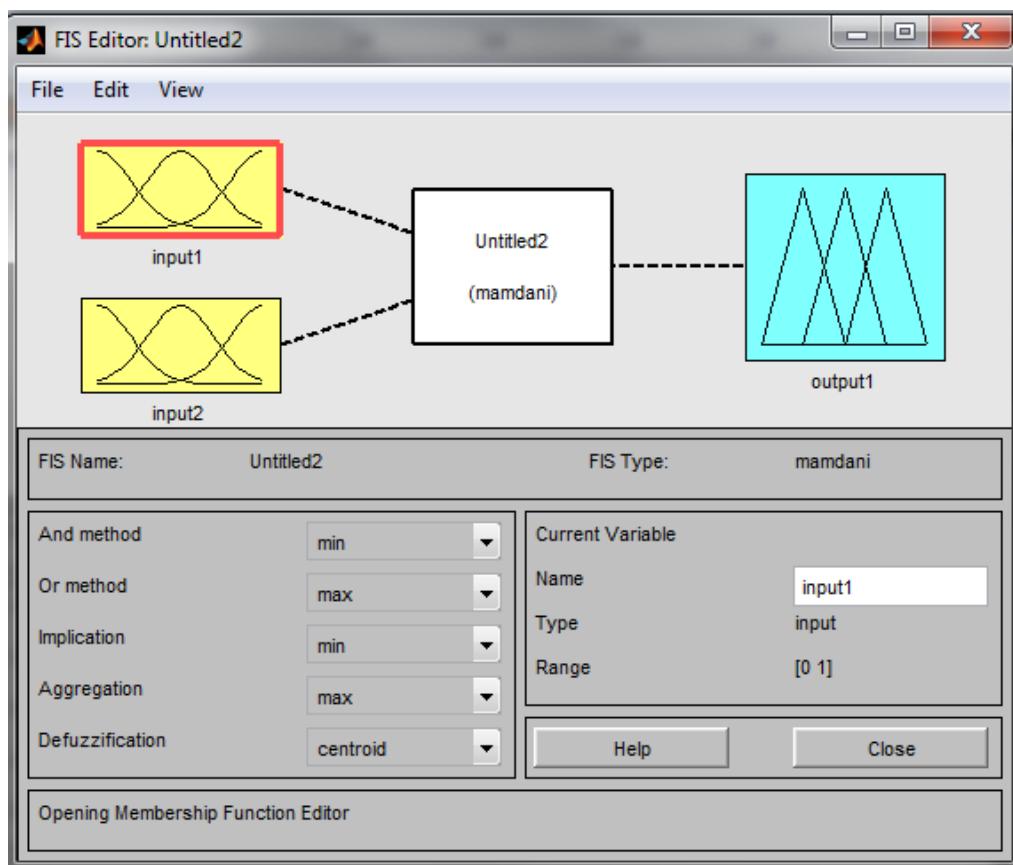


Рисунок П4 – Окно синтеза РНЛ

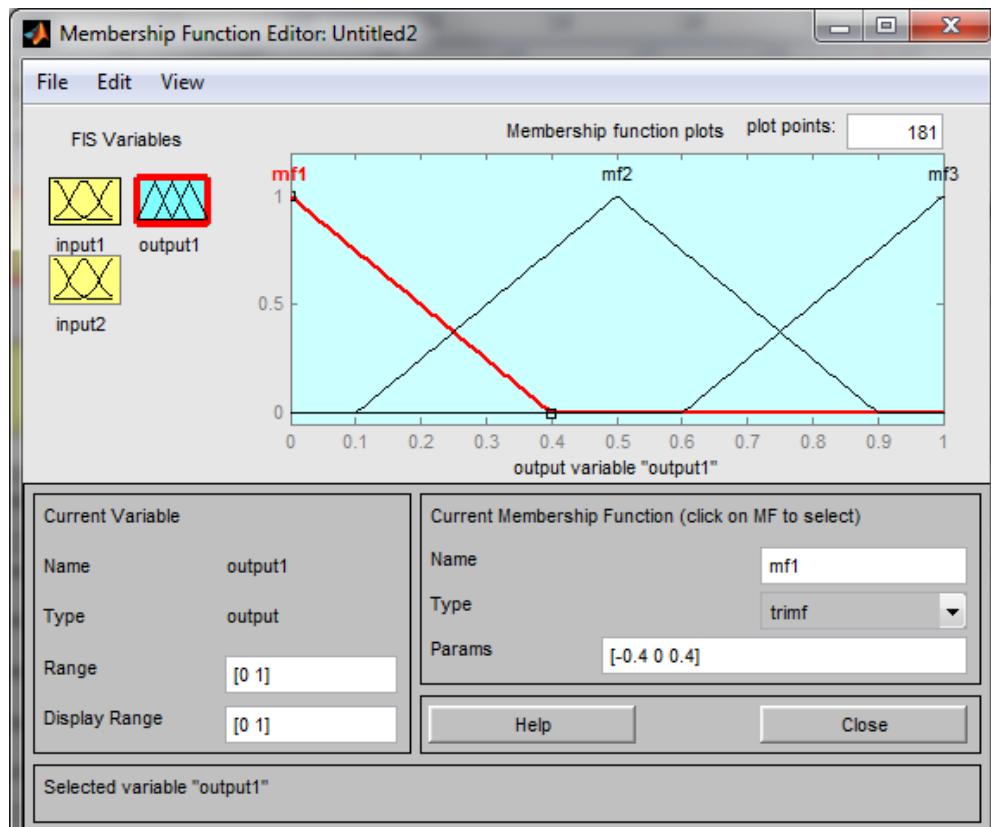


Рисунок П5 – Окно синтеза функций принадлежности

Следующим шагом необходимо задать базу правил РНЛ. Для этого воспользуемся операцией *Rules...* (рис.П6)

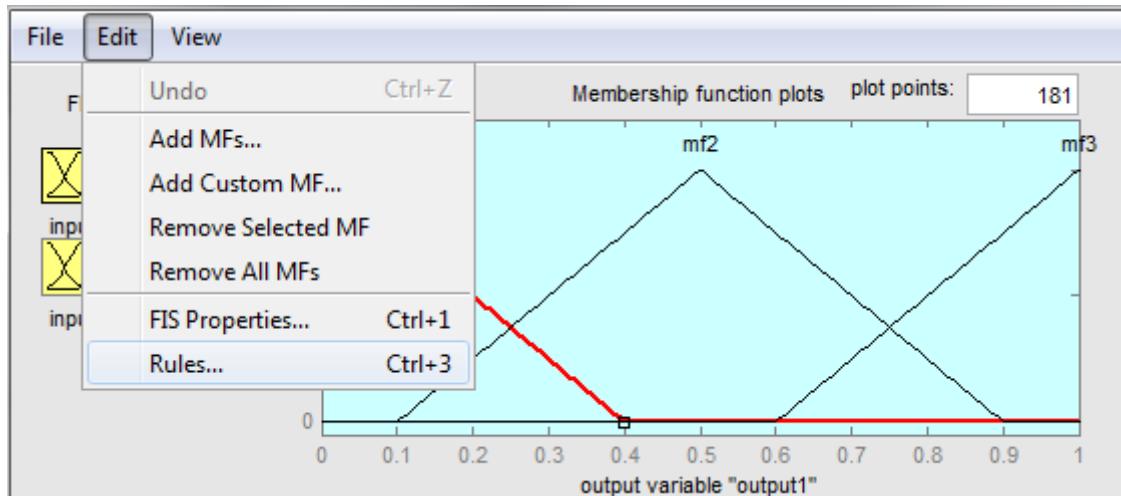


Рисунок П6 – Подпрограмма синтеза РНЛ

В подпрограмме *Rule Editor* последовательно с помощью лингвистических правил задаем базу правил. При этом можем задать вес правила относительно других правил (*Weight*). (рис.П7)

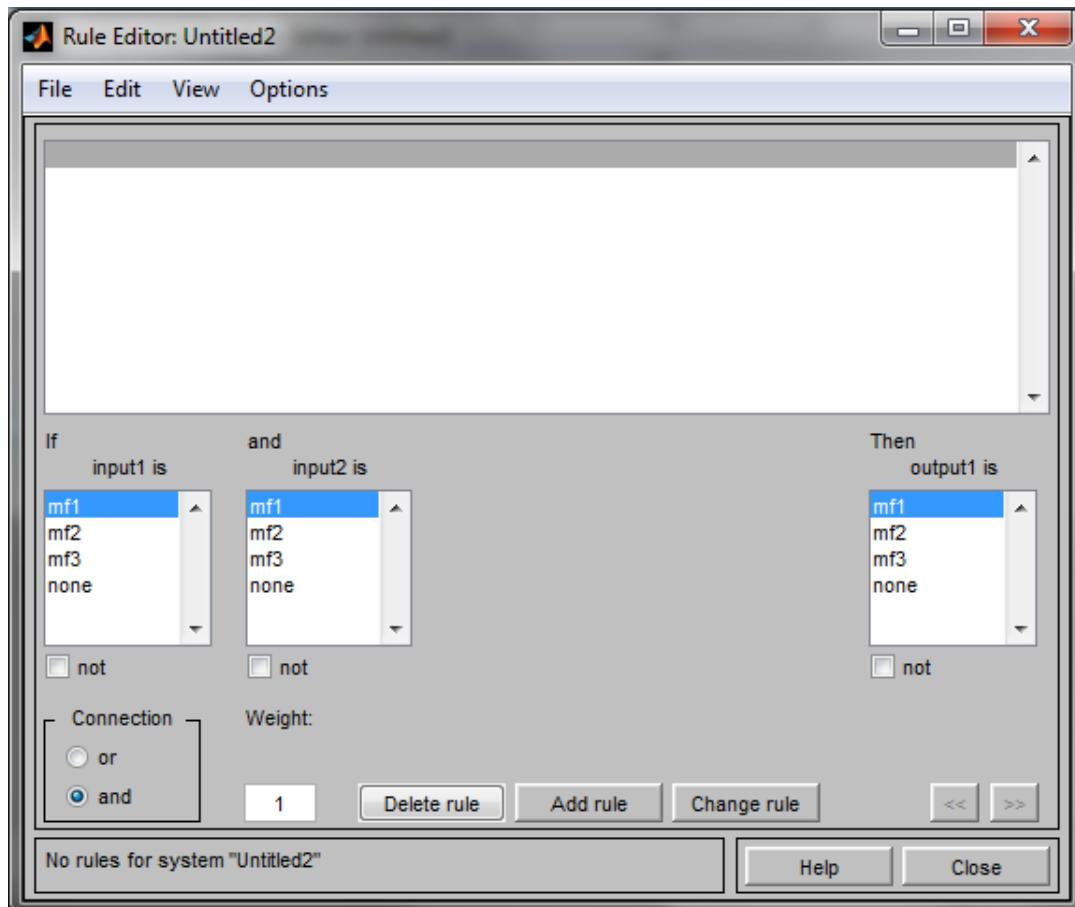


Рисунок П7 – Подпрограмма синтеза базы правил

Для того, чтобы построить поверхность РНЛ в окне подпрограммы синтеза РНЛ используют операцию *View -> Surface* (рис.П8)

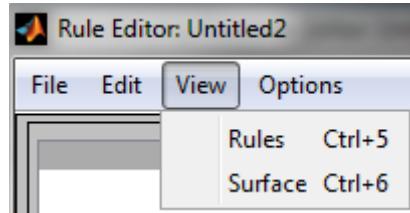


Рисунок П8 – Операция построения поверхности РНЛ

Содержание работы

В работе необходимо синтезировать базу правил для РНЛ (тип - Мамдани), имеющего два входа - ошибка и ее изменение и один выход - сигнал управления. Функции принадлежности - треугольные, единичные, равносторонние с диапазоном $[-1, 1]$ с пятью лингвистическими переменными:

negative big – **BN** – большое отрицательное,
 negative – **N** – отрицательно,
 positive – **P** – положительно,
 positive big – **BP** – большое положительно,
 zero – **Z** – ноль.

Метод деффазификации представлен в табл.П4, база правил едина для всех вариантов и представлена на рис.П9.

$\mu_{\Delta e}$	BN	N	Z	P	BP
μ_e	BN	BN	N	N	Z
BN	BN	N	N	Z	P
N	N	N	Z	P	P
Z	N	Z	P	P	BP
P	N	Z	P	P	BP
BP	Z	P	P	BP	BP

Рисунок П9 – База правил регулятора с двумя входными сигналами

Таблица П4

Номер варианта	Метод деффазификации
1	метод центра тяжести (cog)
2	метод центра области (coa)
3	метод среднего максимума (mom)
4	метод центра тяжести (cog)
5	метод центра области (coa)
6	метод среднего максимума (mom)
7	метод центра тяжести (cog)
8	метод центра области (coa)
9	метод среднего максимума (mom)
10	метод центра тяжести (cog)
11	метод центра области (coa)
12	метод среднего максимума (mom)
13	метод центра тяжести (cog)
14	метод центра области (coa)
15	метод среднего максимума (mom)
16	метод центра тяжести (cog)
17	метод центра области (coa)
18	метод среднего максимума (mom)
19	метод центра тяжести (cog)
20	метод центра области (coa)

Содержание отчета

1. Графическое изображение поверхности синтезированного РНЛ
2. Подпрограмма в MatLab, реализующая РНЛ (.fis файл)

Практическая работа №5

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

Цель работы

Синтез РНЛ для управления скоростью двигателя постоянного тока (ДПТ)

Содержание работы

В таблице П5 задан тип ДПТ. Необходимо синтезировать систему управления его скоростью с традиционным ПИ-регулятором, синтез которого приведен в подпрограмме (П2), а также реализовать систему управления скоростью ДПТ с РНЛ с двумя входными сигналами, база правил которого приведена на рис.П9, метод дефазификации - в табл.П4. Заданные показатели качества синтезируемой системы: перерегулирование не более 43%, время переходного процесса не более 3с. В работе необходимо сравнить системы регулирования скоростью ДПТ с традиционным регулятором и РНЛ.

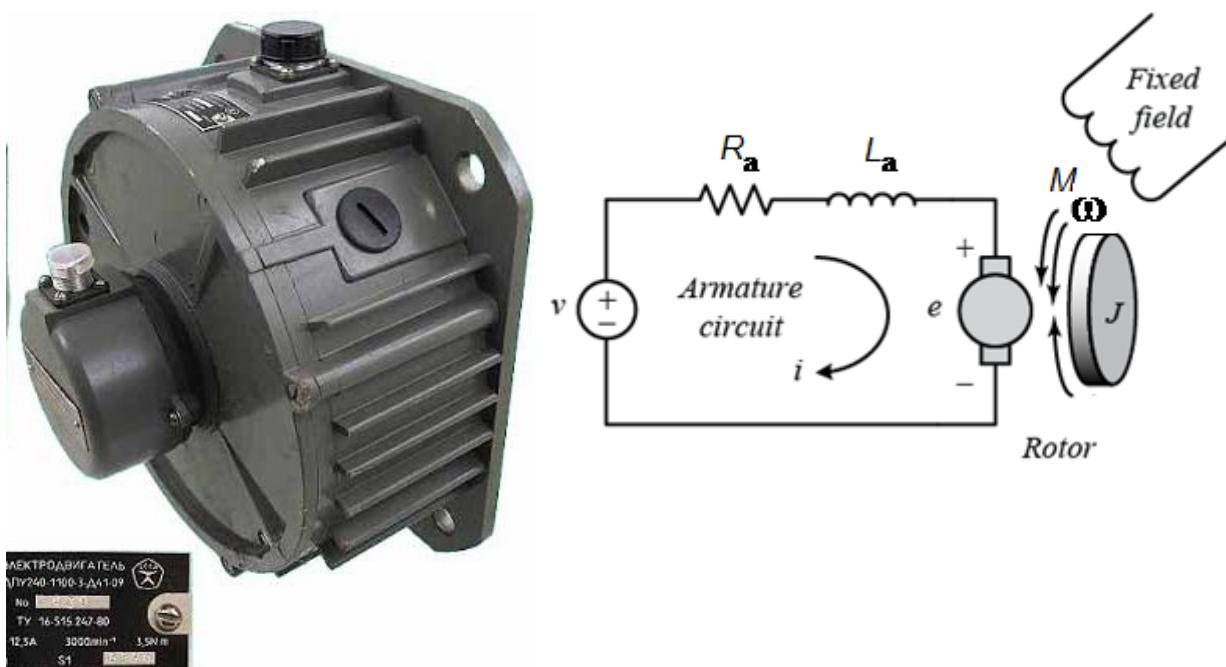


Рисунок П10 – Вид ДПТ и его схема замещения

Структурная схема управления скоростью ДПТ с традиционным регулятором представлена на рис.П11, дифференциальные уравнения, описывающие данную систему, представлены в (П1), подпрограмма в MatLab синтеза такого регулятора представлена в (П2).

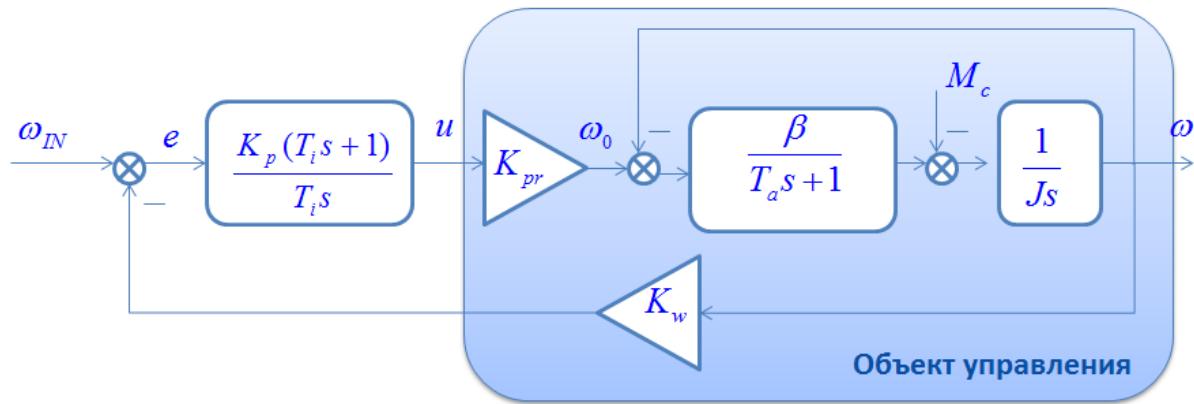


Рисунок П11 – Структурная схема управления скоростью ДПТ с традиционным регулятором

$$\begin{cases} (1 + T_a s)M = & \& \\ M - M_c = J_s & \& \end{cases} \quad (\text{П1})$$

```

y = [Ta * TmTm1];
P = roots(y);
p1 = -P(1, 1);
p2 = -P(2, 1);
T1 = 1 / (p1);
T2 = 1 / (p2);
Tmy = T1;
Ti = T2;
Kp = Ti / (2 * Tmy * Kpr * Kw / Ce);
Uzad = 1;
To = 1e-5
Tmc = 0.05
    
```

(П2)

Таблица П5

№ вар.	Тип двигателя	Тип синтезируемого регулятора
1	ДПУ-240-1100-3-Д41-09 3,5Н/м/3000	ПИ-подобный РНЛ с двумя входами
2	ДПУ-200-550-3-Д41-09 1,7Н/м/3000	ПИ-подобный РНЛ с двумя входами
3	ДПУ-127-220-1-30-Д09 2,1Н/м/1000	ПИ-подобный РНЛ с двумя входами

4	ДПУ-87-120-1-48-Д 09 1,2н/м/1000	ПИ-подобный РНЛ с двумя входами
5	ДПУ-87-75-1-23-Д 09 0,7н/м/1000	ПИ-подобный РНЛ с двумя входами
6	ДПУ-240-1100-3-Д41-09 3,5н/м/3000	ПИД-подобный РНЛ с двумя входами
7	ДПУ-200-550-3-Д41-09 1,7н/м/3000	ПИД-подобный РНЛ с двумя входами
8	ДПУ-87-120-1-48-Д 09 1,2н/м/1000	ПИД-подобный РНЛ с двумя входами
9	ДПУ-87-75-1-23-Д 09 0,7н/м/1000	ПИД-подобный РНЛ с двумя входами
10	ДПУ-240-1100-3-Д41-09 3,5н/м/3000	ПИ-подобный РНЛ с двумя входами
11	ДПУ-240-1100-3-Д41-09 3,5н/м/3000	ПИ - ПД-подобный РНЛ с двумя входами
12	ДПУ-200-550-3-Д41-09 1,7н/м/3000	ПИ - ПД-подобный РНЛ с двумя входами
13	ДПУ-127-220-1-30-Д09 2,1н/м/1000	ПИ - ПД-подобный РНЛ с двумя входами
14	ДПУ-87-120-1-48-Д 09 1,2н/м/1000	ПИ - ПД-подобный РНЛ с двумя входами
15	ДПУ-87-75-1-23-Д 09 0,7н/м/1000	ПИ - ПД-подобный РНЛ с двумя входами
16	ДПУ-240-1100-3-Д41-09 3,5н/м/3000	Гибридный ПИ-подобный РНЛ + ПИ-регулятор
17	ДПУ-200-550-3-Д41-09 1,7н/м/3000	Гибридный ПИ-подобный РНЛ + ПИ-регулятор
18	ДПУ-127-220-1-30-Д09 2,1н/м/1000	Гибридный ПИ-подобный РНЛ + ПИ-регулятор
19	ДПУ-87-120-1-48-Д 09 1,2н/м/1000	Гибридный ПИ-подобный РНЛ + ПИ-регулятор
20	ДПУ-87-75-1-23-Д 09 0,7н/м/1000	Гибридный ПИ-подобный РНЛ + ПИ-регулятор

Содержание отчета

1. Система управления скоростью с РНЛ и традиционным регулятором, реализованная в MatLab
2. Исследования динамических и точностных свойств синтезированных систем
3. Фазовая траектория синтезированного РНЛ

Список сокращений

- РНЛ - регулятор на основе нечеткой логики
- РНЛА - адаптивный регулятор на основе нечеткой логики
- ЭМС - электромеханическая система
- П- - пропорциональный
- И- - интегральный
- Д- - дифференциальный
- ПИ- - пропорционально-интегральный
- ПИД- - пропорционально-интегральный- дифференциальный
- ДПТ - двигатель постоянного тока

Литература

1. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика М.: Горячая Линия - Телеком, 2004.- 143 с.
2. Huaguang Zhang Derong Liu. Fuzzy Modeling and Fuzzy Control // Birkhäuser Basel, 2006, 416 p.
3. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 614 с.
4. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т4: Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 742 с.
5. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т5: . Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 782 с.
6. В. А. Горюшкин, Об устойчивости нечетких систем управления Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 2011, выпуск 1(2), С. 17-25
7. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 288 с.
8. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления - СПб.: БХВ-Петербург, 2011. - 416 с.
9. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В., Кузин А.Ю. Особенности применения нечетких регуляторов на примере управления скоростью электродвигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики - 2016. - Т. 16. - № Том 16, Номер 5. - С. 872-878

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В 1930 году техникум точной механики и оптики был реорганизован в учебный комбинат, состоящий из института, техникума и ФЗУ в системе Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности.

В те годы электротехническую подготовку в нашем институте проводили кафедры «Электротехники» и «Электроизмерительных приборов». Кафедрой «Электротехники» руководил проф. Салтыков Л.Н., а кафедрой «Электроизмерительных приборов» проф. Шишев Л.П.

С сентября 1933 года исполнять обязанности заведующего кафедрой «Электротехники» нашего института начинает Рукавишников Н. Н, а с ноября 1937 года, на заведование кафедрой назначается Солодовников А. А., известный специалист в области электротехники, электроизмерительных приборов и оборудования.

Во время войны при эвакуации ЛИТМО в г. Черепаново кафедрой руководил доц., к.т.н. Березниковский С. Ф.; штатное расписание кафедры в те годы насчитывало всего 4 человека.

После возвращения ЛИТМО из эвакуации в 1944 году кафедрой заведует Березниковский С.Ф., которого 25 января 1945 года освобождают от обязанностей заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» и назначают заведующим этой кафедрой профессора Зилитенкевича С.И.

В послевоенные годы в целом по стране и в Ленинграде ощущался дефицит опытных преподавателей высшей школы и руководство институтом пригласило в качестве заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» известного ученого, педагога и методиста Пиотровского Л. М. Большинство учебников по электрическим машинам в ту пору было написано Пиотровским Л.М. лично или в соавторстве с другими видными учеными.

В 1948 году на базе кафедры «Общей и специальной

«электротехники» образуются кафедры: «Общей электротехники и электрических машин» зав.каф.доц. Березниковский С.Ф., «Теоретических основ электротехники» зав. каф.проф. Слепян Л.Б. и «Электроизмерительных приборов» исполняющий обязанности зав. каф. проф. Слепян Л.Б.

В 1951 году кафедры «Электротехники» и «ТОЭ» объединяют в единую кафедру «Электротехники и ТОЭ» под руководством доц. Березниковского С.Ф. в составе Радиотехнического факультета.

В 1956 году на радиотехническом факультете вновь образуются две кафедры – «ТОЭ» зав. каф. доц. Сочнев А.Я. и «Электрических машин» зав. каф. доц. Березниковский С.Ф.

В июле 1958 года доц. Сочнева А.Я. освобождают от обязанностей зав. каф. «ТОЭ», а доц. Фунтова Н.М. назначают в.и.о. зав. каф. и избирают по конкурсу на должность заведующего в 1960 году.

В 1961 году в ЛИТМО на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» приглашают профессора Сахарова А.П.

В 1965 году на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» избирается доц., к.т.н. Глазенко Т.А.

В 1968 году кафедры «ТОЭ» и «Электрических машин» объединяются в единую кафедру «Электротехники» под руководством заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, почетного члена Электротехнической академии России проф. Глазенко Т.А., которая двадцать пять лет возглавляла кафедру. Она являлась видным, творчески активным ученым, автором более 200 научных работ.

В 1990 году на должность заведующего кафедрой избирается профессор, д.т.н. Герман - Галкин С.Г.

В 1996 году кафедра «Электротехники» была переименована в кафедру «Электротехники и прецизионных электромеханических систем».

С 1991 года кафедрой руководит доцент, кандидат технических наук, Томасов Валентин Сергеевич.

С 1992 по 2005 годы на кафедре работал заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Международной Энергетической академии, профессор, д.т.н., Сабинин Ю.А..

Сегодня на кафедре работают: профессор, проф. Вакуленко С.А.; доценты: Абдуллин А.А., Борисов П.В., Горшков К.С., Ильина А.Г., Ловлин С.Ю., Лукичев Д.В., Никитина М.В., Поляков Н.А., Субботин Д.А., Толмачев В.А., Томасов В.С., Усольцев А.А.; ст. преподаватель: Денисов К.М.; ассистенты: Демидова Г.Л., Кононова М.Е., Цветкова М.Х., тыюторы Гурьянов В.А., Махин И.Е.

На кафедре реализуются многочисленные опытно-конструкторские проекты по созданию электроприводов прецизионных следящих систем наведения телескопов траекторных измерений. Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем Университета ИТМО, является головным предприятием Российского космического агентства в части исследования, проектирования, изготовления и ввода в эксплуатацию электросиловых приводов на базе высокоэффективных п/п преобразователей и компьютерных систем управления для квантово-оптических систем нового поколения. Разработанные электропривода используются в составе высокоточных оптико-электронных и лазерных комплексов для космической навигации и геодезии (система «Глонасс»), обзора и контроля космического пространства, полигонных испытаний и сертификации ракетного вооружения, а также контроля испытаний стратегических ракет, предусмотренного международными договорами в области ограничения стратегических вооружений.

На кафедре работает аспирантура и ведётся большая научно-исследовательская работа в том числе в созданной международной научной лаборатории «Силовая электроника и автоматизированный электропривод» (руководители: Валентин Сергеевич Томасов, доцент, кандидат технических наук, Рышард Стжелецки, профессор, Dr. habil. технических наук).

Основные направления исследований:

- Разработка алгоритмов прецизионного управления оптическими телескопами в том числе на инфразиных скоростях в условиях переменных внешних воздействий с учетом упругости механизмов и нелинейного характера сил сопротивления движению;
- Разработка и создание специального программно-математического обеспечения, реализующего современные алгоритмы управления, а также создание автоматизированных систем дистанционного управления электроприводами;
- Разработка методов идентификации сложных механических объектов, быстрого прототипирования прецизионных электромеханических систем, управляющих ими;
- Разработка и создание специализированных высокопроизводительных микропроцессорных систем многоконтурного управления электроприводами;
- Разработка и создание блоков силовой электроники для управления моментными электродвигателями в том числе энергоэффективных полупроводниковых преобразователей с возможностью двустороннего обмена энергией;
- Разработка устройств бесконтактной передачи энергии.

Демидова Галина Львовна
Лукичев Дмитрий Вячеславович

**Регуляторы на основе нечеткой логики в системах
управления техническими объектами**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ № 4730

Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО**
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49