

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автоматизированного электропривода

П.А. Воронин

# **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФАЗЗИ-ЛОГИКИ**

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования «Оренбургский государственный  
университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся  
по программам высшего профессионального образования по специальности  
140604.65 Электропривод и автоматика промышленных установок и  
технологических комплексов

Оренбург  
2012

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я 7  
В 75

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Э. Л. Греков

**Воронин, П.А.**  
В75 Системы управления на основе фаззи-логики: методические указания / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2012. - 26 с.

Методические указания предназначены для студентов специальности 140604.65 Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов очной и заочной формы обучения, изучающих соответствующие разделы дисциплины «Системы управления электроприводов».

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я 7

В 2202090100

© Воронин П.А. 2012  
© ОГУ, 2012

## Содержание

	Введение .....	4
1	Дискретные системы управления технологических комплексов, основанные на законах классической логики .....	5
2	Общие положения фаззи-логики.....	7
3	Термины и понятия фаззи-логики .....	9
4	Структура управляющего устройства и алгоритм фаззи-управления ....	14
5	Использование фаззи-управления в позиционных электроприводах ....	20
6	Особенности фаззи-управления, в основу которого положена фаззи-логика .....	23
7	Выводы .....	25
	Список использованных источников .....	26

## Введение

Системы управления, придающие необходимые свойства электроприводу производственных механизмов и одновременно выполняющие задачи автоматизации технологических процессов, представляют собой часть автоматизированного электропривода, который является конечным объектом изучения в дисциплине «Системы управления электроприводов». Эта дисциплина рассматривается как продолжение дисциплин «Теория электропривода» и «Теория автоматического управления».

Раздел дисциплины «Дискретные логические системы управления», посвященный логическим системам управления в электроприводах, построенным на основе законов классической логики на дискретных элементах (реле, бесконтактных логических элементах и узлах), предполагает наличие достаточной информации об объекте управления.

Современный уровень развития техники характеризуется неуклонным повышением разнообразия и сложности управляемых объектов в системах автоматического управления.

Появившиеся относительно недавно системы с фаззи-логикой расширяют функциональные возможности управления и оказываются более эффективными, чем традиционные системы, в выполнении задач управления для ряда сложных, трудно описываемых, нелинейных объектов управления, среди которых имеют место и электроприводы различного назначения и, прежде всего, позиционные электроприводы.

Цель данного пособия – ознакомить студента с основными понятиями фаззи-логики, алгоритмами фаззи-управления и структурой фаззи-регулятора, примерами фаззи-управления в электроприводах.

# **1 Дискретные системы управления технологических комплексов, основанные на законах классической логики**

В соответствии с ГОСТ Р 50369 понятие «Электропривод» конкретизирует объект управления, которым является двигатель (Д) совместно с механической передачей (МП) и электрическим преобразователем (П), - сильноточную часть, осуществляющую силовое воздействие на рабочий орган производственной установки, и систему управления электропривода (СУЭП), - слаботочную часть, формирующую алгоритм управления.

По функциональному назначению управление в электроприводах разделяется на два уровня: верхний - технологический, являющийся внешним уровнем относительно электропривода, и нижний - внутренний относительно электропривода. На верхнем уровне система управления СУЭП1 (по ГОСТ Р 50369 – система управления электроприводом) вырабатывает технологическое задание на движение рабочих органов отдельной технической установки (например, станка, крана, лифта) или целой технологической системы (например, системы водоснабжения, теплоснабжения, электроснабжения). В задачу СУЭП1 не входит формирование свойств собственно электропривода, его статических, динамических, точностных характеристик.

Данная задача возлагается на систему управления нижнего уровня СУЭП2 (по ГОСТ Р 50389 – система управления электропривода), которая является неотъемлемой частью понятия «электропривод».

Таким образом, рабочий орган (РО), движущийся при работе двигателя, но физически принадлежащий производственной установке (рабочей машине), рассматривается как составная часть понятия «технологический комплекс». Это сделано по тем соображениям, что СУЭП1, СУЭП2, П, Д, МП, РО, имеющие друг с другом внешние и внутренние прямые и обратные связи, образуют совместно единую динамическую электромеханическую систему (рисунок 1.1). В этой системе входом является задающий сигнал на СУЭП1, выходом - движение РО (или движения нескольких РО). Только при совместном рассмотрении составных частей данной электромеханической системы можно определить все статические и динамические показатели и оценить качество конкретно электропривода.

Структурная схема электромеханической системы технологического комплекса представлена на рисунке 1.1.

В терминологии заводов-изготовителей электропривод как изделие именуется комплектным электроприводом, в состав которого входят СУЭП2, электрический преобразователь и двигатель, а иногда и редуктор.

В чем конкретно состоят задачи, возлагаемые на СУЭП1 и СУЭП2, рассмотрим на примере электропривода лифта. Система СУЭП1 выполняет задачу автоматизации работы лифта: вырабатывает команды автоматического выбора направления движения кабины, начала движения, торможения и остановки, определения этажей для остановок. Система СУЭП2 формирует плавные динамические процессы разгона и торможения двигателя, обеспечивает необходимые для точной остановки диапазон регулирования скорости и жесткость механических характеристик двигателя. Различаясь функционально, СУЭП1 и СУЭП2 конст-

руктивно могут быть выполнены из разных блоков, но могут и объединяться в общей панели управления или в современном едином универсальном управляющем устройстве - программируемом контроллере.

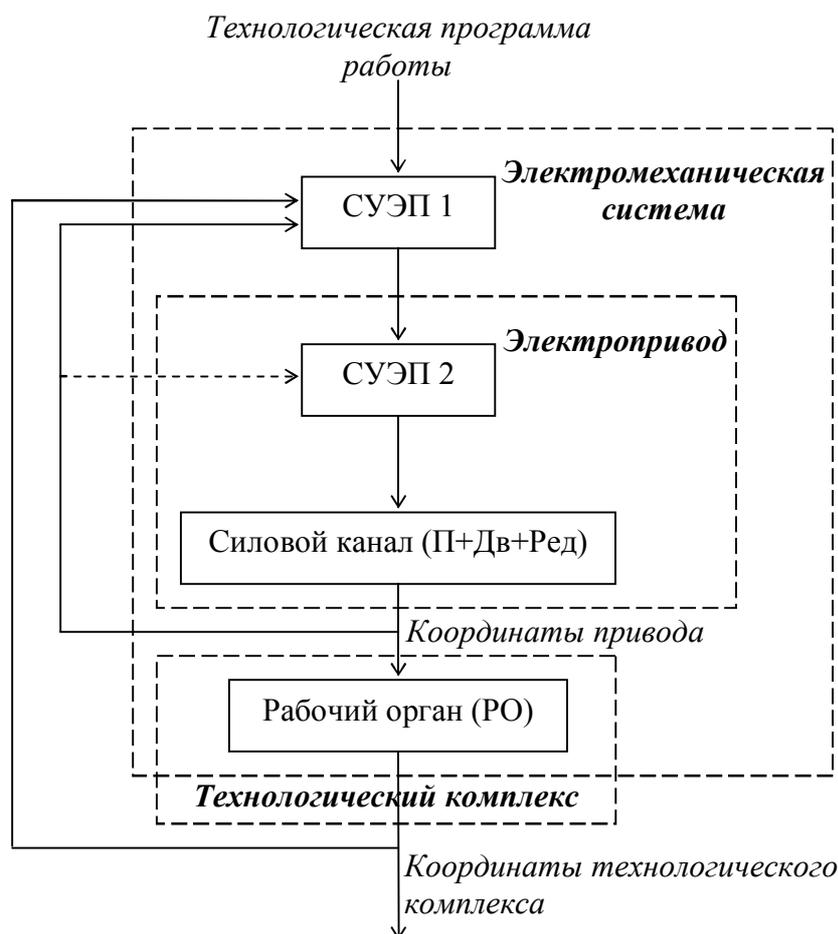


Рисунок 1.1- Структурная схема электрохимической системы технологического комплекса

Таким образом, дополнительными признаками классификации систем управления технологических комплексов являются:

- уровень управления: верхний (технологический); нижний (формирующий свойства электропривода);
- тип алгоритма управления: линейный; нелинейный; аналитический; логический на основе жесткой (классической) логики; логический на основе нежесткой логики (фаззи-логики);
- технологическая координата электропривода: скорость рабочего органа; положение рабочего органа;
- технологическая координата технологического комплекса: положение рабочих органов комплекса; давление в магистрали; температура оборотной воды.

В базовых разделах дисциплины «Системы управления электроприводов» рассматриваются вопросы анализа и синтеза дискретных логических систем управления (ДЛСУ), построенных на двухуровневых дискретных элементах релейного типа. Данные ДЛСУ успешно решают задачи автоматизации работы электроприводов в технологических циклах и относятся к верхнему уровню управления. Методической основой построения ДЛСУ является классическая логика с булевой алгеброй.

ДЛСУ в состоянии решать и некоторые задачи нижнего уровня управления, выполняя функцию регулятора с несложным нелинейным алгоритмом релейного действия.

Достоинствами логической формы алгоритма управления можно считать простоту ее выражения и отсутствие требования иметь аналитическое описание объекта управления.

Традиционный подход к постановке и решению задач управления и регулирования основывается на предположениях, что модель объекта управления (ОУ) известна и задана в виде передаточных функций его отдельных каналов или в форме системы дифференциальных уравнений, связывающих его входные и выходные переменные, и что при известной цели управления алгоритм функционирования управляющего устройства (УУ) однозначно предопределяется этой моделью и целью управления. Причем, решается данная задача синтеза алгоритма УУ с помощью строгих аналитических методов математики.

Однако в реальной практике автоматизации сложных технологических процессов и производств редко удается построить достаточно точную математическую модель ОУ и применить строгую однозначную процедуру синтеза алгоритма управления. Поэтому большинство функционирующих в промышленности автоматических и автоматизированных систем управления создано с использованием не только методов теории управления, но и опыта и интуиции специалистов по автоматизации, эвристических знаний технологов.

Классическая логика с двумя качественными или количественными уровнями (истинно-ложно, да - нет, единица - ноль) не позволяет описать многообразие, многоцветность мира и ассоциативный (объединяющий в общие понятия) способ мышления человека.

Этот пробел выполняет фаззи-логика, использующая многоуровневое представление физических величин и утверждений.

В качестве алгоритмов управления объектом в практике автоматизации технологических процессов и производств используют: линейный; нелинейный; аналитический; логический на основе жесткой (классической) логики; логический на основе нежесткой логики (фаззи-логики).

## **2 Общие положения фаззи-логики**

В последние годы в автоматике, компьютерной технике, теории принятия решений, системах искусственного интеллекта используются модели и методы, основанные на теории нечетких множеств (ТНМ), возникшей на стыке математики

ческой теории множеств и математической логики. Ее первые основы были сформулированы в 1965 году американским математиком Лотфи А. Заде в статье «Fuzzy Sets», название которой переводится на русский язык как «нечеткие множества». У нас в стране используется наряду с понятием «нечеткий» слово «фаззи». На основе этой теории появилось фаззи-управление, одним из первых практических применений которой является разработанный в 1975 году Эбрахимом Мамдани алгоритм, предложенный в качестве метода для управления парогенератором. Предложенный им алгоритм, основанный на нечетком логическом выводе, позволил избежать чрезмерно большого объема вычислений и был по достоинству оценен специалистами. Этот алгоритм в настоящее время получил наибольшее практическое применение в задачах нечеткого моделирования.

К настоящему времени фаззи-технология превратилась в мощное, весьма практичное средство синтеза систем управления. Фаззи-системы и фаззи-контроллеры применяются сегодня как для управления сложными технологическими процессами, так и для автоматизации простых бытовых приборов. Применительно к электроприводу фаззи-логика используется для определенного класса задач управления как верхнего, так и нижнего уровней.

В классической логике физические величины и утверждения делятся жестко, бескомпромиссно на два уровня. В фаззи-логике кроме крайних двух уровней имеются и промежуточные, при этом переход от одного уровня к другому не резкий, а с перекрытием соседних уровней (таблица 2.1). Для определенных физических величин и фактов их двухуровневое классическое представление «истинно - ложно», «да - нет» полностью справедливо и точно. Например, на вопрос, движется ли рабочий орган, можно ответить только однозначно «да» или «нет». Но на вопрос, как движется рабочий орган (быстро, медленно, очень медленно), двухуровневая логика не дает ответ, а фаззи-логика позволяет его получить.

Таблица 2.1 Примеры уровней в классической логике и в фаззи-логике

Физическая величина или утверждение	Уровни в классической логике	Уровни в фаззи-логике
Световой фон	Белый - черный	Белый - светло-серый - темно-серый - черный
Тепловой режим	Холодный - теплый	Холодный - прохладный - теплый - жаркий
Скорость движения	Нулевая - ненулевая	Нулевая - малая - средняя - большая
Утверждение какого-либо факта	Да - нет	Да - скорее да, чем нет - ни да, ни нет - скорее нет, чем да - нет

Выделение уровней в логике - это ассоциативное свойство мышления человека, когда качественная характеристика физических величин и процессов, формируемая словесно (прилагательными, наречиями), оценивается количественно не отдельными числами, а некоторыми числовыми множествами с нерезкими границами.

Фаззи-логика является основой некоторых интеллектуальных систем управления, в которых моделируется процесс мышления человека - процедура принятия им решения. Схема данного процесса такова: оценка условий ситуации - их восприятие - принятие решения (логическое заключение) на основе базы знаний.

К интеллектуальным относят сегодня многие системы управления, в том числе системы с фаззи-управлением (СФУ).

Достоинство СФУ – возможность для сложных и трудно математически описываемых объектов управления сформулировать на логической основе необходимые алгоритмы управления при многих входных переменных. Это позволяет повысить качество автоматизированного технологического процесса многих производственных систем. К данным системам можно отнести различные тепловые системы химического и фармацевтического производства, пищевой промышленности, системы газо- и теплоснабжения. В указанных системах общий регулятор технологического процесса с использованием фаззи-управления формирует задание, обрабатываемые позиционным электроприводом (ПЭП), на необходимые перемещения рабочих органов типа регулируемых механических вентилях, осуществляющих дозированную подачу газа, пара, воды и других жидкостей в соответствующих технологических установках. Данные рабочие органы приводятся в движение электроприводами, работающими в режимах позиционирования и являющимися по существу непосредственными регуляторами технологического процесса.

В автоматизированных технологических процессах могут использоваться и некоторые подъёмно-транспортные и робототехнические установки, в которых требуемые перемещения должны выполняться соответствующими позиционными электроприводами в автоматическом режиме.

От того, насколько качественно данные позиционные электроприводы осуществляют заданные технологическим регулятором перемещения рабочих органов, зависит и качество управляемого технологического процесса. Задачу – получить наибольшее быстродействие при отсутствии перерегулирования и в пределах требуемой точности позиционирования, можно считать актуальной задачей оптимизации рассматриваемой группы позиционных электроприводов по технологическому признаку.

### **3 Термины и понятия фаззи-логики**

Фундаментальным понятием фаззи-логики является фаззи-множество (ФМ). В математической логике есть общее понятие множества как совокупности объектов, каждый из которых должен обладать или не обладать определенным свойством. Это множество характеризуется только одним показателем, все его объекты равноценны относительно определяющего его свойства. В отличие от данного понятия множества фаззи-множество характеризуется двумя показателями, во-первых, фактом принадлежности объектов к множеству и, во-вторых, степенью их принадлежности к данному множеству. Применительно к техническим системам объектами ФМ являются значения некоторой физической переменной,

например, значения температуры, скорости перемещения, электрического напряжения, тока и т.д. Словесное (лингвистическое) выражение физической переменной считается логической переменной в фаззи-логике. Свойством, объединяющим значения физической переменной в ФМ, является выделенная некоторая качественная оценка в лингвистической форме для логической переменной, например, отрицательная большая (NB), отрицательная средняя (NM), отрицательная малая (NS), нулевая (Z), положительная малая (PS), положительная средняя (PM), положительная большая (PB). Качественные оценки ФМ (NS, Z, PM и др.) называются термами.

Степень принадлежности значений физической переменной  $x$  к ФМ, к данному терму, определяется так называемой функцией принадлежности (ФП)  $\mu(x)$ . Значения ФП определяются в пределах от 0 до 1 на интервале от  $x = a$ , где  $\mu(a) = 0$ , до  $x = b$ , где  $\mu(b) = 0$ . Внутри интервала  $[a, b]$  есть точка  $x = c$ , где  $\mu(c) = 1$ . По своему виду (рисунок 3.1,а) функция  $\mu(x)$  напоминает функцию распределения вероятности принадлежности значений  $x$  интервалу  $[a, b]$  с максимумом плотности вероятности, равным 1 в точке  $x = c$  и с плавным уменьшением от 1 в обе стороны до 0. Сходство  $\mu(x)$  с функцией распределения вероятности лишь внешнее, а по существу, определение параметров ФП (формы, места расположения центра  $c$  и границ интервала  $x$ ) возлагается на эксперта в соответствующей области. Часто функция принадлежности имеет вид треугольника (рисунок 3.1,б).

«Треугольная» функция принадлежности переменной  $x$  в общем случае может быть задана аналитически следующим выражением:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{c - a}, & a \leq x \leq c \\ \frac{b - x}{b - c}, & c \leq x \leq b \\ 0, & b \leq x, \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $a, b, c$  - некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные соотношением:  $a \leq c \leq b$ .

Физическая переменная на заданном интервале  $X$  ее изменения от  $x_{\min}$  до  $x_{\max}$  характеризуется рядом ФМ ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ) с функциями принадлежности  $\mu_1(x), \dots, \mu_n(x)$ .

На рисунке 3.1 в качестве примера переменная температура помещения представлена термами: положительная низкая (PS) для  $x = T^0 = 4 \dots 17$  °С; положительная средняя (PM) для  $x = 12 \dots 27$  °С; положительная высокая (PB) для  $x > 23$  °С. Выделенным ФМ  $A_1, A_2, A_3$  соответствуют ФП  $\mu_1(x), \mu_2(x), \mu_3(x)$  с центрами  $c_1, c_2, c_3$ , в которых  $\mu(x) = 1$ . Сама суть фаззи-логики в ее нежесткости и приближенности обуславливает наличие участков перекрытия термов, где нарушается однозначность принадлежности значений переменной  $x$  только одному терму. Ширина участков перекрытия может быть различной, в пределе и нулевой. Но макси-

мальная ширина ограничивается очевидным условием: там, где для одного терма  $\mu(x)$  равна 1, для другого может быть меньше 1 с исходным условием, равным 0.

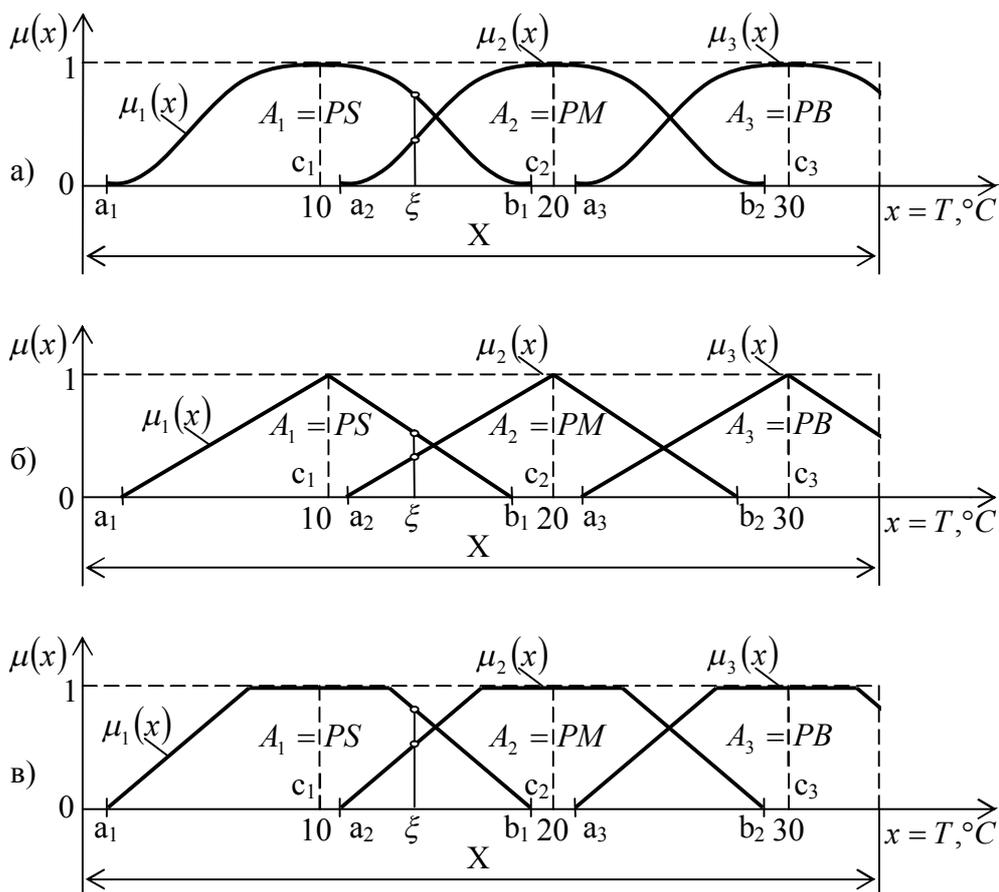


Рисунок 3.1 - Пример фаззи-множеств и функций принадлежности:

- а) форма функции принадлежности – в виде функции распределения вероятности;
- б) форма функции принадлежности – треугольная;
- в) форма функции принадлежности – трапецеидальная.

При построении ФП приоритетное значение приобретает расстановка центров ФП, где имеет место  $\mu(c_i) = 1$ , что означает бесспорную принадлежность значения  $x = c_i$ , к соответствующему терму. Если ФП для температуры помещения составлены экспертом-медиком, то температура  $T = 20 ^\circ C$  как наиболее комфортная для самочувствия человека будет принята за среднюю,  $T = 10 ^\circ C$  - за бесспорно низкую, когда требуется включение обогревателя, а  $T = 30 ^\circ C$  - за бесспорно высокую, когда требуется включение кондиционера.

При  $T = 13 ^\circ C$ , температура относится одновременно к двум термам PS и PM, поэтому возникает проблема, какое из двух значений ФП принять. Данная проблема решается компромиссно на основе принципов совмещения множеств, известных из математической логики, в форме трех операций:

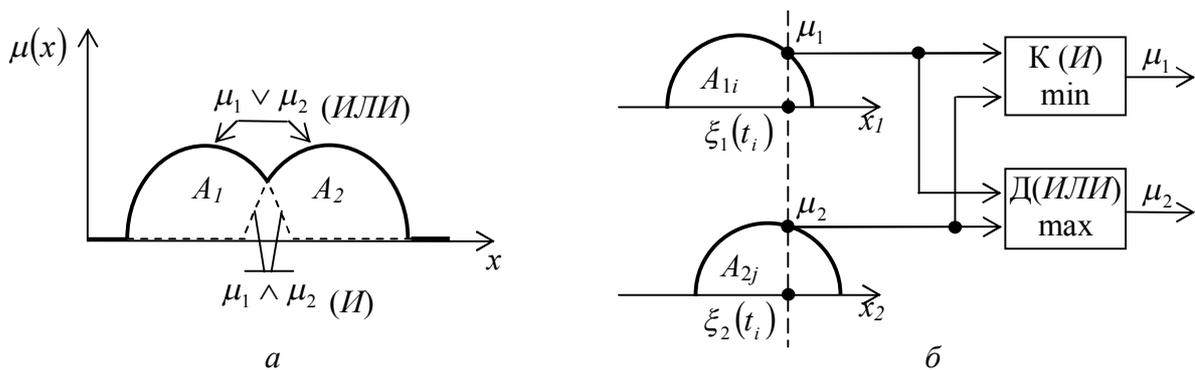


Рисунок 3.2 - Операции усреднения (И) и объединения (ИЛИ) фаззи-логики для одной переменной (а) и для двух разных переменных (б)

- усреднения, или конъюнкции (перемножение):

$$K(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1, \mu_2) \text{- принцип минимума;} \quad (3.2)$$

- объединения, или дизъюнкции (сложение):

$$D(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2) \text{- принцип максимума;} \quad (3.3)$$

- инверсии или дополнения:

$$\overline{\mu(x)} = 1 - \mu(x). \quad (3.4)$$

Операции К и D взаимосвязаны:

$$K = 1 - D; \quad D = 1 - K. \quad (3.5)$$

Результат операций усреднения и объединения фаззи-множеств  $A_1$  и  $A_2$  одной переменной  $x$  приведен на рисунке 3.2,а. Штриховая линия означает конъюнкцию двух ФП ( $\mu_1 \wedge \mu_2$ ), сплошная линия - дизъюнкцию двух ФП ( $\mu_1 \vee \mu_2$ ). Операции усреднения и объединения ФМ  $A_1$  и  $A_2$  двух разных переменных  $x_1$  и  $x_2$  выполняются в каждый фиксированный момент времени  $t_i$  также по принципам минимума и максимума (рисунок 3.2,б). Аналогичные операции могут применяться и для большего числа ФМ и переменных. Нетрудно убедиться в том, что фаззи-логические операции (3.2) – (3.5) при частных значениях  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , равных 1 и 0, полностью подчиняются правилам классической алгебры логики.

Приведенные выше операции позволяют принять одно определенное значение функции принадлежности в зоне взаимного перекрытия фаззи-множеств. Это дает основание для принятия определенного решения и относительно значения выходной переменной  $y$ , являющейся управляющим воздействием в системе с фаззи-управлением.

Пример 3.1. Процедура фаззификации двух входных переменных  $x_1$  и  $x_2$  фаззи-регулятора.

На интервале изменения  $[-1, +1]$  физических значений переменных  $x_1$  и  $x_2$  в качестве лингвистических переменных принимаются три терма: отрицательная высокая NB, нулевая ZR, положительная высокая PB с треугольной и трапецеидальной формой функций принадлежности (рисунок 3.3).

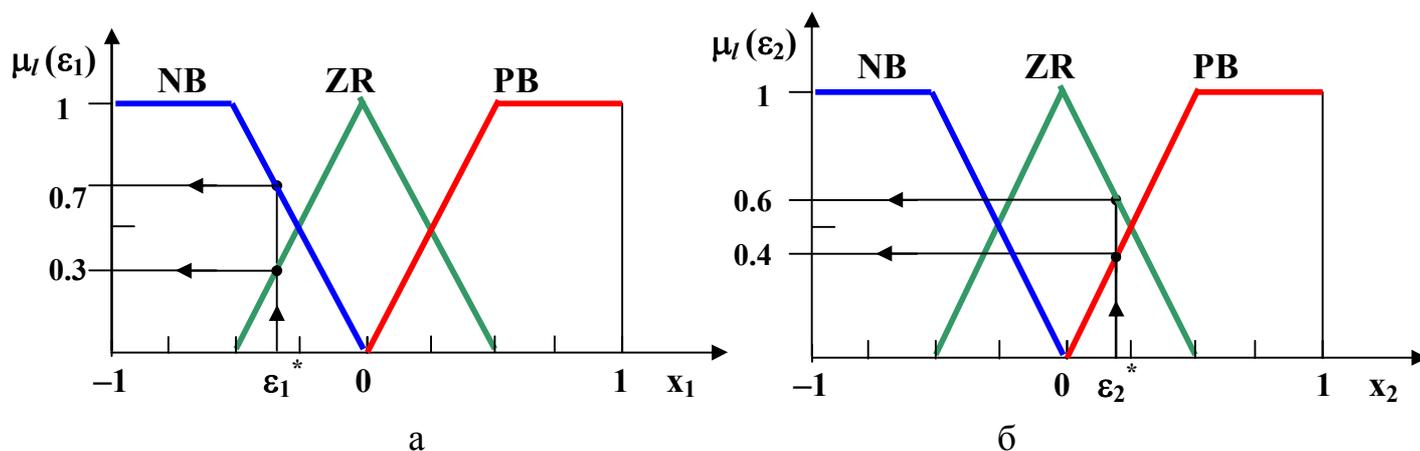


Рисунок 3.3 – Процедура фаззификации двух входных переменных

Пусть входные переменные имеют конкретные значения для текущего времени  $t_1$ :

$$x_1(t_1) = \epsilon_1^* = -0,35 \text{ и } x_2(t_1) = \epsilon_2^* = +0,20. \quad (3.6)$$

В соответствии с рисунком 3.3,а определяем значения функций принадлежности термов  $A_{11} = \text{NB}$ ,  $A_{12} = \text{ZR}$ ,  $A_{13} = \text{PB}$  для  $\epsilon_1^* = -0,35$ :

$$\mu_{11} = 0,7, \quad \mu_{12} = 0,3 \quad \mu_{13} = 0. \quad (3.7)$$

В соответствии с рисунком 3.3,б определяем значения функций принадлежности термов  $A_{21} = \text{NB}$ ,  $A_{22} = \text{ZR}$ ,  $A_{23} = \text{PB}$  для  $\epsilon_2^* = +0,20$ :

$$\mu_{21} = 0, \quad \mu_{22} = 0,6 \quad \mu_{23} = 0,4. \quad (3.8)$$

## 4 Структура управляющего устройства и алгоритм фаззи-управления

Как и в любой традиционной системе, в системе фаззи-управления можно выделить управляющую часть - систему управления, воздействующую на объект управления. Собственно система фаззи-управления (управляющее устройство) состоит из четырех блоков, выполняющих последовательно в три этапа процедуру формирования алгоритма управления как функции управляющих воздействий у от входных переменных  $x_1, x_2, x_n$ . На рисунке 4.1 изображена блочная структура системы фаззи-управления для одного управляющего воздействия у и двух входных переменных  $x_1, x_2$ .

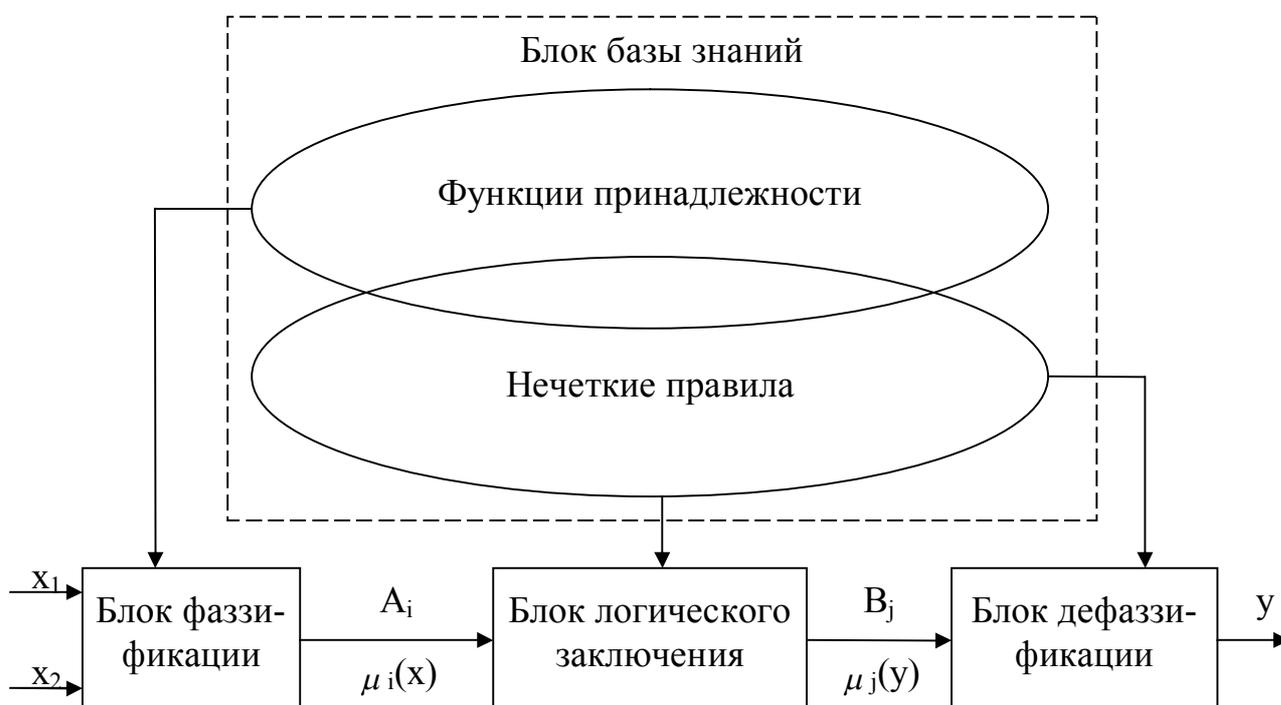


Рисунок 4.1 - Блочная структура системы фаззи-управления для одного управляющего воздействия

Записи, определяющие взаимосвязь входных и выходных переменных функций фаззи-логики, называются правилами. Набор правил является алгоритмом фаззи-управления.

Блок фаззификации преобразует входные физические переменные ( $x_1, x_2, x_n$ ) в термы  $A_i$  - лингвистические переменные и выделяет для каждого момента времени (или для каждого временного такта) значения функций принадлежности  $\mu_i(x)$  для активизированных правил.

Блок логического заключения в соответствии с правилами, заложенными предварительно экспертом в блок базы знаний, определяет термы  $B_j$ , выходной лингвистической переменной и присваивает им согласно принципам фаззи-логики значения функций принадлежности  $\mu_j(y)$ .

Блок дефаззификации преобразует термы  $V_j$  в физический управляющий сигнал  $u$ . Если фаззи-устройство (ФУ) должно вырабатывать несколько управляющих воздействий, то такое многоканальное ФУ можно рассматривать как несколько параллельно работающих ФУ.

Основу алгоритма фаззи-управления составляет свод правил, который находится в базе знаний [2, 3]. Для  $n$  входных переменных, каждая из которых имеет  $m$  термов, максимальное число правил  $N_{\max} = m^n$ . Правила составляются специалистом-экспертом на основании его понимания задачи управления.

Если объект управления имеет полное математическое описание, то за основу может быть принят найденный линейный алгоритм, решающий заданную задачу управления линеаризованным объектом. Соответствующие найденному алгоритму правила проверяются (экспериментально или расчетным методом) и при необходимости корректируются.

Правила составляются с учетом следующих рекомендаций:

- свод правил должен быть достаточно полным для выполнения поставленной задачи управления, не должно быть неучтенных возможных ситуаций с измеряемыми координатами, уводящих процесс из-под контроля;

- желательно, чтобы каждое правило было простым, содержало одно условие и одно заключение и выражалось в виде высказывания «ЕСЛИ ... [посылка], ТО ... [заключение]»;

- для получения более качественного процесса управления не должно оставаться не перекрытых фаззи-множеств хотя бы двумя правилами;

- чем разнообразнее тестовые сигналы в процессе составления алгоритма, тем менее чувствительную к появлению в условиях эксплуатации непредусмотренных возмущающих воздействий систему можно получить.

Часто каждая посылка в нечетком правиле содержит высказывания относительно двух входных переменных, соединенные союзом «И», либо союзом «ИЛИ», например: ЕСЛИ ошибка регулирования  $\delta(t) = x_1$  положительно малая (PS) И производная ошибки  $\frac{d}{dt} \delta(t) = x_2$  положительно большая (PB), ТО управляющее воздействие  $u_j(t)$  отрицательно среднее (NM).

Дополнительно к своду правил в состав алгоритма управления входят функции принадлежности, определяющие количественную взаимосвязь физических переменных с лингвистическими, т.е. с термами. Для простоты математического описания функции принадлежности (ФП) представляются обычно в треугольной или трапецеидальной форме. Важными количественными показателями являются значения левой ( $a$ ) и правой ( $b$ ) границ, а также центра ( $c$ ) функции принадлежности. Число ФП, приходящихся на каждую физическую переменную, выбирают из соображений качества управления. С увеличением числа ФП качество управления повышается, однако при этом усложняется алгоритм и повышаются требования к быстродействию аппаратной части управляющего устройства. Практика построения систем с фаззи-управлением показала, что трех-пяти ФП для каждой входной переменной и пяти-семи ФП для выходной переменной оказывает

ся достаточно для приемлемого качества решения задач управления, например, в электроприводе или в системе автоматизации.

Для простых, но достаточно распространенных вариантов фаззи-управления с двумя входными ( $x_1$  и  $x_2$ ) и одной выходной ( $y$ ) переменными свод правил может быть представлен компактно в виде таблицы правил.

Если каждая из двух входных переменных имеет пять термов (NB, NS, Z, PS, PB), а выходная переменная, являющаяся управляющим воздействием, - семь термов (NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB), и использовано максимальное число правил, то традиционный алгоритм фаззи-управления имеет вид, представленный на рисунке 5.3.

Если существуют какие-либо недопустимые сочетания входных переменных или принимается упрощенный алгоритм фаззи-управления, количество правил уменьшается, а в таблице правил остаются незаполненными часть клеток (рисунок 4.2).

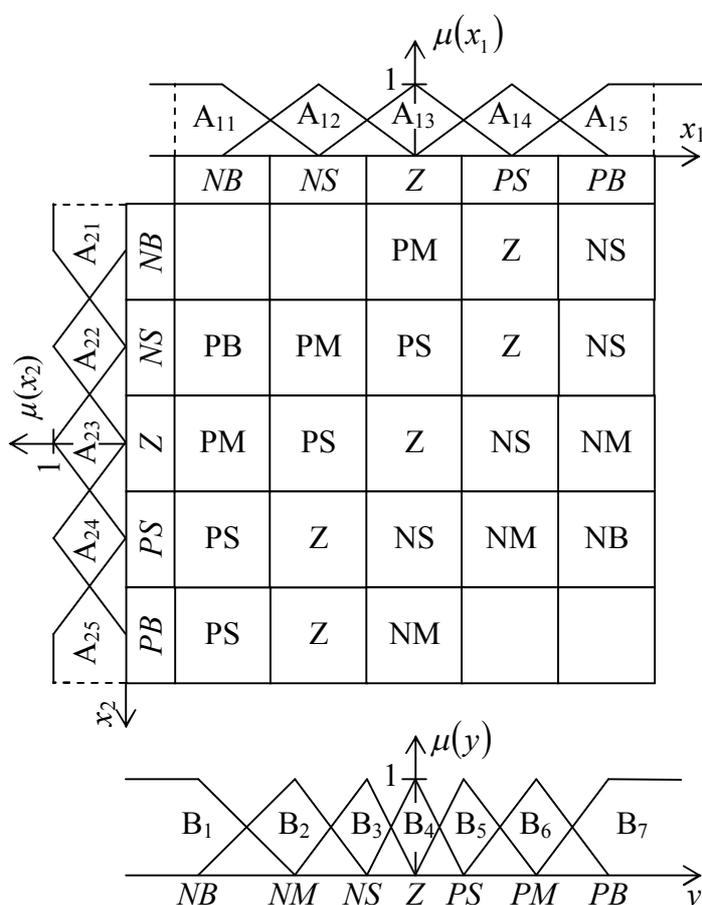


Рисунок 4.2 - Табличное представление алгоритма фаззи-регулятора с двумя входными и одной выходной переменными

В соответствии с лингвистическим правилом нечеткого заключения (импликация), предложенным Мамдани (мини-максный метод Мамдани), для находж-

дения совместной функции принадлежности  $\mu_j(x_1, x_2)$ , характеризующей конкретное (частное)  $j$ -е правило нечеткого логического заключения, применяется логическая операция конъюнкция:

$$\mu_j(x_1, x_2) = \min \{ \mu(x_1), \mu(x_2) \}. \quad (4.1)$$

Результирующая функция принадлежности  $\mu_{рез}(y)$ , которая характеризует всю совокупность  $j$ -х правил, соединенных между собой союзом «ИЛИ» (логическая операция дизъюнкция), определяется как максимум для всех функций (3.3) при заданных входных переменных:

$$\mu_{рез}(y) = \max \{ \mu_j(x_1, x_2) \}. \quad (4.2)$$

В этом логическом заключении заложен некоторый компромисс при принятии решения: минимизация входных фаззи-множеств компенсируется определенным образом максимизацией выходного фаззи-множества. Полученный результирующий терм  $V(y)$  определяет множество возможных значений управляющего воздействия  $y$ .

Пример 4.1. Процедура фаззи-импликации по Мамдани.

Термы NB, ZR, PB входных переменных  $x_1$  и  $x_2$  и их вид, конкретные значения  $\varepsilon_1^*$  и  $\varepsilon_2^*$  входных переменных для текущего времени  $t_1$ , значения функций принадлежности  $\mu_{11}(\varepsilon_1^*)$ ,  $\mu_{12}(\varepsilon_1^*)$ ,  $\mu_{13}(\varepsilon_1^*)$ ,  $\mu_{21}(\varepsilon_2^*)$ ,  $\mu_{22}(\varepsilon_2^*)$ ,  $\mu_{23}(\varepsilon_2^*)$  соответствуют примеру 3.1 и рисунку 3.3. Выходное управляющее воздействие  $y$  на отрезке  $[-1, +1]$  представлено в лингвистической форме тремя термами со значениями: отрицательное большое NB, нулевое ZR, положительное большое PB и с функциями принадлежности треугольной и трапецеидальной формы.

Пусть фрагмент некоторого алгоритма нечеткого управления, составленного экспертом, и действующий в области текущих значений входных переменных  $x_1$  и  $x_2$ , в текущий момент времени  $t_1$ , будет представлен правилами:

$$\text{Правило 1: Если } \varepsilon_1 \in NB \text{ и } \varepsilon_2 \in PB, \text{ то } y \in PB. \quad (4.3, \text{ а})$$

$$\text{Правило 2: Если } \varepsilon_1 \in NB \text{ и } \varepsilon_2 \in ZR, \text{ то } y \in ZR. \quad (4.3, \text{ б})$$

$$\text{Правило 3: Если } \varepsilon_1 \in ZR \text{ и } \varepsilon_2 \in PB, \text{ то } y \in PB. \quad (4.3, \text{ в})$$

Тогда согласно логической операции конъюнкции (4.1) посылы «если» правил (4.3а – 4.3в), содержащих в себе союз «и», дают следующие значения совместных функций принадлежности выходных термов:

$$\mu_1(y) = \min \{ \mu_{11}(\varepsilon_1^*), \mu_{23}(\varepsilon_2^*), PB \} = \min \{ 0,7; 0,4 \} = \mu_{23}(\varepsilon_2^*) = 0,4, \quad (4.4, \text{ а})$$

$$\mu_2(y) = \min \{ \mu_{11}(\varepsilon_1^*), \mu_{22}(\varepsilon_2^*), ZR \} = \min \{ 0,7; 0,6 \} = \mu_{22}(\varepsilon_2^*) = 0,6, \quad (4.4, \text{ б})$$

$$\mu_3(y) = \min \{ \mu_{12}(\varepsilon_1^*), \mu_{23}(\varepsilon_2^*), PB \} = \min \{ 0,3; 0,4 \} = \mu_{12}(\varepsilon_1^*) = 0,3, \quad (4.4, \text{ в})$$

Графическая интерпретация функций принадлежности  $\mu_1(y)$ ,  $\mu_2(y)$ ,  $\mu_3(y)$  термов управляющего воздействия  $y$  представлена на рисунке 4.3, а. Так как функции принадлежности принимают конкретные значения в пределах  $0 \div 1$ , то операциям конъюнкции по Мамдани соответствуют «усеченные» исходные функции принадлежности (жирные линии на рисунке 4.3, а).

В соответствии с (4.2) определяем результирующую функцию принадлежности (логическая операция дизъюнкция или фаззи-объединение), характеризующую фаззи-множество управляющего воздействия  $y$ :

$$\mu_p^*(y) = \max \{ \mu_1(y), \mu_2(y), \mu_3(y) \} = \mu_1(y) + \mu_2(y) \quad (4.5)$$

Графическая интерпретация фаззи-множества управляющего воздействия  $y$ , удовлетворяющего функции принадлежности (4.5), представлена на рисунке 4.3, в.

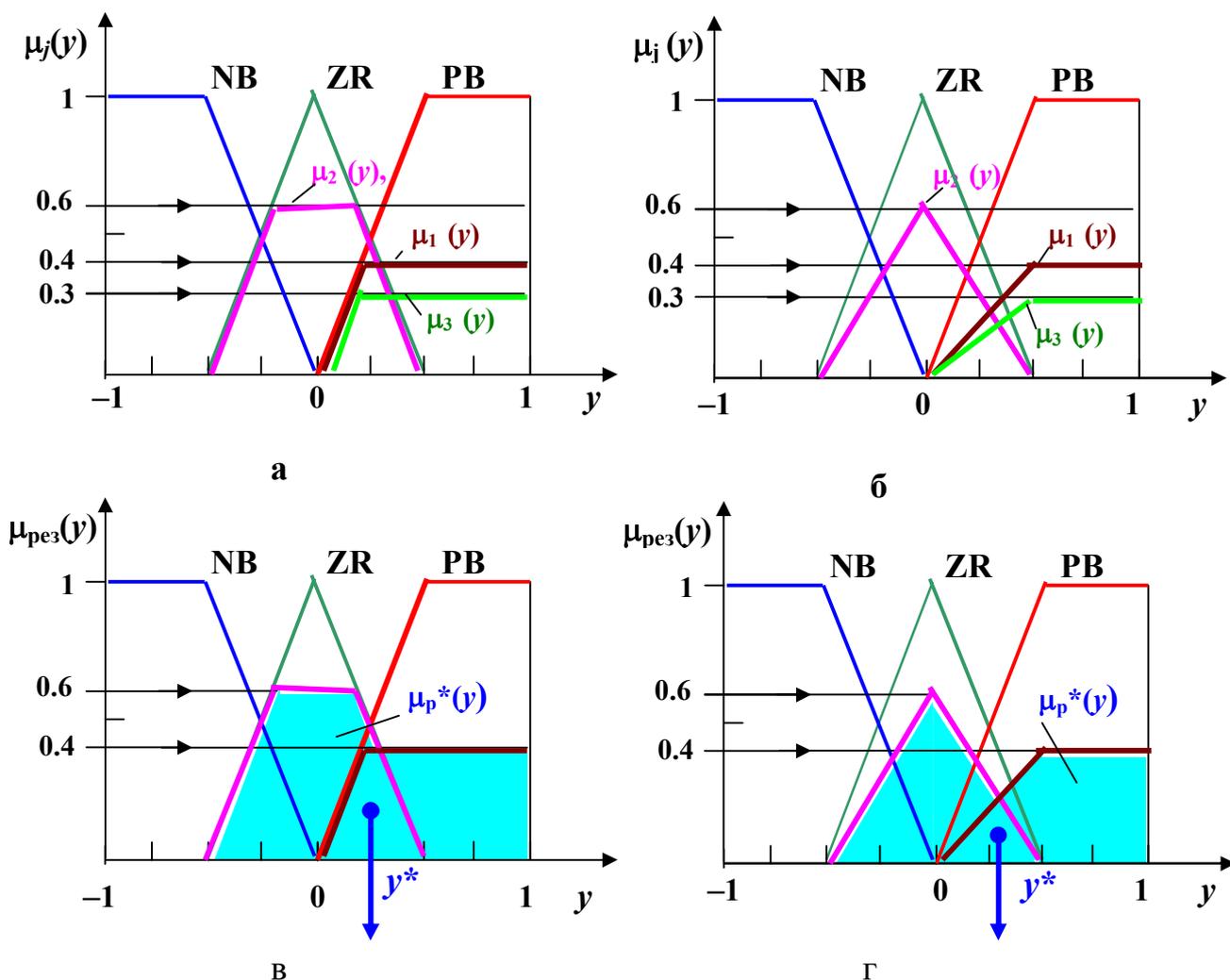


Рисунок 4.3 - Примеры функций принадлежности отдельных (а, б) и результирующих (в, г) импликаций нечеткого алгоритма управления по Мамдани (а,в) и Ларсену (б,г)

На этапе дефаззификации производится обратное преобразование к четким (физическим) величинам управляющего воздействия  $y$ . Синтез управляющего воздействия  $y$  на отрезке  $[a, b]$  может быть произведен методом Мамдани, или методом поиска центра масс фигуры:

$$y = \frac{\int_a^b y \cdot \mu(y) \cdot dy}{\int_a^b \mu(y) \cdot dy} . \quad (4.6)$$

Реализовать данную функцию напрямую затруднительно. Но существует упрощенная модификация метода Мамдани, которая может использоваться при некоторых допущениях.

Допущения:

1) будем полагать, что полученная фигура есть сумма площадей трапеций (пренебрегаем ошибкой вызванной наложением фигур):

$$\int_{a_1}^{b_2} y \cdot \mu(y) \cdot dy = \int_{a_1}^{b_1} y \cdot \mu_1(y) \cdot dy + \int_{a_2}^{b_2} y \cdot \mu_2(y) \cdot dy , \quad (4.7)$$

2) заменим трапецию – треугольником, пренебрегаем ошибкой, вызванной разностью площадей этих фигур.

Таким образом, можно записать упрощенную формулу Мамдани:

$$y_{\text{Вых}} = \frac{\mu_1 \cdot S_{10} \cdot c_1 + \mu_2 \cdot S_{20} \cdot c_2}{\mu_1 \cdot S_{10} + \mu_2 \cdot S_{20}} . \quad (4.8)$$

Общий вид упрощенной формулы Мамдани:

$$y_{\text{Вых}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot S_{i0} \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot S_{i0}} , \quad (4.9)$$

где  $\mu_i$  - функция принадлежности терма  $V_i$ ,

$c_j$  – центр выходного терма  $V_j$ ,

$S_{j0} = (b_j - a_j)$  – основание терма-треугольника  $V_j$ .

Пример 4.2. Обратное преобразование к четкой величине управляющего воздействия по методу центра тяжести (ЦТ) Мамдани.

Исходные данные соответствуют примерам 3.1, 4.1 и рисункам 3.3, 4.3.

Четкая величина управляющего воздействия  $y^*$ , полученная в соответствии с (4.6) представлена на рисунке 4.3, в. Для отрезка  $[-1, +1]$ , определяющего

диапазон изменения физической величины управляющего воздействия  $y$ , точное значение  $y^*$  для фиксированных значений  $x_1, x_2, t$  составляет:

$$y^* = + 0,25. \quad (4.10)$$

Если воспользоваться упрощенным выражением (4.8) для определяемых по рисунку 4.3, в параметров фаззи-множества управляющего воздействия:  $a_2 = - 0,5; b_2 = 0,5; c_2 = 0; \mu_2(y) = 0,6; a_3 = 0; b_3 = 1; c_3 = 0,5$ , получим:

$$y^* = \frac{\mu_2(y) \cdot (b_2 - a_2) \cdot c_2 + \mu_3(y) \cdot (b_3 - a_3) \cdot c_3}{\mu_2(y) \cdot (b_2 - a_2) + \mu_3(y) \cdot (b_3 - a_3)} = \frac{0,6 \cdot [0,5 - (-0,5)] \cdot 0 + 0,4 \cdot (1 - 0) \cdot 0,5}{0,6 \cdot [0,5 - (-0,5)] + 0,4 \cdot (1 - 0)} = 0,2. \quad (4.11)$$

Помимо метода центра тяжести (ЦТ) Мамдани на практике используется метод максимума (ММ) Ларсена. Лингвистическое правило нечеткого заключения по Ларсену для совместной функции принадлежности представляет собой операцию математического умножения частного решения на весовой коэффициент  $\alpha_{ij}$ , равный минимальному значению функций принадлежности, соответствующих конкретным входным воздействиям, а результирующая функция принадлежности  $\mu_{рез}(y)$  определяется путем объединения нечетких подмножеств:

$$\alpha_{ij} = \min (\mu_{A1i}, \mu_{A2j}) \quad (4.12)$$

$$\mu_{рез}(y) = \max [\mu_j(x_1, x_2) \times \min (\mu_{A1i}, \mu_{A2j})] \quad (4.13)$$

Примеры функций принадлежности по Ларсену приведены на рисунке 4.3, б, г. Точное значение  $y^*$  для фиксированных значений  $x_1, x_2, t$  по Ларсену составляет:

$$y^* = + 0,3. \quad (4.13)$$

Разброс значений  $y^*$ , полученных по выражениям (4.6, 4.8, 4.13) не превышает 20%.

Стратегия ЦТ дает лучшие результаты в установившемся режиме из-за меньшей среднеквадратичной ошибки, а стратегия ММ – для переходного режима.

## 5 Использование фаззи-управления в позиционных электроприводах

Позиционный электропривод (ПЭП) – электропривод, основным требованием к которому является точность останова, то есть позиционирование с заданной точностью (лифты, промышленные роботы, механизмы передвижения кранов, вентили и задвижки систем водо- и теплоснабжения).

Для электроприводов позиционных механизмов, построенных традиционными методами, кроме регулирования положения обычно требуются регулирова-

ние скорости и ограничение тока якоря в переходных процессах допустимым значением. Примером является трехконтурная система ПЭП с использованием параболического регулятора положения промышленного робота модели ТУП-10 [5]. Ограничение по току якоря приводит к необходимости усложнения регулятора положения. Поэтому строится сложный трехступенчатый регулятор положения, который работает на трёх участках в зависимости от значения обрабатываемого перемещения при торможении. Анализ результатов моделирования трехконтурной системы ПЭП промышленного робота в пакете Matlab (Simulink) показал, что применение типовых методов управления не обеспечивает качественную настройку системы автоматического управления (САУ) электропривода при возможных изменениях момента инерции в процессе выполнения роботом технологической задачи.

САУ положения предусматривается лишь на участках движения в районе заданных рабочих позиций, а на основной части пути перемещения от одного положения к другому система разомкнута по выходной координате. Датчики подключаются в зоне точного останова. Они обеспечивают автоматическое регулирование положения по отклонению от заданной точки пути перемещения с требуемой точностью.

На рисунке 5.1 показана структурная схема позиционного привода промышленного робота с фаззи-регулятором положения, на который возложена реализация алгоритма управления выходной координатой (углом поворота  $\varphi$ ).

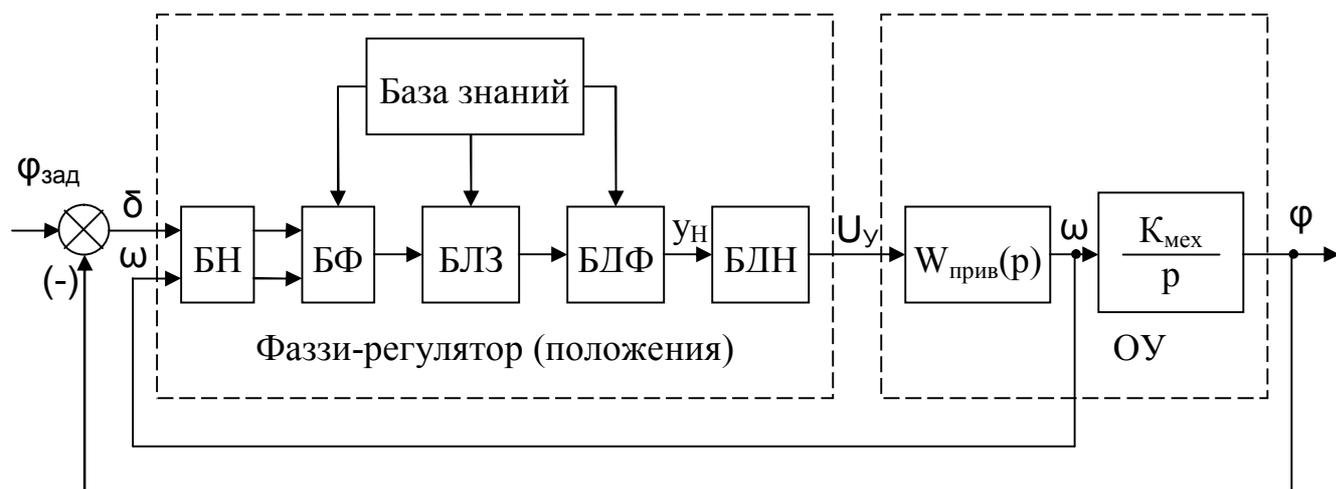


Рисунок 5.1 - Структурная схема позиционного электропривода

Центральным звеном фаззи-регулятора является блок логического заключения (БЛЗ), в котором на основе нечеткой информации о сигнале ошибки регулирования  $\delta$  и скорости  $\omega$  делается вывод о соответствующем нечётком множестве значений управляющего воздействия  $U_H$ . В блоке БЛЗ объединяются выводы отдельных правил об управляющем воздействии. Результатом объединения являются «усеченные» нечёткие множества управляющих воздействий.

В блоке нормирования (БН) измеренный четкий сигнал ошибки регулирования и скорости умножением на масштабные коэффициенты  $K_\delta$  и  $K_\omega < 1$  приводится к ограниченному интервалу  $[-1,+1]$ . Блок фаззификации (БФ) определяет значения функций принадлежности, соответствующее нормированному значению  $\delta$  и  $\omega$ .

Блоки дефаззификации (БДФ) и денормирования (БДН) выполняют обратные процедуры: по нескольким «усеченным» функциям принадлежности вычисляется четкое значение нормированного управляющего воздействия  $U_H$  и соответствующее ему ненормированное значение  $U_y = U_H / K_y$ , ( $K_y < 1$ ).

Объект управления (ОУ) представлен передаточной функцией регулируемого по скорости электропривода с нестационарными параметрами механизма и идеальным интегрирующим звеном. В качестве входных переменных ФР используются сигналы рассогласования ПЭП и скорости вращения двигателя. Стратегия управления фаззи-регулятора закладывается в таблице правил. Предварительно необходимо определить число фаззи-множеств, описывающих каждую переменную ФР. Как уже отмечалось, на практике оказывается достаточным: 5-ти ФМ для входных переменных и 7-ми ФМ для выходной переменной. Соответствующие им функции принадлежности приведены на рисунке 5.2.

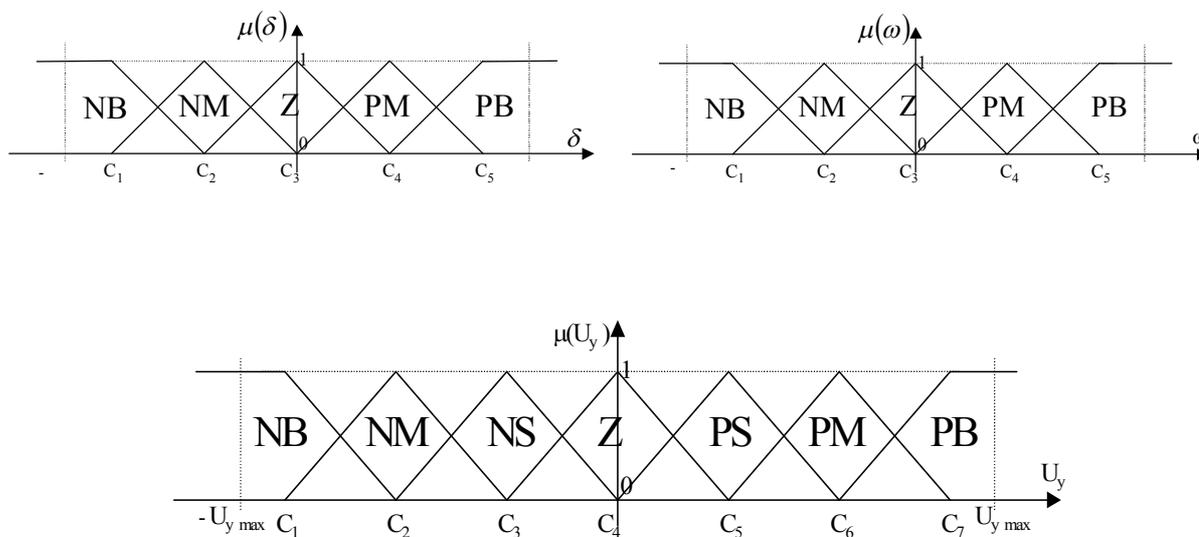


Рисунок 5.2 - Функции принадлежности входных и выходной переменных

При заполнении таблицы правил пользуются уже синтезированным традиционным регулятором положения [4]. Выбирают ту область таблицы правил, в которой обе входные переменные равны нулю (задействовано только „нулевое” фаззи-множество  $Z$ ) и симметрично расставляют названия фаззи-множеств выходной переменной. Первыми заполняются центральные строка и столбец таблицы правил (рисунок 5.3). Далее заполняются оставшиеся клетки таблицы, как суммарное воздействие соседних (с этой клеткой) фаззи-множеств (например сумма  $PS+PS=PM$ ).

		NB	NM	Z	PM	PB	$\delta$
NB		PB	PB	PM	PS	Z	
NM		PB	PB	PM	Z	NS	
Z		PM	PM	Z	NM	NM	
PM		PS	Z	NM	NB	NB	
PB		Z	NS	NM	NB	NB	
	$\omega$						

Рисунок 5.3 - Таблица правил фаззи-регулятора положения

В состав методики выбора правил входит совокупность рекомендаций по составлению таблицы правил и определению параметров функций принадлежности для всех входных и выходных переменных. Конечной формой алгоритма ФР является зависимость физического выходного управляющего воздействия от физических входных переменных.

Применением в управлении фаззи-регулятора определенной структуры, можно добиваться приемлемых для ПЭП показателей регулирования при известном диапазоне изменения момента инерции и других параметров механизма.

Но нельзя исключать одного из главных недостатков нечеткого метода: исходный набор постулируемых нечетких правил формулируется экспертом-человеком и может оказаться неполным или противоречивым, вид и параметры функций принадлежности, описывающих входные и выходные переменные системы, выбираются субъективно и могут оказаться не вполне отражающими реальную действительность.

Для устранения указанного недостатка можно реализовать нечеткую систему ПЭП адаптивным методом на основе нейронных сетей [5], т.е. корректируя по мере работы системы и правила и параметры функций принадлежности.

## 6 Особенности фаззи-управления, в основу которого положена фаззи-логика

- Лингвистические переменные - термы - количественно оцениваются не отдельными числовыми значениями, а числовыми множествами, перекрывающимися друг друга. В этом смысле фаззи-управление следует отнести к категории управления «в большом».

- Фаззи-управление, в принципе, не требует знания точной модели объекта, оно организует приближенную стратегию управления, моделируя способ мышления человека.

- Фаззи-управление позволяет выразить в простых лингвистических терминах любой необходимый для задачи управления алгоритм, линейный или нелинейный, который должен быть предварительно составлен специалистом-экспертом.

- Фаззи-контроллер, как аппаратная часть системы управления. реализующий управление, - это включенная в процесс управления и работающая в реальном времени экспертная система, которая применяет фаззи-логику для преобразования качественных логических переменных - термов.

Отмеченные особенности позволяют очертить круг задач управления, которые могут эффективно решаться на основе фаззи-логики:

- Фаззи-управление предпочтительней тогда, когда необходимый алгоритм управления проще сформулировать лингвистическим путем, а в тех областях, где возможны и фаззи-, и традиционное управление, предпочтение отдается тому способу, который дает лучший результат по требуемому показателю.

- Фаззи-управление не подходит для построения высокоточных систем регулирования, однако может успешно использоваться для указанных систем как дополнительное регулирующее средство в режимах отработки больших воздействий, когда проявляются нелинейности объекта управления и основной регулятор не обеспечивает удовлетворительное качество данных режимов.

- Фаззи-управление способно придавать нелинейным системам свойство робастности ( нечувствительности к случайным, выходящим за пределы допустимых значений, отклонениям внешних воздействий и параметров электромеханической системы). Оно целесообразно как средство приближенной параметрической адаптации в установках с изменяющимися параметрами, где точные традиционные системы параметрической адаптации сложнее структурно и труднее реализуемы по условиям устойчивости.

- Сложность объекта управления и объем информации о нем при выборе структуры системы управления определяют место нечетких систем управления по отношению к традиционным методам управления (рисунок 6.1, [1]).

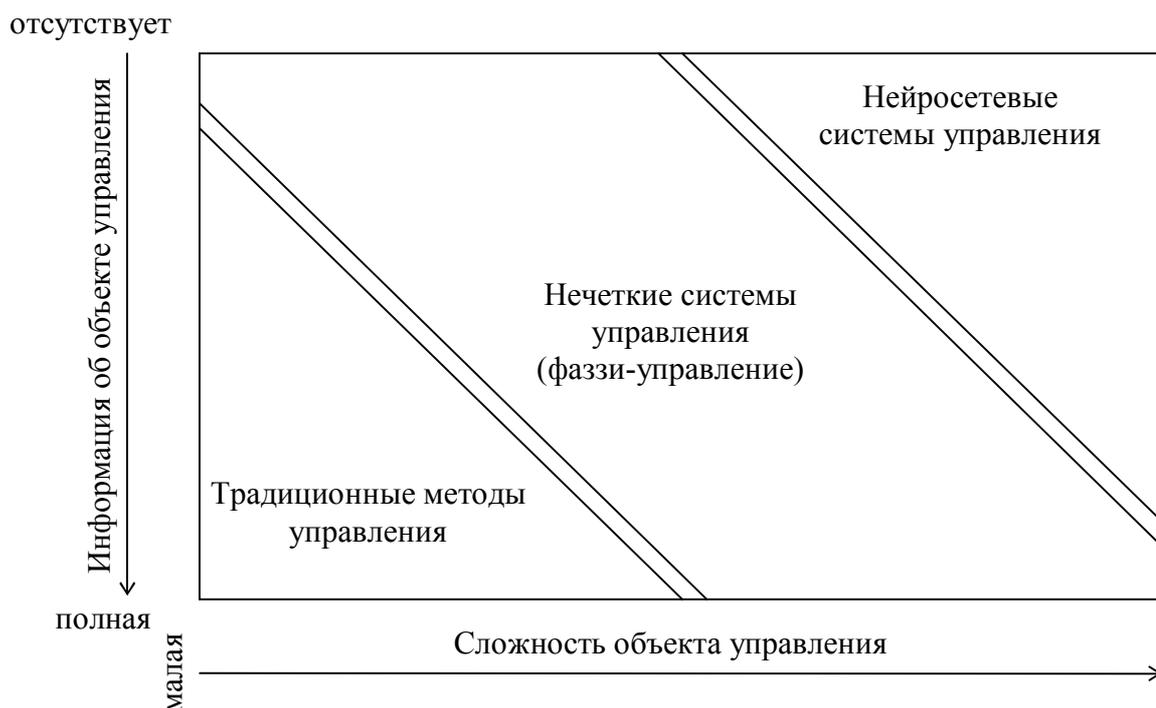


Рисунок 6.1 - Области эффективного применения различных систем управления

## 7 Выводы

1. Системы с фаззи-логикой расширяют функциональные возможности управления и оказываются более эффективными, чем традиционные, основанные на законах классической логики, в выполнении задач управления для ряда сложных, трудно описываемых объектов управления.

2. Фаззи-логика имитирует способ мышления человека в лингвистических переменных, поэтому для фаззи-управления не требуется строгое математическое описание объекта.

3. Фаззи-управление не подходит для построения высокоточных систем регулирования в электроприводах. Однако может успешно использоваться для таких систем как дополнительное регулирующее средство в режимах отработки больших воздействий.

4. В системах водо-, тепло-, газоснабжения фаззи-управление позиционными электроприводами регулирующих клапанов и задвижек оказывается эффективным как на верхнем, технологическом, уровне, так и на нижнем уровне, обеспечивающем необходимую точность позиционирования.

5. Реализация разработанных алгоритмов совместно с заданным технологическим алгоритмом на одном фаззи-контроллере вносит единообразие и упрощение в элементную базу управления, а также упростит и модернизацию системы управления. Разработанные варианты программной реализации в контроллере процедуры дефаззификации позволяют адекватно сопоставлять отработку алгоритмов на реальном контроллере и моделирование в оболочке Matlab. Эффективность различных фаззи-регуляторов рассматривается путем сравнительного анализа результатов моделирования, в итоге которого определяются качественные зависимости для угла перемещения, скорости, тока и входного напряжения контура скорости при отработке заданного угла перемещения, а также количественные показатели качества регулирования: ошибка регулирования –  $\Delta\varphi_{уст}$ , перерегулирование –  $\sigma$ , время регулирования –  $t_{шт}$ .

## Список использованных источников

1 Усков, А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. – 143 с.

2 Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М.Терехов, О.И.Осипов. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.

3 Электротехнический справочник: В 4т. Т.4: Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова [и др.]; гл. ред. А.И.Попов. – 8-е изд. испр. и доп. – М.: Изд. МЭИ, 2002. – 696 с.

4 Постников, В.Г. Оптимизация позиционных электроприводов автоматизированных систем на основе фаззи-контроллера: автореферат диссертации / В.Г.Постников. - М.: Полиграф. центр МЭИ, 2007. – 20 с.

5 Нечеткая логика – математические основы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [WWW.URL: http://www. basegroup.ru /](http://www.basegroup.ru/).