

СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

1.1 О системах интеллектуального управления робототехническими и мехатронными системами на основе нечёткой логики

Разработчиками систем управления сложными объектами, к числу которых относятся и многие объекты мехатронных систем, замечено, что для их построения часто требуются чрезвычайно сложные математические модели, достаточно точно отражающие процессы, происходящие в таких объектах. Их построение и верификация вызывают большие трудности. А главная проблема состоит в том, что такие сложные и точные модели уже не дают простого и понятного объяснения механизма функционирования объектов и возможности использовать имеющиеся методы синтеза систем управления. В ряде случаев выходом из такой затруднительной ситуации является применение значительно более простых математических моделей, которые допускают неточность и дают возможность воспроизвести в управляющей части технической системы свойства, характерные для человека, обладающего природным интеллектом и способностью принимать верные решения в условиях неопределённости и дефицита информации. Такой подход ведёт нас к системам управления, построенным на основе нечёткой логики [1-3].

Интеллектуальное управление мехатронными системами на основе нечёткой логики представляет собой способ формирования управляющих воздействий на объект управления, основанный на знаниях экспертов, полученных преимущественно на основе эмпирических данных и наблюдений, и предполагающий использование их в виде совокупности нечётких логических пра-

вил, представленных в лингвистической (словесной) форме. Такие системы управления иногда называют также нечёткими системами, а реализуемое ими управление – нечётким управлением.

Построение нечётких систем основано на имитации с помощью ЭВМ и контроллеров управляющих действий человека. Эти действия человек осуществляет, опираясь в большей степени на выводы качественного характера, порождаемые его природным интеллектом, интуицией и опытом, а не на результаты сложных математических вычислений. При этом важно отметить, что эти выводы имеют нечёткий характер.

Нечёткая логика (по-английски *fuzzy logic* – фаззи логика), лежащая в основе рассматриваемого способа управления, – это раздел математики, являющийся расширением классической формальной логики и классической теории множеств, который базируется на понятии нечёткого множества. Термин *фази* происходит от английского слова *fuzzy*, означающего нечёткий, размытый.

Применение нечёткой логики, отражающей особенности переработки информации человеком и его способность принимать правильные решения в условиях частичной неопределённости, позволяет строить системы интеллектуального управления, обладающие высокой эффективностью в следующих ситуациях:

- управляемые объекты характеризуются большой сложностью, и для них не существует простой математической модели, адекватно отражающей динамические свойства объекта и влияние внешних воздействий;
- управляемые объекты описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка;

- управление должно строиться на основе алгоритмов обработки экспертных знаний, сформулированных с использованием лингвистических описаний.

Следует отметить, что нечёткая логика не противостоит системам, построенным по классическим методам теории автоматического управления, а скорее дополняет классические подходы и расширяет их возможности. Более того, использование нечёткого управления не всегда бывает целесообразным. Оно не рекомендуется в следующих случаях:

- система управления без труда может быть построена на основании известных методов теории автоматического управления;
- имеется адекватная математическая модель объекта, пригодная для синтеза системы управления.

Многие по-настоящему эффективные решения в области управления мехатронными системами получены при объединении классических решений, например, основанных на применении ПИ- и ПИД-регуляторов, с интеллектуальными решениями на базе нечёткой логики.

1.2 Понятие нечёткого множества

Теоретические основы нечёткой логики были заложены в 1965 году **Лотфи Заде** (Lotfi Askar Zadeh), профессором Калифорнийского университета в Беркли [1]. Им же введено понятие *нечёткого множества* (fuzzy sets), являющегося главным понятием в области систем интеллектуального управления, основанных на нечёткой логике.

В соответствии с идеями классической теории множеств элемент либо принадлежит множеству, либо нет. Например, в множестве X всех чисел от 0 до 80 можно выделить подмножество A множества X всех действительных чисел от 30 до 60, которое обозначается так:

$$A = [30, 60].$$

Принадлежность элемента x множества X рассматриваемому подмножеству A описывает **характеристическая функция**. Если x принадлежит подмножеству A , эта функция имеет значение 1. В противном случае она равна 0. Таким образом, характеристическая функция ставит в соответствие число 1 или 0 элементам x множества X в зависимости от их принадлежности подмножеству A . Вид соответствующей характеристической функции $L_A(x)$ представлен на рисунке 1.1.

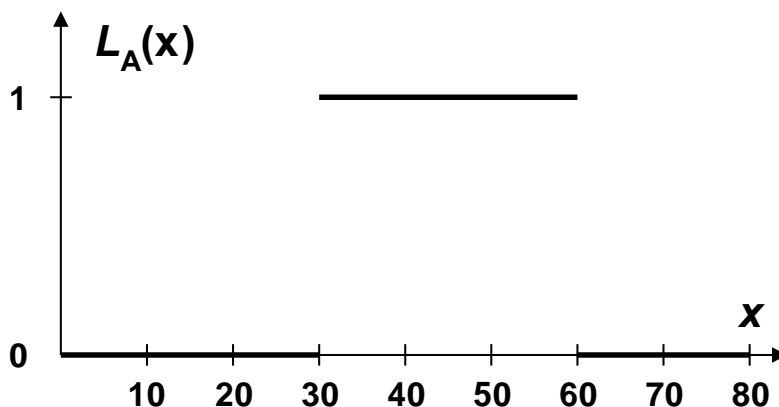


Рисунок 1.1 Вид характеристической функции классического множества

Таким образом, элементы, которым поставлено в соответствие число 1, представляют собой **элементы, находящиеся во мно-**

жестве A , а элементы, которым поставлено в соответствие число 0, являются *элементами, не находящимися во множестве A* .

Особенность нечётких множеств состоит в том, что элемент может принадлежать множеству частично и даже в разной степени входить в несколько различных нечётких множеств. Тем самым отражается тот факт, что с точки зрения человека некоторые утверждения могут быть одновременно частично истинными и частично ложными. Это означает, что границы нечётких множеств являются размытыми, нечёткими.

Пример. Воздух в помещении может иметь различную температуру. Попробуем описать множество её значений B , воспринимаемых человеком как холодный воздух. Будем анализировать значения физической величины температуры в диапазоне значений от 0 до 60 градусов Цельсия. Большинство экспертов согласится с тем, что воздух, все значения температуры которого ниже 10 градусов Цельсия, следует отнести к холодному воздуху. И, одновременно с этим, воздух, нагретый выше 40 градусов, не является холодным. Однако чёткую границу, отделяющую холодный воздух от нехолодного воздуха, указать не удастся, поскольку различные эксперты будут воспринимать эту границу по-разному. Например, воздух, имеющий температуру, равную 20 градусам, может восприниматься частично как холодный и частично как нехолодный (тёплый). Это значит, что классический подход не даст результата, и целесообразно **ослабить строгость разделения** воздуха на холодный и нехолодный. В этом случае мы приходим к нечёткому множеству.

1.3 Функции принадлежности

Особенность нечёткого множества состоит в том, что при его формировании можно кодировать элементы, используя числа с любым значением от 0 до 1. Как и в случае классического чёткого множества, если элемент полностью принадлежит нечёткому множеству, то ему ставится в соответствие число 1, а если элемент не принадлежит нечёткому множеству, то – число 0. Все другие значения между 0 и 1 определяют *степень принадлежности* элемента к нечёткому множеству B . В этом случае характеристическая функция превращается в *функцию принадлежности* (*Membership function*) $\mu_B(T)$ (рисунок 1.2), играющую важную роль в системах управления, построенных на основе нечёткой логики.

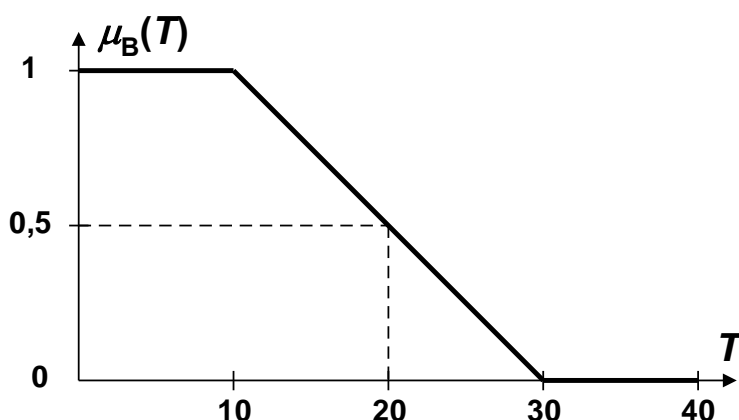


Рисунок 1.2 Функция принадлежности $\mu_B(T)$ значений переменной T к нечёткому множеству B

Значения функции принадлежности свидетельствуют о степени соответствия значения физической переменной T (температуры) нечёткому множеству B . Фактически речь идёт о степени истинности суждения о том, что конкретные значения переменной «температура» принадлежат нечёткому множеству. Рассмотрим область значений температуры воздуха от 0°C до $+40^{\circ}\text{C}$

(градусов Цельсия). Из приведённого графика функции принадлежности $\mu_B(T)$ следует, например, что воздух, имеющий температуру не выше $+10^{\circ}\text{C}$, эксперты признают холодным. Если температура превышает $+30^{\circ}\text{C}$, то такой воздух не является холодным. В промежуточной области значений температуры воздух отчасти холодный и отчасти нехолодный. Например, при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ эксперты склонны считать, что воздух наполовину холодный и в то же время наполовину нехолодный.

Следует отметить, что любое нечёткое множество, например, A , полностью определяется при задании функции принадлежности $\mu_A(T)$, её области определения (допустимых значений связанной с этой функцией физической переменной x), и области значений этой функции. Как правило, рассматриваются нормированные функции принадлежности, значения которых принадлежат интервалу $[0,1]$. Очевидно, что чем больше значение функции принадлежности $\mu_A(x)$, тем выше степень принадлежности соответствующего значения переменной x нечёткому множеству A . Отметим, что одна и та же физическая переменная может быть аргументом нескольких нечётких множеств.

Единой, научно обоснованной методики выбора экспертами функций принадлежности пока не разработано. Остаётся мало изученным и даже спорным и то, какой смысл имеет такая функция. Пожалуй, правильно было бы считать, что функция принадлежности отражает основанную на интуиции и инженерных знаниях эксперта его степень уверенности в том, что определённое значение переменной принадлежит нечёткому множеству. Следует также учесть, что степень принадлежности элементов нечёткому множеству, отражённая в функции принадлежности, не является вероятностью.

Функцию принадлежности задаёт эксперт или группа экспертов, и она может принимать любую форму. Если в формиро-

вании функций принадлежности участвует несколько экспертов, то их мнения могут отличаться. Тогда производится дополнительная математическая обработка мнений экспертов.

При решении задач управления сложными мехатронными системами с применением аппарата нечёткой логики приходится выполнять большой объем вычислительных операций. Поэтому для повышения эффективности работы нечётких систем управления эксперты предпочитают использовать стандартные функции принадлежности. Одна из особенностей этих функций заключается в том, что их значения лежат в диапазоне от 0 до 1. Наиболее распространёнными стандартными непрерывными функциями принадлежности, являются следующие функции:

Треугольная функция принадлежности,

Трапецеидальная функция принадлежности,

Гауссова функция принадлежности,

Сигмоидная функция принадлежности.

Трапецеидальная и треугольная функции принадлежности, называемые функциями π – типа и λ – типа, изображены на рисунке 1.3.

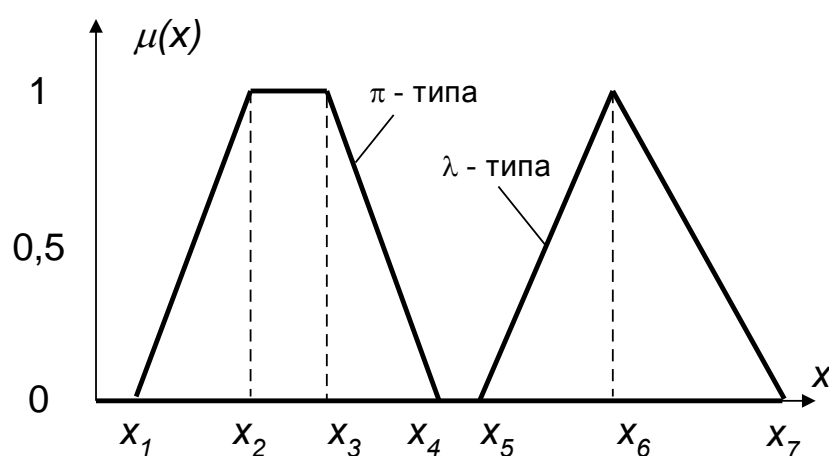


Рисунок 1.3. Трапецеидальная и треугольная функции принадлежности π – типа и λ – типа

Трапецеидальная $\mu_\pi(x)$ и треугольная $\mu_\lambda(x)$ функции принадлежности, зависящие от аргумента x , могут быть определены по формулам

$$\mu_\pi(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_1 \text{ или } x \geq x_4; \\ 1 & \text{при } x_3 \geq x \geq x_2; \\ \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} & \text{при } x_2 > x > x_1; \\ \frac{x_4 - x}{x_4 - x_3} & \text{при } x_4 > x > x_3, \end{cases}$$

$$\mu_\lambda(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_5 \text{ или } x \geq x_7; \\ \frac{x - x_5}{x_6 - x_5} & \text{при } x_6 \geq x \geq x_5; \\ \frac{x_7 - x}{x_7 - x_6} & \text{при } x_7 \geq x \geq x_6 \end{cases}$$

Трапецеидальная функция имеет ещё две разновидности, показанные на рисунке 1.4. Они носят названия функции Z – типа и S – типа.

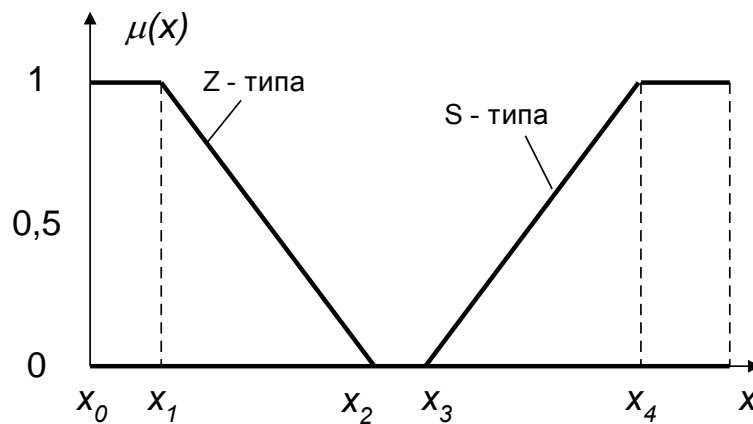


Рис. 1.4 Функции принадлежности Z и S типов

Функции принадлежности Z – типа и S – типа вычисляются по формулам

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \geq x_2; \\ 1 & \text{при } x \leq x_1; \\ \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & \text{при } x_2 > x > x_1, \end{cases}$$

$$\mu_S(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_3; \\ 1 & \text{при } x \geq x_4; \\ \frac{x - x_3}{x_4 - x_3} & \text{при } x_4 > x > x_3. \end{cases}$$

Трапецеидальная и треугольная функции принадлежности, представляющие собой кусочно-линейные функции, используются наиболее часто. Это вызвано тем, что они отличаются простотой, и их применять экспертам удобнее всего. Кроме того, графики таких функций содержат характерные точки, позволяющие эксперту легко задать области, в которых соответствующие физические переменные полностью принадлежат или полностью не принадлежат нечёткому множеству.

Сигмоидная функция принадлежности переменной x является непрерывной и описывается уравнением

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}},$$

где a и c – коэффициент крутизны и координата перегиба функции принадлежности соответственно. При $a > 0$ она напоминает трапецеидальную функцию S – типа, а при $a < 0$ – трапеце-

идальную функцию Z – типа. В качестве примера на рисунке 1.5 изображена сигмоидная функция принадлежности при $a = 0,5$ и $c = 10$.

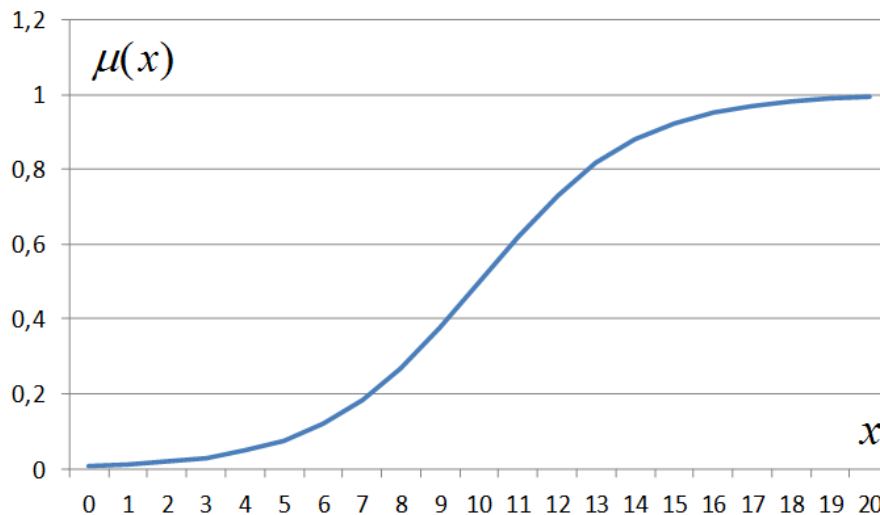


Рисунок 1.5. Сигмоидная функция принадлежности

Непрерывная Гауссова функция принадлежности задаётся формулой

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2\sigma^2}},$$

в которой b и σ – координата максимума, соответствующая центру нечёткого множества, и коэффициент концентрации функции принадлежности соответственно. При $b = 10$ и $\sigma = 3$ гауссова функция принадлежности имеет вид, изображённый на рисунке 1.6.

Гауссовы и сигмоидные функции принадлежности, являющиеся гладкими функциями, применяются в тех случаях, когда для построения системы управления требуется применение дифференцируемых зависимостей.

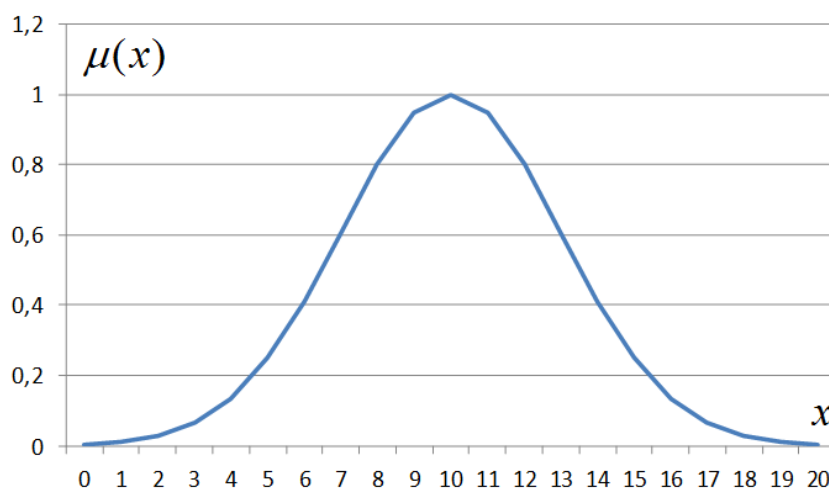


Рисунок 1.6. Гауссова функция принадлежности

1.4 Лингвистические переменные и лингвистические описания

В системах управления, построенных на основе нечёткой логики, правила формирования управляющих воздействий осуществляется с помощью **лингвистики**, представляющей собой науку о языках. Для этого используются лингвистические переменные.

Лингвистическая переменная — это переменная, имеющая имя и связанная с реальной физической величиной, имеющей численное значение. Имена могут быть разными и отражать физический смысл той переменной, с которой связывается лингвистическая переменная. Например, лингвистическая переменная может называться температура, угол поворота, скорость, дистанция, давление. В этом случае лингвистическая переменная «температура» связана с физической переменной температура, измеряемой, например, в градусах Цельсия. Лингвистическая переменная имеет область определения, которой фактически является

область допустимых значений соответствующей физической переменной. В частности, лингвистическая переменная «температура» может иметь область определения $[-10; +50]$. Особенность подхода, основанного на использовании нечёткой логики, состоит в том, что лингвистической переменной ставится в соответствие физическая величина, и для неё указывается больше значений, чем только ДА (истина) и НЕТ (ложь), свойственных классической логике.

С лингвистической переменной связаны её *лингвистические описания*, которые называются *термы*. Их можно рассматривать как значения лингвистической переменной. Ими являются *слова, словосочетания, фразы* некоторого естественного или искусственного *языка*. Например, лингвистическая переменная «скорость» может связана с физической переменной, представляющей собой скорость V продольного движения мобильного робота. Эта лингвистическая переменная может иметь лингвистические описания (термы) «большая», «средняя», «малая». Каждый из приведённых здесь термов определён соответствующей функцией принадлежности и обозначает некоторое нечеткое подмножество в составе полного множества значений физической переменной V .

Таким образом, *лингвистический терм* – это лингвистическое описание, т.е. фраза, значение которой принимает лингвистическая переменная. Множество всех возможных значений (термов) лингвистической переменной образует базовое *терм-множество*. Оно может быть введено, исходя из специфики задачи, или построено в результате обработки мнений различных экспертов. Например, для лингвистической переменной «давление» имеем следующее базовое *терм-множество*:

Давление = { большое, среднее, низкое }.

В свою очередь, лингвистический терм является *именем нечёткой переменной*, которая представляет собой именованное нечёткое множество, которое характеризуется соответствующей функцией принадлежности.

Несомненным преимуществом построения систем управления на основе нечёткой логики является то, что лингвистические переменные и их лингвистические описания (термы) понятны экспертам и могут быть ими непосредственно использованы *для формирования правил* преобразования исходной информации в команды управления.

1.5 Пример построения функций принадлежности на основании мнений нескольких экспертов

Как было отмечено выше, иногда требуется дополнительная математическая обработка мнений нескольких экспертов, участвующих в формировании функций принадлежности. В качестве иллюстрации рассмотрим пример.

Рассмотрим пример [17]. Пусть требуется построить функции принадлежности термов «низкий», «средний» и «высокий» для лингвистической переменной «рост женщины» на основании мнений пяти экспертов. Таким образом, будет найдено три функции принадлежности для трёх нечётких подмножеств. Эксперт даёт оценку «да», если он считает, что численное значение переменной «рост женщины» соответствует тому или иному терму. Например, эксперт может считать, что рост низкий, если его значение лежит в диапазоне от 155 до 160 см. В противном случае эксперт ставит оценку «нет». Оценка «да» кодируется значением 1, а «нет» - значением 0. Результаты анкетирования экспертов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Мнения экспертов

Номер экс- перта	Терм	Рост, см						
		155-160	160-165	165-170	170-175	175-180	180-185	185-190
1	низкий	1	0	0	0	0	0	0
	средний	0	1	1	0	0	0	0
	высокий	0	0	0	1	1	1	1
2	низкий	1	1	0	0	0	0	0
	средний	0	1	1	0	0	0	0
	высокий	0	0	0	1	1	1	1
3	низкий	1	1	0	0	0	0	0
	средний	0	0	1	1	0	0	0
	высокий	0	0	0	1	1	1	1
4	низкий	1	0	0	0	0	0	0
	средний	0	1	1	0	0	0	0
	высокий	0	0	0	1	1	1	1
5	низкий	1	0	0	0	0	0	0
	средний	0	1	1	1	0	0	0
	высокий	0	0	1	1	1	1	1

Расчёт j -ой функций принадлежности может осуществляться по формуле

$$\mu_j(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k b_{ji},$$

где x – числовое значение переменной «рост женщины», k – количество экспертов; b_{ji} – оценка i -ым экспертом степени принадлежности диапазона значений переменной x к нечёткому множеству с номером j . Промежуточные результаты расчёта приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Сумма оценок экспертов

	Рост, см						
Терм	155-160	160-165	165-170	170-175	175-180	180-185	185-190
низкий	5	2	0	0	0	0	0
средний	0	4	5	2	0	0	0
высокий	0	0	1	4	5	5	5

Значения функций принадлежности термов «низкий», «средний» и «высокий» лингвистической переменной «рост женщины» представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Значения функций принадлежности

	Рост, см						
Терм	155-160	160-165	165-170	170-175	175-180	180-185	185-190
низкий	1	0,4	0	0	0	0	0
средний	0	0,8	1	0,4	0	0	0
высокий	0	0	0,2	0,8	1	1	1

Графики сформированных функций принадлежности изображены на рисунке 1.7.

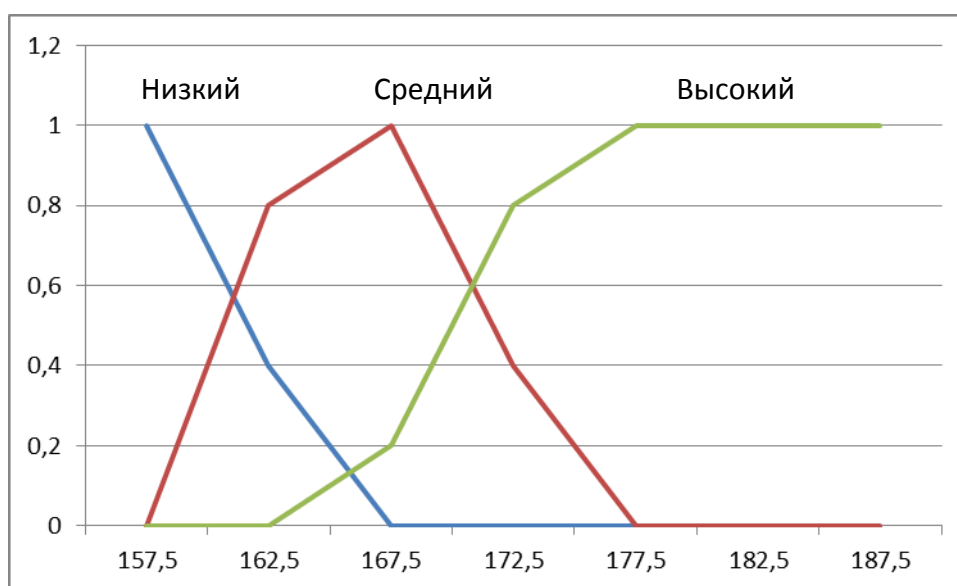


Рисунок 1.7 Графики функций принадлежности

При необходимости и для упрощения использования представленные на рисунке 1.7 функции принадлежности могут быть заменены стандартными функциями Z – типа, λ – типа и S – типа.

1.6 Операции с нечёткими множествами

В результате выполнения операций с нечёткими множествами появляются новые нечёткие множества. Определения таких операций во многом аналогичны определениям операций с обычными (чёткими) множествами. Наиболее важными среди этих операций являются следующие **стандартные логические операторы** (операторы Заде), которые обозначаются AND, OR и NOT.

Логический оператор **AND (И)** является оператором **пересечения множеств** или **конъюнкции** (conjunction). Результат

действия этого оператора в отношении двух нечётких множеств А и В определяется как наибольшее нечёткое множество С, являющееся одновременно подмножеством обоих множеств А и В. Обозначим $\mu_A(x)$ и $\mu_B(x)$ функции принадлежности нечётких множеств А и В соответственно. Тогда степенью истинности предположения «А AND В» является **минимум** из степеней истинности А и В:

$$\mu_C(x) = \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)).$$

Пример. Имеем два предположения: «Низкая скорость» истинно на 0,7; «Большая дистанция» истинно на 0,5. Поэтому утверждение «Низкая скорость» AND «Большая дистанция» истинно на $0,5 = \text{MIN}(0,7; 0,5)$.

Логический оператор **OR (ИЛИ)** является оператором **объединения множеств** или **дизъюнкции** (disjunction). Результатом применения оператора **ИЛИ** для двух нечётких множеств А и В будет наименьшее нечёткое множество С, содержащее оба исходных множества А и В. Степенью истинности предположения «А OR В» является **максимум** из степеней истинности предположений А и В. Поэтому

$$\mu_C(x) = \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)).$$

Пример. Имеем два предположения: «Температура Низкая» истинно на 0,7; «Давление Низкое» истинно на 0,5. Поэтому утверждение «Температура Низкая» OR «Давление Низкое» истинно на $0,7 = \text{MAX}(0,7; 0,5)$.

Логический оператор **NOT (НЕ)** представляет собой оператор **отрицания** или **дополнения** (complement). Результат его

действия состоит в образовании утверждения, степень истинности которого определяется формулой

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x).$$

Пример. Имеется утверждение «Ошибка Малая», которое истинно на 0,7. При использовании оператора NOT утверждение NOT «Ошибка Малая», которое можно было бы записать как «Ошибка НЕ малая», истинно на $0,3 = 1 - 0,7$.

Примечание. Можно заметить, что применительно к классическим множествам, для которых функции принадлежности имели бы только два значения (0 или 1), рассмотренные выше операторы AND, OR и NOT корректно реализуют известные логические операции И, ИЛИ, НЕ.

1.7 Нечёткие алгоритмы

Важным инструментом для формирования управляющих воздействий при построении систем управления на основе нечёткой логики являются нечёткие алгоритмы. Впервые понятие нечеткого алгоритма, было предложено Л.А. Заде.

Нечёткий алгоритм представляет собой упорядоченное множество нечётких инструкций (правил) преобразования нечётких множеств, причём эти инструкции содержат термы лингвистических переменных.

Наиболее широко применяются инструкции, которые представляют собой продукционные правила, позволяющие приблизиться к стилю мышления человека. Эти правила построены по схеме **логической импликации «ЕСЛИ-ТО»**.

ЕСЛИ «утверждение» ТО «результат»

или

IF «утверждение» THEN «результат».

При этом могут применяться нечётко-логические операторы Заде: AND, OR, NOT. Утверждение носит название *антецедент*, а результат – *консеквент*. Особенность правил, используемых в нечётких системах, состоит в применении лингвистических переменных для формирования утверждений и результата. Тем самым удаётся избежать ограничений, присущих классическим продукционным правилам.

Рассмотрим пример, характерный для автоматически управляемого транспортного средства, в частности, мобильного робота. Введём в рассмотрение две лингвистические переменные, используемые для формирования утверждений: «дистанция до препятствия» и «скорость». Первая лингвистическая переменная может иметь несколько термов, среди которых термы «большая» и «малая». Лингвистическая переменная «скорость» также может иметь несколько термов, среди которых есть описания «большая» и «малая». Лингвистическая переменная «напряжение» характеризует результат и имеет термы «увеличить», «не менять» и «уменьшить».

Часть нечётких правил, образующих нечёткий алгоритм, может выглядеть следующим образом:

ЕСЛИ «дистанция до препятствия большая» AND «скорость малая» ТО «напряжение увеличить»

ЕСЛИ «дистанция до препятствия большая» AND «скорость большая» ТО «напряжение не менять»

ЕСЛИ «дистанция до препятствия малая» AND «скорость большая» ТО «напряжение уменьшить»

ЕСЛИ «дистанция до препятствия малая» **AND** «скорость малая» **ТО** «напряжение не менять»

Операторы OR и NOT не используются при формировании результата, т.к. они вносят в правило неопределённость, которая может негативно отразиться на качестве управления.

При построении системы управления важно проследить за тем, чтобы совокупность нечётких правил, составляющих нечёткий алгоритм, охватывала все возможные ситуации и система управления всегда могла бы найти правильное решение. Для этого часто при построении систем управления, основанных на нечёткой логике, используются ***таблицы правил***. Каждой ячейке таблицы назначено соответствующее правило. Такой способ построения нечётких алгоритмов во многих случаях позволяет упростить построение системы управления и контроль всех возможных ситуаций.

Совокупность нечётких правил, на основании которых функционирует система управления, образует существенную часть её **базы знаний**, имеющую вид **базы правил**.

1.8 Структура и алгоритмы систем нечёткого управления

Считается, что практическое применение нечёткой логики в управлении началось в 1975 году после того, как **Мамдани** (Ebrahim Mamdani) впервые удалось реализовать нечёткий регулятор. Мамдани предложил схему **системы нечёткого управления** (рисунок 1.8), которая стала классической.

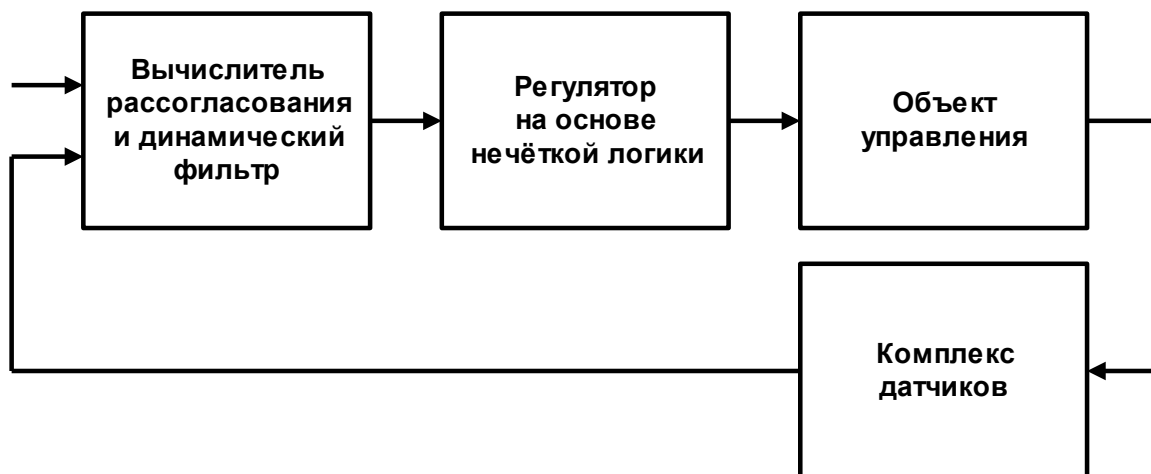


Рисунок 1.8 Схема системы нечёткого управления, предложенная Мамдани

В этой схеме четыре функциональных блока. На вход системы управления поступает задающее воздействие, а по цепям обратных связей – сигналы комплекса датчиков, измеряющих величины, характеризующие состояние объекта управления, например, положение объекта, скорость его движения, ток в обмотке исполнительного двигателя и т.д.

Первый функциональный блок необходим, прежде всего, для вычисления рассогласования между задающим воздействием и регулируемой переменной. Поэтому система нечёткого управления похожа на следящую систему. Регулятор на основе нечёткой логики функционирует на основании имеющейся в его распоряжении **базы знаний**, имеющей вид **базы правил**.

База знаний представляет собой полный набор функций принадлежности и правил системы нечеткого управления. Базы правил нечёткой логики формируются экспертами и таким образом основываются на присущим им знаниях, интуиции и опыте.

Поведение базы нечётких правил зависит от воздействий, поступающих на её входы, и является статичным и нелинейным.

Таким образом, и весь нечёткий регулятор оказывается **статичным и нелинейным**. Статического регулятора часто недостаточно для получения высоких динамических свойств системы управления. Нужны составляющие, получаемые в результате интегрирования и дифференцирования входных воздействий и сигналов, поступающих по цепям обратных связей.

Поэтому входящий в состав первого функционального блока **динамический фильтр** служит для формирования дополнительных динамически изменяющихся сигналов, используемых регулятором. В первую очередь, речь идёт о сигналах, пропорциональных производным или интегралам по времени от рассогласования, задающего воздействия и переменных, характеризующих текущее состояние объекта управления.

Структура нечёткого регулятора, приведённая на рисунке 1.9, свидетельствует о том, что процесс обработки информации в регуляторе на основе нечёткой логики имеет три этапа.

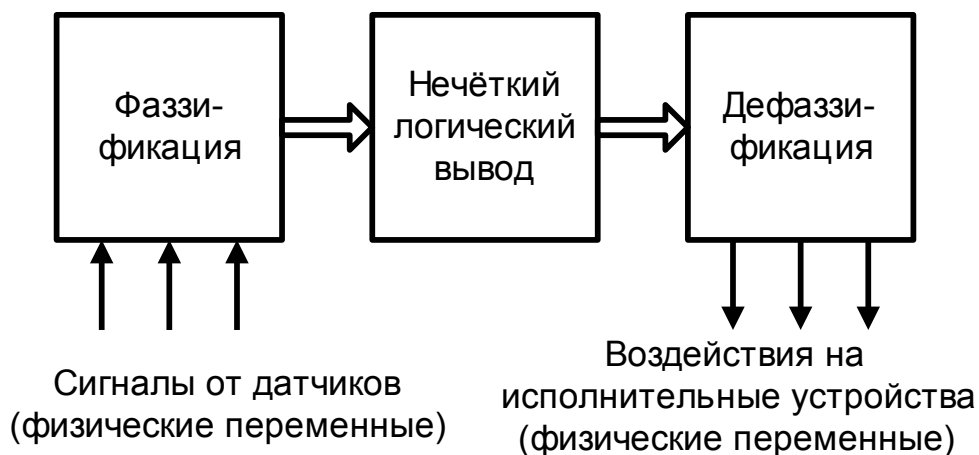


Рисунок 1.9 Структура нечёткого регулятора

Первым этапом является этап *фаззификации*. Она заключается в преобразовании физических переменных, поступающих на вход нечёткого регулятора, например, сигналов датчиков о положении, скорости, токе или напряжении, в значения термов

лингвистических переменных в соответствии с имеющимися функциями принадлежности. При фаззификации определяются **степени истинности** элементарных нечётких высказываний.

Фаззификацию называют введением нечёткости. Она даёт возможность далее формировать управляющие воздействия, используя лингвистику и базу правил.

Второй этап – это **нечёткий логический вывод**, который осуществляется в результате обработки лингвистических переменных на основании нечётких правил, входящих в состав нечёткого алгоритма системы управления. Результатом этого этапа являются нечёткие подмножества, на основании которых формируются управляющие воздействия на объект управления.

Результирующее нечёткое множество, определённое на этапе нечёткого логического вывода, не может быть непосредственно использовано для управления системой. Поэтому на третьем этапе выполняется **дефаззификация**, которая означает переход от описаний выходных воздействий, характерных для нечёткой логики, к физическим управляющим воздействиям.

Существует большое число разнообразных методов логического вывода. Наибольшее применение в настоящее время получили алгоритмы Мамдани, Сугэно и Цукамото. Эти методы имеют отличия, но во всех них при определении результата нечёткого логического вывода выполняются операции **активизации** правил и **композиции** (объединения).

Во-первых, на этапе нечёткого логического вывода при применении каждого нечёткого правила учитывается степень его активизации. Вычисленные в результате фаззификации значения истинности для предпосылок правила применяются к заключению этого правила. Это приводит к образованию нечёткого подмножества, связанного с переменной вывода этого правила. Такие операции выполняются для всех нечётких правил.

Чаще всего степень активизации правила, состоящего из логических комбинаций нескольких утверждений, вычисляется на основе оценок степеней истинности каждого утверждения с учётом соответствующих функций принадлежности. В качестве правила логического вывода часто используются способ MAX-MIN. Его действие заключается в *отсечении* части функции принадлежности терма выходной лингвистической переменной. При этом учитываются особенности выполнения нечётких логических операций. Например, результатом операции AND является минимальное значение степеней истинности предложений. Это минимальное значение и является степенью активизации правила. Нечёткое множество выходной переменной правила строится путём «урезания» её функции принадлежности на уровне, равном степени активизации правила.

Пример. Пусть имеется правило

ЕСЛИ «дистанция большая» AND «скорость малая» **ТО**
«напряжение большое».

Функции принадлежности $\mu_A(d)$ и $\mu_B(v)$ термов «большая» и «малая» лингвистических переменных «дистанция» и «скорость» изображены на рисунке 1.10.

В ситуации, когда физические переменные дистанция и скорость имеют значения 17,5 м и 2,5 м/с, функции принадлежности $\mu_A(d)$ и $\mu_B(v)$ равны 0,75 и 0,5 соответственно. Поэтому степень активизации правила равна 0,5, а функция принадлежности $\mu_C(u)$ терма «большое» лингвистической переменной «напряжение» в соответствии со способом MAX-MIN принимает вид трапеции (рисунок 1.10), образующейся как затемнённая нижняя часть треугольника.

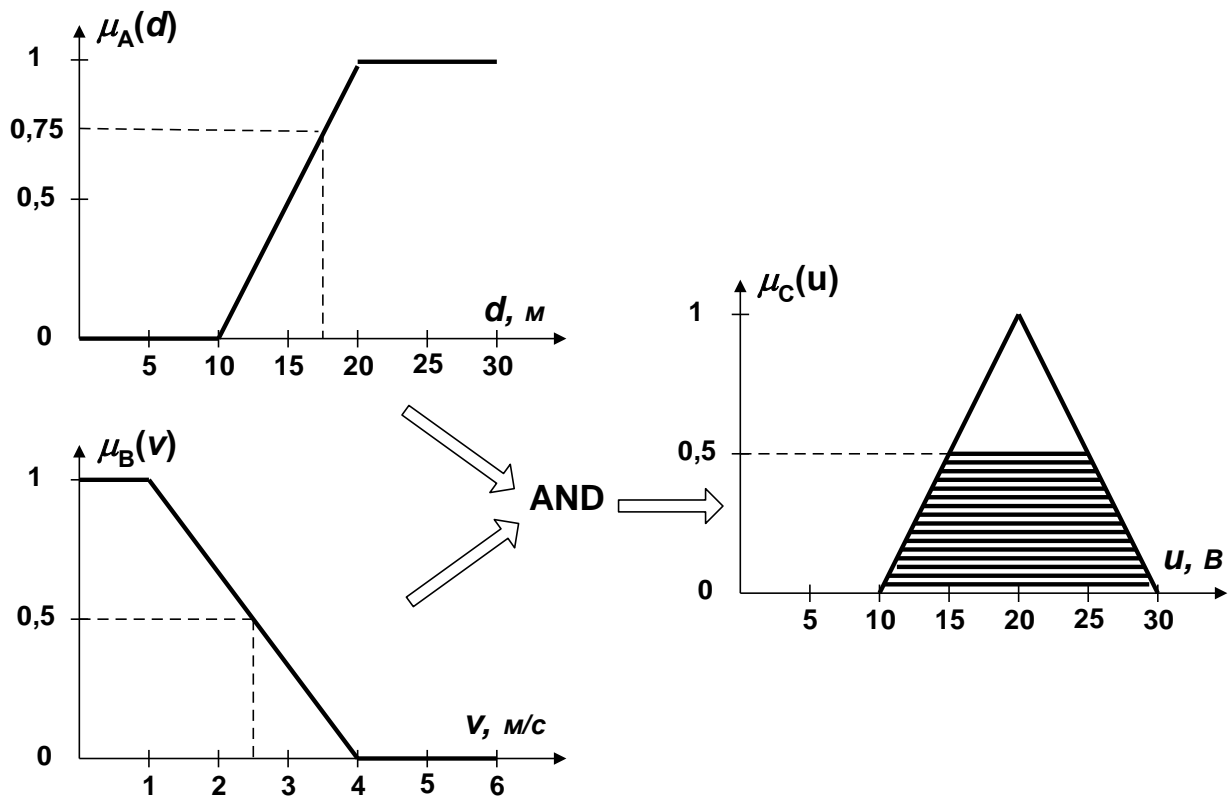


Рисунок 1.10 Преобразование функций принадлежности при нечётком логическом выводе

Применяется и другой способ, который называется MAX-DOT. В этом случае функция принадлежности выходной величины подвергается *масштабированию*. Результирующая функция принадлежности выходной переменной принимается равной произведению исходной функции принадлежности на степень активизации правила.

Следующей операцией, выполняемой на этапе нечёткого логического вывода, является *композиция* (объединение). Объединяются все нечёткие подмножества, имеющие отношение к одной выходной переменной, которая может встречаться в разных правилах. Так образуется одно нечёткое подмножество для данной выходной переменной, например, C , которое описывает-

ся функцией принадлежности $\mu_C(x)$. Пример графика функции принадлежности, образованной из двух функций треугольной формы, ограниченных сверху с учётом уровней активизации правил, равных 0,25 и 0,5, показан на рисунке 1.11.

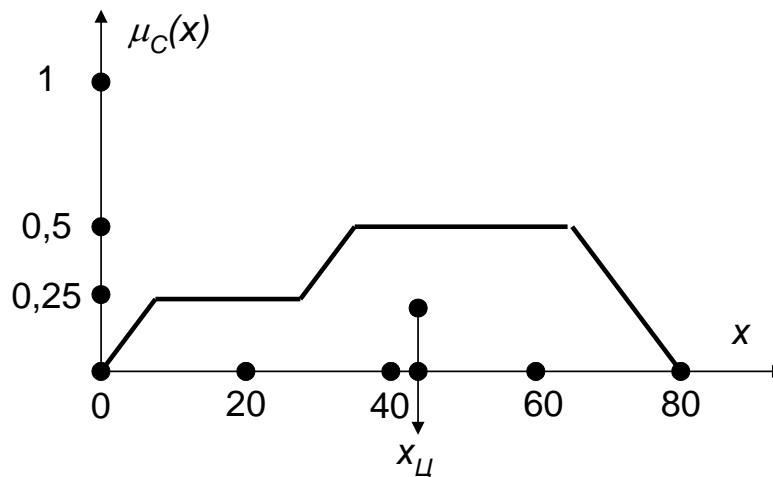


Рисунок 1.11 Пример функции принадлежности выходной переменной

Если в системе нечёткого управления используется несколько выходных переменных, то та же операция производится в отношении всех выходных переменных.

При объединении чаще используется операция определения результирующего нечёткого множества путём нахождения поточечного максимума для всех образующих его нечётких подмножеств. При этом реализуется нечёткая логика «ИЛИ». Другой вариант композиции заключается в том, что результирующее нечёткое множества формируется как поточечная сумма всех образующих его нечётких подмножеств.

Для управления мехатронной системой не может быть непосредственно использовано результирующее нечёткое множество, определённое на этапе нечёткого логического вывода. Поэтому необходимо выполнить *дефаззификацию*, т.е. приведе-

ние к чёткости. Для этого осуществляется переход от нечёткой логики к физическим переменным, которые даю возможность сформировать сигналы управления. Существует множество разнообразных методов дефаззификации, и все они являются *эвристическими*.

Одним из наиболее популярных методов дефаззификации является метод, предложенный в 1975 г. английским математиком Мамдани. В соответствии с этим методом производится вычисление значения физической переменной $x_{Ц}$, характеризующей *центр тяжести* функции принадлежности результирующего нечёткого множества выходной лингвистической переменной. Такой метод называется также методом центрирования. Вычисления производятся по формуле

$$x_{Ц} = \frac{\int x \mu_A(x) dx}{\int \mu_A(x) dx},$$

где $\mu_A(x)$ – функция принадлежности выходной переменной; x – её аргумент. Значение $x_{Ц}$ физической величины x может непосредственно использоваться для управления мехатронной системой.

В тех случаях, когда можно представить график результирующей функции принадлежности в виде объединения нескольких фигур, площади которых известны, величину $x_{Ц}$ проще определить по формуле

$$x_{Ц} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

где n – количество составляющих графика функции принадлежности; S_i – площадь i -ой составляющей; x_i – координата центра тяжести i -ой составляющей. Например, величина $x_{Ц}$ для результирующей функции принадлежности, изображённой на рисунке 1.11, имеет значение 43,4. Известны также другие методы дефаззификации, рассмотренные в [14, 15, 19].

1.11 Нечёткие регуляторы следящих систем

В современных системах компьютерного управления широко применяются пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. В некоторых случаях используется пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор. Более широкими функциональными возможностями обладает цифровой ПИД – регулятор, образующийся в результате параллельного включения трех цифровых блоков, которые выполняют операции умножения на константу, численного интегрирования и численного дифференцирования. При необходимости, выбирая соответствующие значения параметров ПИД-регулятора, из него легко могут быть получены все остальные перечисленные выше варианты регуляторов.

ПИД-регуляторы могут входить в состав различных контуров подчинённого регулирования. Но могут использоваться и в единственном числе при установке их в контур управления по-

следовательно с объектом управления. Например, так может быть построена следящая система. Системы компьютерного управления, состоящие из последовательно включённых в контур регулирования ПИД-регулятора и непрерывного объекта управления, обладают, по крайней мере, двумя преимуществами по сравнению с системами, построенными как системы контуров подчинённого регулирования [10]. Во-первых, они имеют простую структуру и легко реализуются. Отпадает необходимость в создании сложных, вложенных друг в друга, контуров регулирования. Во-вторых, наличие дифференцирующего звена в модели ПИД-регулятора позволяет скомпенсировать отрицательное влияние наиболее инерционного апериодического звена в составе модели объекта управления и таким образом улучшить динамические свойства системы. Вместе с тем, такие системы имеют и недостатки, как раз связанные с наличием операции дифференцирования, но простота структуры и реализации регулятора часто оказываются наиболее привлекательными для разработчиков систем управления.

Производная от входного сигнала $e(t)$ по времени в текущий момент может быть оценена с помощью первой разности, делённой на период квантования по времени T , и вычисляется по формуле

$$\left. \frac{de(t)}{dt} \right|_{t=T} \approx \frac{e(nT) - e[T(n-1)]}{T}.$$

Тогда дискретная передаточная функция ПИД-регулятора может быть записана в виде

$$\overline{W}_{ПИД}^*(z) = k_{\Pi} + k_{И} \frac{T}{z-1} + k_{Д} \frac{z-1}{Tz}.$$

где k_{Π} – коэффициент усиления пропорциональной составляющей регулирования; $k_{\text{И}}$ – коэффициент усиления канала, по которому происходит интегрирование входного сигнала; $k_{\text{Д}}$ – постоянная дифференцирования.

Предельным непрерывным аналогом [10] цифрового ПИД-регулятора является непрерывный ПИД-регулятор с тем же значениями коэффициентов усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования, что и у цифрового ПИД-регулятора, имеющего передаточную функцию

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + k_{\text{Д}}s,$$

где s – переменная Лапласа. Отметим, что при достаточно малом значении периода квантования по времени свойства цифрового и непрерывного ПИД-регуляторов похожи [10]. Это даёт возможность использовать представление о непрерывном ПИД-регуляторе для построения систем компьютерного управления с цифровыми ПИД-регуляторами.

Настройка параметров ПИД-регулятора оказывается непростой, если отсутствует достаточно подробная математическая модель объекта управления или этот объект обладает явно выраженными нелинейными свойствами. В этом случае классический линейный ПИД-регулятор не всегда способен обеспечить высокое качество процессов управления. Улучшить свойства системы управления можно, применив нечёткий контроллер, который будет оперативно подстраивать значения коэффициентов усиления ПИД-регулятора (рисунок 1.18). Так образуется гибридный нечёткий ПИД-регулятор, объединяющий традиционную линейную и нечёткую части и обладающий необходимыми нелинейными

характеристиками, способствующими улучшению динамических свойств системы управления [11, 12].

ПИД-регулятор, имеющий традиционную структуру, как и прежде включён в основной контур регулирования последовательно с объектом управления, например, с исполнительной частью следящего привода. Но этот регулятор имеет особенность, состоящую в том, что его коэффициенты k_P , k_I и k_D не постоянны, а могут изменяться. Желаемые значения этих коэффициентов вычисляются нечётким контроллером в функции переменных, определяющих состояние динамической системы.

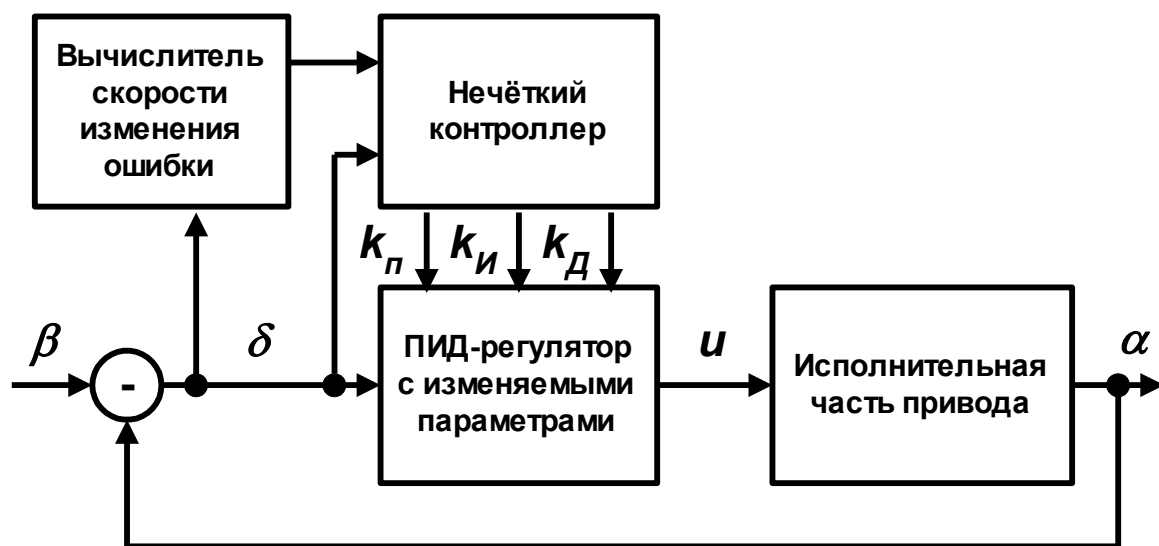


Рисунок 1.18 Структурная схема следящего привода с нечётким ПИД-регулятором

В работах [11,12] показано, что целесообразно определять коэффициенты ПИД-регулирования в зависимости от текущих значений рассогласования δ и скорости его изменения. Таким образом, главное отличие нечёткого ПИД-регулятора от традиционного линейного ПИД-регулятора состоит в вычислении с помощью нечёткого контроллера и непрерывной адаптивной под-

стройке коэффициентов усиления k_P , k_I , k_D в зависимости от текущих значений некоторых переменных системы, например, рассогласования δ и скорости его изменения.

База правил и функции принадлежности, определяющие алгоритмы функционирования нечёткого контроллера, разрабатываются экспертами и затем проходят этап экспериментальной доработки. Это позволяет найти и реализовать наилучшие законы автоматической подстройки параметров нечёткого ПИД-регулятора, которые дают возможность уменьшить перерегулирование, снизить длительность переходных процессов и обеспечить робастность системы управления. В частности, наличие связи по скорости изменения рассогласования даёт возможность учесть тенденции развития процессов в системе и заблаговременно внести коррективы в сигнал управления исполнительной частью привода.

В качестве примера рассматривается объект управления, имеющий передаточную функцию

$$W_O(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени. $T_1 = 0,1$ с. Точное значение T_2 заранее неизвестно, но находится в диапазоне от 0,2 с до 5 с.

Система управления является следящей системой, отрабатывающей задающее воздействие $\beta(t)$ и замкнутой жёсткой единичной отрицательной обратной связью по регулируемой переменной $\Omega(t)$, представляющей собой скорость движения объекта управления.

Нечёткий регулятор имеет три параллельно работающих канала, которые обрабатывают сигналы пропорциональной x_p , интегральной x_i и дифференциальной x_d составляющих закона

управления. Динамический фильтр служит для получения на основании рассогласования $\delta(t)$ первой производной от рассогласования по времени xd и интеграла от рассогласования xi , которые наряду с величиной $xp = \delta(t)$ используются для функционирования нечёткого регулятора. В каждом канале производится фаззификация, нечёткий вывод и дефаззификация. Сумма выходных сигналов этих каналов представляет собой управляющее воздействие $U(t)$, подаваемое на объект управления.

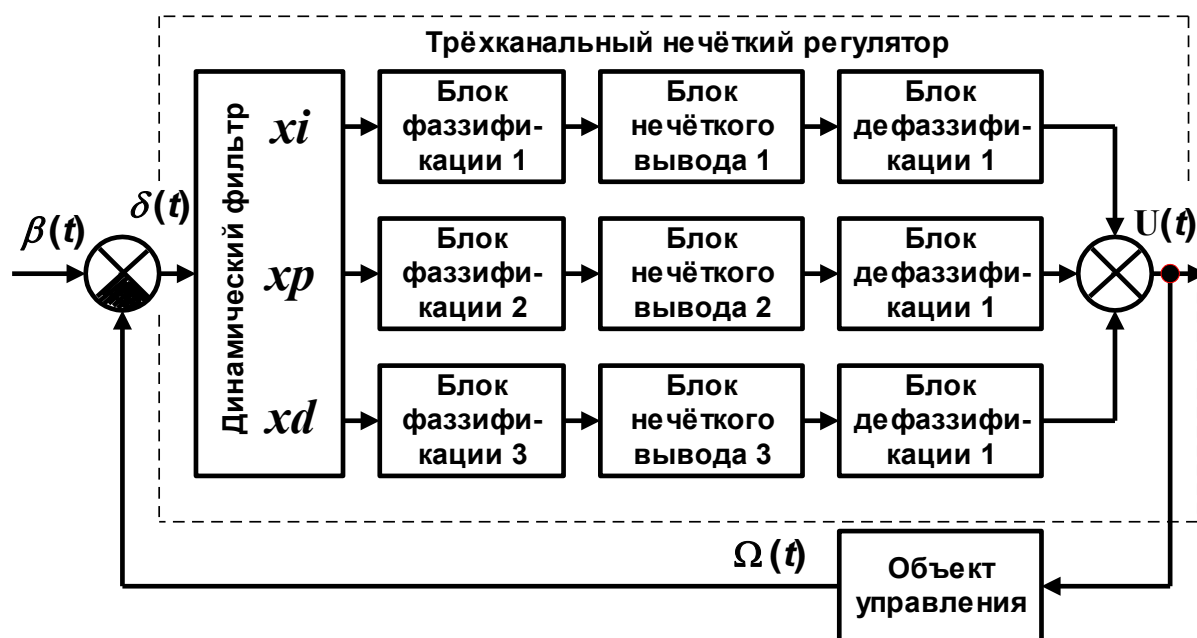


Рисунок 1-19 Структурная схема интеллектуальной системы управления с нечётким регулятором

С переменными xi , xp , xd связаны лингвистические переменные, каждая из которых имеет по четыре терма. Функции принадлежности этих термов $\mu(xi)$, $\mu(xp)$, $\mu(xd)$, предложенные в [14], показаны на рис. 1-20 а, б и в соответственно. Особенности формирования этих функций принадлежности и используемых продукционных правил нечёткого логического вывода также рассмотрены в [14].

1.14 Интеллектуальное управление мобильными роботами на основе нечёткой логики

В настоящее время наиболее популярным является дистанционное управление мобильными роботами со стороны человека-оператора. Но существует ряд ситуаций, в которых дистанционное управление роботами затруднено или невозможно. Примерами являются ситуации, когда связь с роботом отсутствует или ненадёжна, поскольку между постом управления и роботом находятся какие-либо препятствия, велико расстояние до робота или действуют сильные помехи. В ряде случаев робот должен быть автономным, и применение дистанционного управления либо нецелесообразно, либо невозможно. В первом случае функционирование робота может быть направлено на освобождение человека от монотонной и утомительной работы. Во втором случае перед роботом могут быть поставлены столь сложные задачи, что человек-оператор вообще не способен обеспечить качественное управление роботом.

Вместе с тем, автономным роботам приходится работать в заранее неизвестных условиях. Поэтому они должны уметь ориентироваться во внешней среде, используя сведения, получаемые от имеющихся в составе робота датчиков, оценивать создавшуюся ситуацию и самостоятельно принимать правильные решения на основе имеющихся у них знаний. Таким образом, для управления автономными роботами целесообразно использовать интеллектуальные системы, например, построенные на основе нечёткой логики.

Пример построения функций принадлежности и правил нечёткого управления мобильным роботом

Рассматривается частная задача, которая решается при управлении мобильным роботом и состоящая в том, чтобы не допустить столкновение робота с неподвижными препятствиями на его пути (рисунок 1.23). Лазерный дальномер измеряет расстояние d до препятствия и угол α между продольной осью робота и направлением на препятствие. Устройство управления анализирует данные, поступающие от дальномера, и формирует управляющее воздействие u на привод передних колёс робота. Для управления вводятся три лингвистические переменные. Две из них являются входными, а третья – выходной переменной.

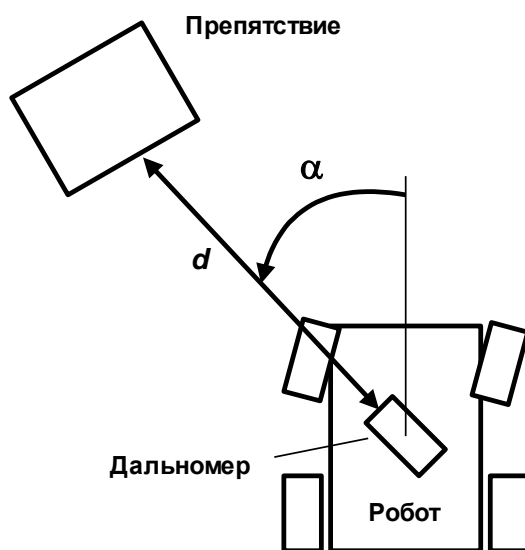


Рисунок 1.23 Схема мобильного робота

Переменная **РАССТОЯНИЕ** характеризует расстояние d до препятствия;

Переменная **НАПРАВЛЕНИЕ** характеризует угол α между продольной осью робота и направлением на препятствие.

Переменная **УПРАВЛЕНИЕ** характеризует управляющее воздействие u на рулевое управление робота.

Значениями лингвистической переменной **РАССТОЯНИЕ** являются термы **БОЛЬШОЕ, СРЕДНЕЕ, МАЛОЕ, ОЧЕНЬ МАЛОЕ**.

Значениями лингвистической переменной **НАПРАВЛЕНИЕ** являются термы **СЛЕВА, ПРЯМО, СПРАВА**.

Значениями лингвистической переменной **УПРАВЛЕНИЕ** являются термы **РЕЗКО ВЛЕВО, ВЛЕВО, ПРЯМО, ВПРАВО, РЕЗКО ВПРАВО**.

Прежде всего, необходимо установить связь между термами лингвистических переменных и соответствующими им физическими величинами. Считаем, что расстояние и угол между продольной осью робота и направлением на препятствие измеряются лазерным дальномером. Данные от этого датчика подвергаются фаззификации. Будем считать, что физическая величина d , которую характеризует переменная **РАССТОЯНИЕ**, измеряется в сантиметрах и может принимать любое значение из диапазона от нуля до бесконечности. Семейство функций принадлежности, предложенное экспертами, показано на рисунке 1.24.

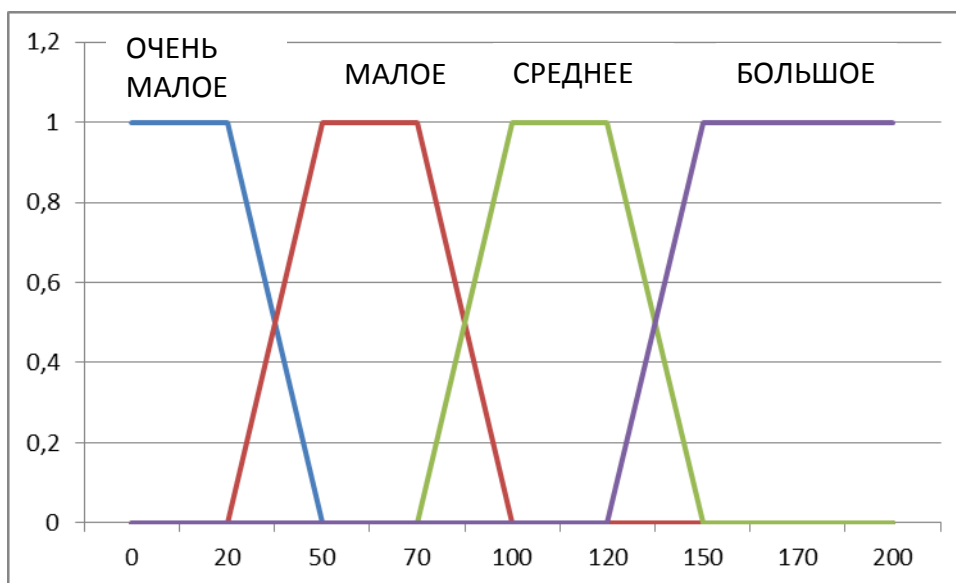


Рисунок 1.24 Функции принадлежности термов лингвистической переменной **РАССТОЯНИЕ**

Переменная **НАПРАВЛЕНИЕ** связана с углом α между продольной осью робота и направлением на препятствие, который измеряется в градусах и может принимать значения в диапазоне от -180 градусов до $+180$ градусов. В частности, если $\alpha = -90$ градусов, то препятствие находится справа от робота, а при $\alpha = +90$ градусов оно расположено слева от робота.

Функции принадлежности термов **СЛЕВА**, **ПРЯМО**, **СПРАВА** показаны на рисунке 1.25.

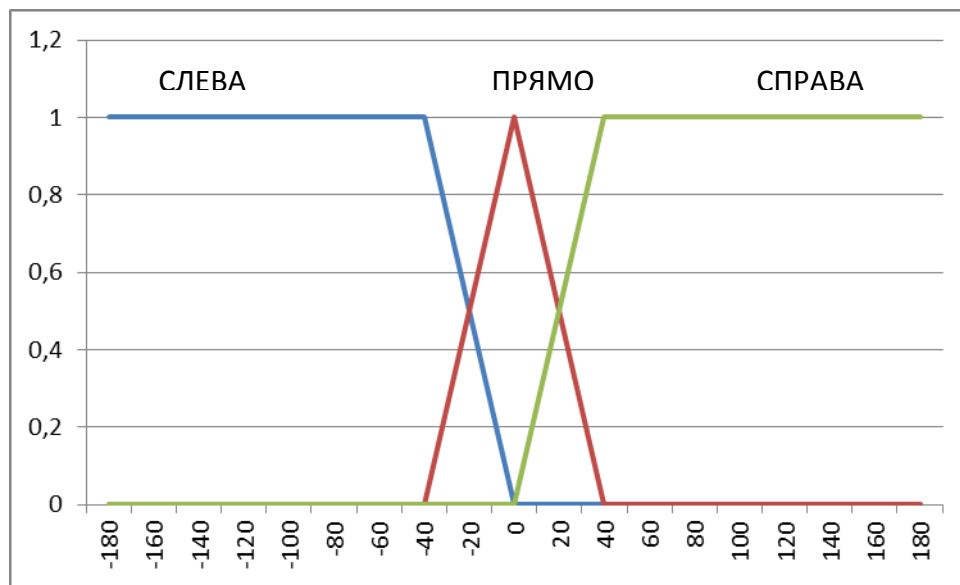


Рисунок 1.25 Функции принадлежности термов лингвистической переменной **НАПРАВЛЕНИЕ**

Полагаем, что физическая величина u , которую характеризует переменная **УПРАВЛЕНИЕ**, представляет собой напряжение, которое может принимать значение от -10 В до $+10$ В. Функции принадлежности термов **РЕЗКО ВЛЕВО**, **ВЛЕВО**, **ПРЯМО**, **ВПРАВО**, **РЕЗКО ВПРАВО** показаны на рисунке 1.26.

Связь между термами входных и выходных лингвистических переменных задаётся в виде базы нечётких правил и запоминается в таблице (табл. 1.6). Каждая запись в этой таблице соответствует определённому правилу преобразования входных лингвистических переменных в выходную лингвистическую переменную. Всего используется 12 правил.

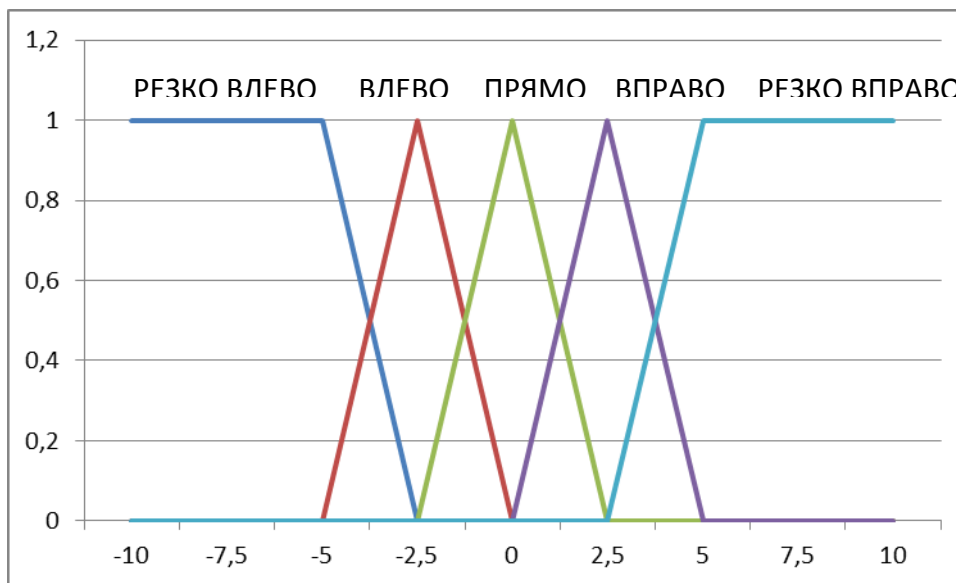


Рисунок 1.26 Функции принадлежности термов лингвистической переменной **УПРАВЛЕНИЕ**

Таблица 1.6 Таблица нечётких правил

Расстояние					
Направление		Большое	Среднее	Малое	Очень малое
	Слева	Прав.1-1	Прав.1-2	Прав.1-3	Прав.1-4
	Прямо	Прав.2-1	Прав.2-2	Прав.2-3	Прав.2-4
	Справа	Прав.3-1	Прав.3-2	Прав.3-3	Прав.3-4

В развёрнутой форме эти правила имеют следующий вид.

Правило 1-1:

Если «**РАССТОЯНИЕ БОЛЬШОЕ**» и «**НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА**», то «**УПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО**»

Правило 1-2:

Если «**РАССТОЯНИЕ СРЕДНЕЕ**» и «**НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА**», то «**УПРАВЛЕНИЕ ВПРАВО**»

Правило 1-3:

Если **«РАССТОЯНИЕ МАЛОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО»**

Правило 1-4:

Если **«РАССТОЯНИЕ ОЧЕНЬ МАЛОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО»**

Правило 2-1:

Если **«РАССТОЯНИЕ БОЛЬШОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО»**

Правило 2-2:

Если **«РАССТОЯНИЕ СРЕДНЕЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ ВПРАВО»**

Правило 2-3:

Если **«РАССТОЯНИЕ МАЛОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО»**

Правило 2-4:

Если **«РАССТОЯНИЕ ОЧЕНЬ МАЛОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО»**

Правило 3-1:

Если **«РАССТОЯНИЕ БОЛЬШОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ СПРАВА»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО»**

Правило 3-2:

Если **«РАССТОЯНИЕ СРЕДНЕЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ СПРАВА»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ ВЛЕВО»**

Правило 3-3:

Если **«РАССТОЯНИЕ МАЛОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ СПРАВА»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВЛЕВО»**

Правило 3-4:

Если **«РАССТОЯНИЕ ОЧЕНЬ МАЛОЕ»** и **«НАПРАВЛЕНИЕ СПРАВА»**, то **«УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВЛЕВО»**

Согласно приведённым в таблице 1.6 правилам с учётом функций принадлежности проводится логическая обработка нечётких множеств и образуется результирующая функция принадлежности выходного воздействия. Выходные данные дефазифицируются, и полученное в результате выходное воздействие поступает на привод управления поворотом колёс робота.

Пример. Расстояние $d = 85$ см; угол $\alpha = 20$ градусов. В этом случае результат формирования сигнала управления фактически определяется четырьмя правилами, степень активации которых отлична от нуля.

Правило 1-2:

Если «**РАССТОЯНИЕ СРЕДНЕЕ**» и «**НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА**», то «**УПРАВЛЕНИЕ ВПРАВО**»

Правило 1-3:

Если «**РАССТОЯНИЕ МАЛОЕ**» и «**НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА**», то «**УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО**»

Правило 2-2:

Если «**РАССТОЯНИЕ СРЕДНЕЕ**» и «**НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО**», то «**УПРАВЛЕНИЕ ВПРАВО**»

Правило 2-3:

Если «**РАССТОЯНИЕ МАЛОЕ**» и «**НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО**», то «**УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО**»

Степень соответствия величины $d = 85$ см терму «**РАССТОЯНИЕ СРЕДНЕЕ**» равно 0,5.

Степень соответствия величины $d = 85$ см терму «**РАССТОЯНИЕ МАЛОЕ**» равно 0,5.

Степень соответствия величины $\alpha = 20$ градусов терму «**НАПРАВЛЕНИЕ СЛЕВА**» равно 0,5.

Степень соответствия величины $\alpha = 20$ градусов терму «**НАПРАВЛЕНИЕ ПРЯМО**» равно 0,5.

Таким образом, степени активации правил 1-2, 1-3, 2-2, 2-3 одинаковы и равны 0,5. Поэтому функция принадлежности терма «**УПРАВЛЕНИЕ ВПРАВО**» ограничивается сверху на уровне, равном 0,5. На таком же уровне ограничивается и функция принадлежности терма «**УПРАВЛЕНИЕ РЕЗКО ВПРАВО**». Результат преобразования функций принадлежности представлен на рисунке 1.27. Ограниченные функции принадлежности термов переменной «**УПРАВЛЕНИЕ**» объединяются логической операцией OR (ИЛИ).

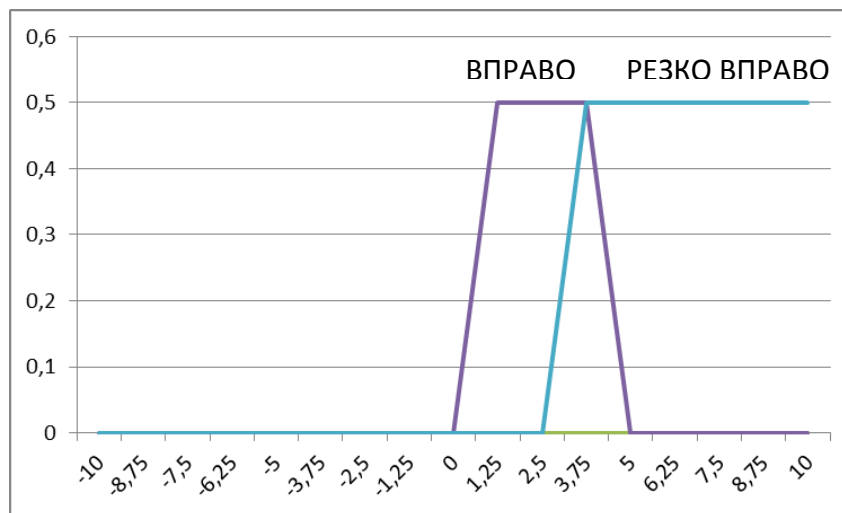


Рисунок 1.27 Объединение функций принадлежности переменной «**УПРАВЛЕНИЕ**»

В результате дефаззификации по методу определения координаты центра тяжести фигуры, соответствующей результирующей функции принадлежности выходной переменной, находим управляющее воздействие $u \approx +5$ В.