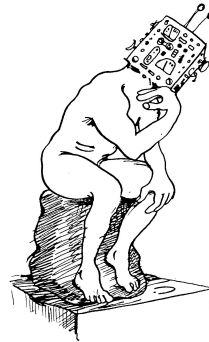


ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Лекция 6. Нечеткая логика

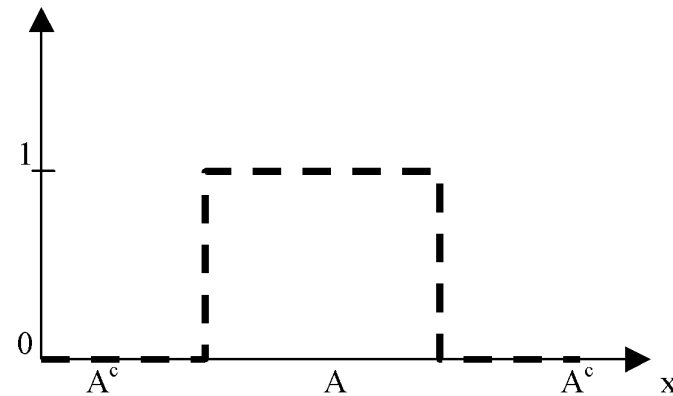


ПОНЯТИЕ НЕЧЕТКОГО МНОЖЕСТВА

- Основой четкого множества является характеристическая функция χ_A

$$\chi_A : x \rightarrow \{0,1\}$$

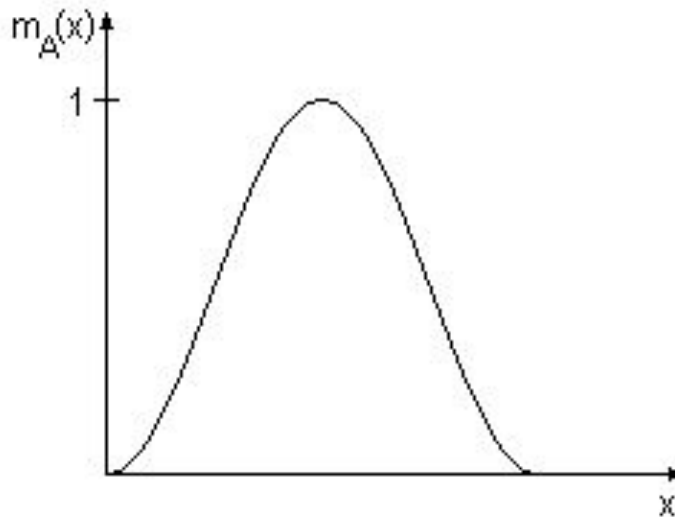
$$\chi_A(x) = \begin{cases} 0, & x \notin A \\ 1, & x \in A \end{cases}$$



- Элемент либо принадлежит множеству ($\chi_A=1$), либо нет ($\chi_A=0$). Третьего не дано (пресловутый принцип исключения третьего).
- Следствием теории четких множеств является булева логика, все то множество схем рассуждений и выводов, которые опираются на понятие характеристической функции.

Нечеткие множества

- Л.А.Заде из Калифорнийского университета. В основе нечеткой логики лежит теория *нечетких множеств*.
- В теории нечетких множеств вместо характеристической функции используется функция принадлежности $m_A: X \rightarrow [0, 1]$.
- m_A – это **субъективная** оценка степени принадлежности элемента x к множеству A .



Примеры

Понятие "маленького числа" (на множестве от нуля до 10) можно определить в виде нечеткого множества

$$A = 1/0 + 1/1 + 0.8/2 + 0.5/3 + 0.1/4 + 0/5 + 0/6 + 0/7 + 0/8 + 0/9 + 0/10$$

Интерпретация:

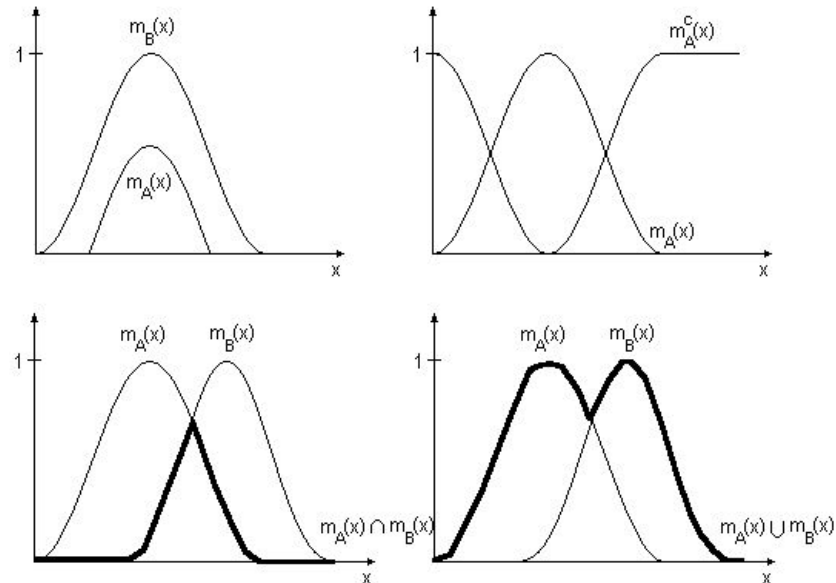
- число 0 однозначно является маленьким ($m_A=1$),
- число 1 – тоже
- число 2 – уже не очень маленькое ($m_A=0.8$). Это тем более касается чисел 3 ($m_A=0.5$) и 4 ($m_A=0.1$, т.е. 4 – это почти наверняка немаленькое число).
- числа от 5 до 10 – однозначно не маленькие ($m_A=0$).

Лингвистические переменные

- Не обязательно использовать числовые оценки. Зачастую, с точки зрения взаимодействия с пользователем, целесообразнее использовать т.н. "лингвистические переменные" – термины типа "много", "мало", "высокий", "низкий" и т.п.

ОПЕРАЦИИ НАД НЕЧЕТКИМИ МНОЖЕСТВАМИ

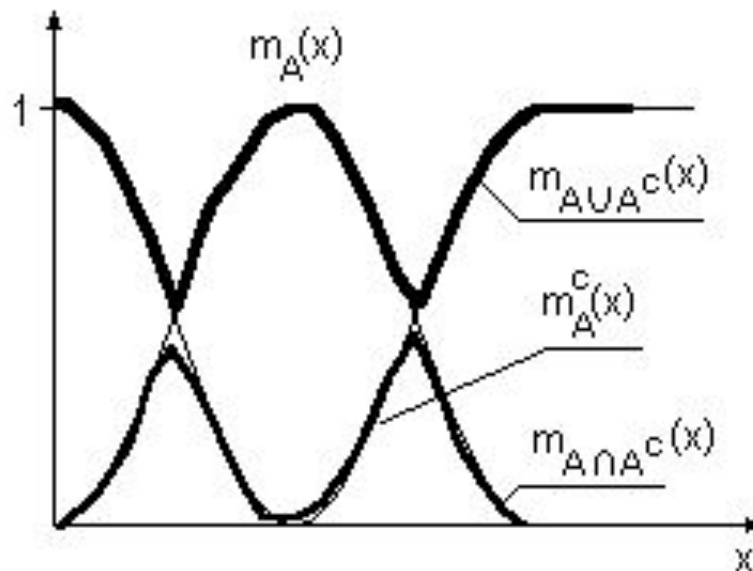
- $A \subset B \leftrightarrow m_A(x) \leq m_B(x) \quad \forall x \in X$
- **Отрицание** нечеткого множества:
 $m_A^c(x) = 1 - m_A(x)$
- **Пересечение** двух множеств (как вычисление минимума двух функций принадлежности):
 $m_{A \cap B}(x) = m_A(x) \wedge m_B(x)$
- **Объединение** двух множеств (максимум двух функций принадлежности):
 $m_{A \cup B}(x) = m_A(x) \vee m_B(x)$



Закон комплементарности

- В нечетких множествах закон *комплементарности*, в общем случае, не выполняется, т.е.

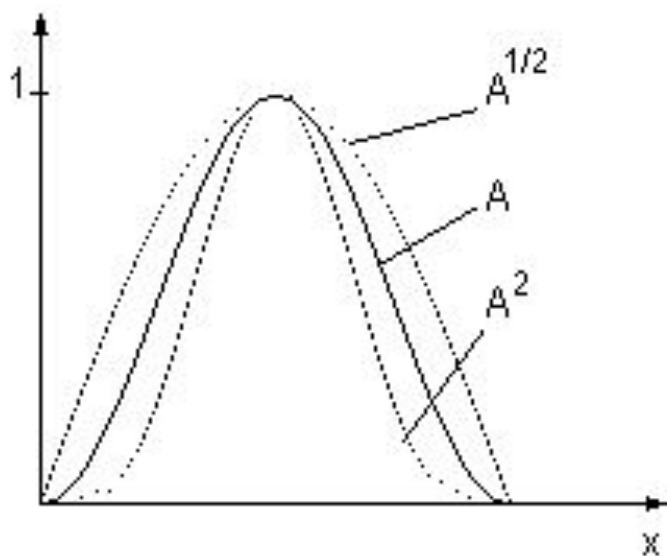
$$A \cap A^c \supset 0, A \cup A^c \subset X$$



Степень нечеткого множества

- Степень α нечеткого множества A ($\alpha > 0$)

$$m_A^\alpha(x) = \{m_A(x)\}^\alpha \quad \forall x \in X$$



A^2 сужает диапазон
некоторой нечеткой
информации
 $A^{1/2}$ - расширяет

Прочие операции

Алгебраическое произведение $A \cdot B$

$$m_{A \cdot B}(x) = m_A(x) \cdot m_B(x)$$

Граничное произведение $A \otimes B$

$$m_{A \otimes B}(x) = (m_A(x) + m_B(x) - 1) \vee 0$$

Драстическое (от англ. drastic - решительный) произведение $A \Delta B$

$$m_{A \Delta B} = \begin{cases} m_A(x) & \text{при } m_B(x) = 1 \\ m_B(x) & \text{при } m_A(x) = 1 \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases}$$

Алгебраическая сумма $A + B$

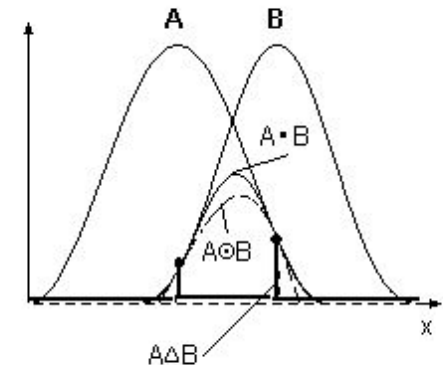
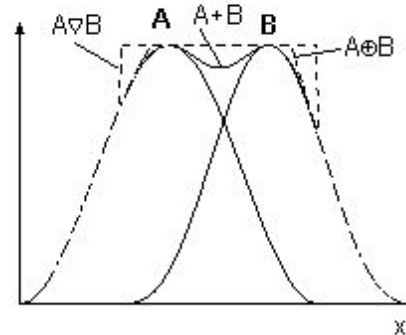
$$m_{A+B}(x) = m_A(x) + m_B(x) - m_A(x)m_B(x)$$

Граничная сумма $A \oplus B$

$$m_{A \oplus B}(x) = (m_A(x) + m_B(x)) \wedge 1$$

Драстическая сумма $A \nabla B$

$$m_{A \nabla B} = \begin{cases} m_A(x) & \text{при } m_B(x) = 0 \\ m_B(x) & \text{при } m_A(x) = 0 \\ 1 & \text{в других случаях} \end{cases}$$



НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА N-ГО РОДА

- Для НМ *первого рода* функция принадлежности выглядит как отображение

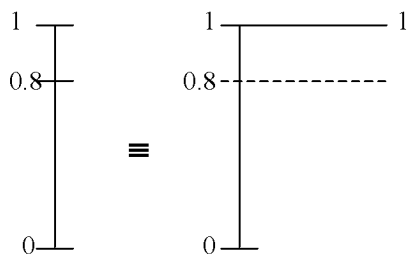
$$m_A: X \rightarrow [0,1] \quad (m_A(x) \in [0,1], x \in X)$$

- Нечеткое множество *второго рода* осуществляет отображение

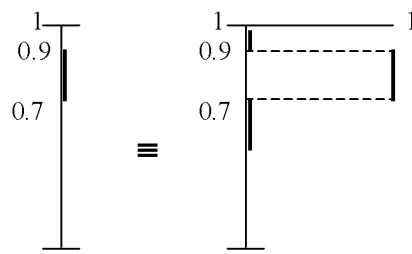
$$m_A: X \rightarrow [0,1][0,1]$$

Т.е. используются не точные оценки в определенном интервале, а в качестве значений $m_A(x)$ принимается *нечеткое множество над значениями оценки* в $[0,1]$.

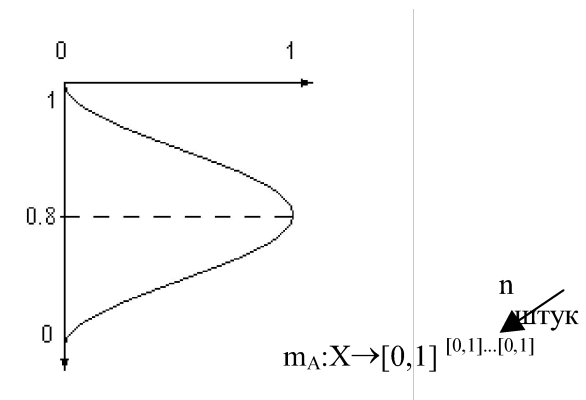
- Пусть принадлежность некоторой величины x к A оценивается в 0.8 (НМ 1-го рода, (а)).
- Если величина именно в 0.8 вызывает у нас сомнения, то можно сказать, что наша оценка *лежит в интервале* от 0.7 до 0.9 (б). Однако можно сказать что сама оценка представляет собой нечеткое множество. И тогда мы будем иметь дело уже с *НМ 2-го рода* (в).



а) НМ 1-го рода



б) НМ со значением в интервале



в) НМ 2-го рода

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА

- От рассмотрения нечетких множеств пора переходить к нечеткой логике.
- Рассмотрим расширение операций НЕ, И, ИЛИ до нечетких операций, называемых нечетким отрицанием, t -нормой и s -нормой соответственно.
- При этом мы дадим сначала определение того, *какими свойствами* должна обладать операция, а затем приведем *примеры возможной реализации* этой операции (с точки зрения математики это красиво).

Аксиоматика определений

Нечеткое отрицание

$$\sim : [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$а) \sim 0 = 1$$

$$б) \sim (\sim x) = x$$

$$в) x_1 < x_2 \rightarrow \sim x_1 > \sim x_2$$

(т.е. $\sim$ - монотонная строго убывающая функция)

Пример нечеткого отрицания $\sim : \sim x = 1 - x$

t-норма (триангулярная норма)

$$T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$T1: xT1 = x, xT0 = 0$$

$$T2: x_1Tx_2 = x_2Tx_1$$

$$T3: x_1T(x_2Tx_3) = (x_1Tx_2)Tx_3$$

$$T4: x_1 \leq x_2 \rightarrow x_1Tx_3 \leq x_2Tx_3$$

В качестве примеров t-нормы можно рассмотреть такие операции, как:

1) операция $\min$ (или логическое произведение): $x_1Tx_2 = x_1 \wedge x_2$

2) $x_1 \cdot x_2 = x_1x_2$

3) $x_1 \otimes x_2 = (x_1 + x_2 - 1) \vee 0$

$$4) x_1 \Delta x_2 = \begin{cases} x_1 & \text{при } x_2 = 1 \\ x_2 & \text{при } x_1 = 1 \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases}$$

Аксиоматика определений

s-норма

$$S: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$S1: xS1 = 1, xS0 = x$$

$$S2: x_1Sx_2 = x_2Sx_1$$

$$S3: x_1S(x_2Sx_3) = (x_1Sx_2)Sx_3$$

$$S4: x_1 \leq x_2 \rightarrow x_1Sx_3 \leq x_2Sx_3$$

В качестве примеров s-нормы можно рассмотреть такие операции, как:

1) операция max (или логическая сумма): $x_1Sx_2 = x_1 \vee x_2$

2) $x_1+x_2 = x_1+x_2-x_1x_2$

3) $x_1 \oplus x_2 = (x_1+x_2) \wedge 1$

4)
$$x_1 \nabla x_2 = \begin{cases} x_1 & \text{при } x_2 = 0 \\ x_2 & \text{при } x_1 = 0 \\ 1 & \text{в других случаях} \end{cases}$$

НЕЧЕТКИЕ ВЫВОДЫ И НЕЧЕТКАЯ ИМПЛИКАЦИЯ

- Теперь мы имеем полный набор нечетких логических операций.
- Осталось только понять, каким образом мы сможем применять их в процессе логического вывода.
- На практике нечеткая логика применима особенно тогда, когда мы имеем дело с приближенными рассуждениями – приближенными оценками, приближенными правилами и т.п.

Пусть, к примеру, существуют знания эксперта в виде

Если "уровень воды высокий", То "открыть кран"

ант ец ед ент
(предпосылка)

к о н с е к с е в е н т
(з а к л ю ч е н и е)

Что необходимо сделать в той ситуации, когда "Уровень воды довольно высокий"?

Т.е. нам надо понять, насколько необходимо открыть кран в этой ситуации (Видимо, надо "слегка открыть" кран).

Определение понятий

- "*Высокий*" ("*уровень воды высокий*") :
"*Высокий*" = $0.7/1.5\text{м} + 0.3/1.6\text{м} + 0.7/1.7\text{м} + \dots + 1/2\text{м} + 1/2.1\text{м} + 1/2.2\text{м}$
- "*Открыть*" ("*открыть кран*"):
"*Открыть*" = $0.1/30^\circ + 0.2/40^\circ + \dots + 0.8/70^\circ + 1/80^\circ + 1/90^\circ$
- "*Уровень воды довольно высокий*":
"*Довольно высокий*" = $0.5/1.6\text{м} + 1/1.7\text{м} + 0.8/1.8\text{м} + 0.2/1.9\text{м}$

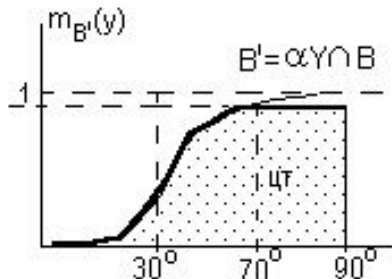
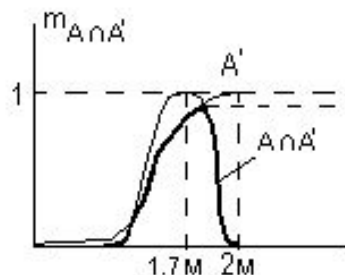
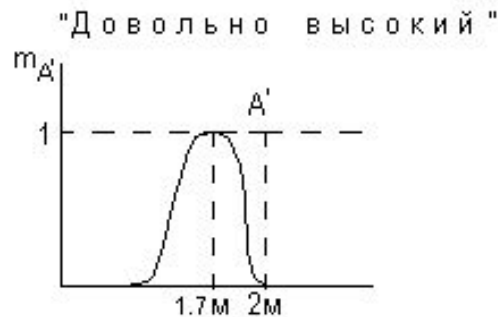
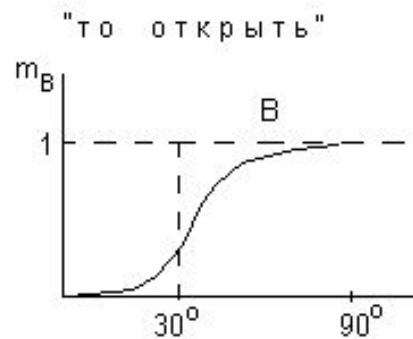
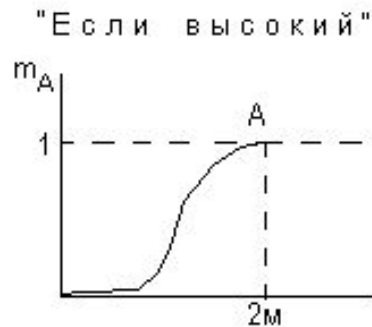
Итак, мы получаем следующую формальную схему:

Если *Высокий*, То *Открыть*
"Довольно высокий"

?

Схема вывода

Определение понятия "слегка открыть".



Отсечение по мере сопоставления α

«Слегка открыть» - это поворот на 70° (точка 70° – это т.н. центральная точка – или центр тяжести заштрихованной фигуры).

Процесс обратного нечеткого вывода, рассмотренный выше, называется **дефадзификацией**.

Нечеткая импликация

- Основная операция логического вывода – это импликация. Обычно в качестве импликации используется t-норма типа логического произведения:

$$x_1 \rightarrow x_2 = x_1 \wedge x_2$$

$$m_R(x,y) = m_{A \rightarrow B}(x,y) = (1 - m_A(x) + m_B(y)) \wedge 1$$

Получение нечеткого результата вывода

- Если дано знание эксперта в виде нечеткого отношения $R=A \rightarrow B$, то процесс получения нечеткого результата вывода B' с использованием данных наблюдения A' и знания $A \rightarrow B$ можно представить как $B' = A' \cdot R = A' \cdot (A \rightarrow B)$, где $'\cdot'$ - т.н. *композиционное правило нечеткого вывода*.
- В частности, имеем

$$\begin{aligned} m_{B'} &= \bigvee_{x \in \infty} [m_{A'}(x) \wedge m_R(x, y)] = \bigvee_{x \in \infty} [m_{A'}(x) \wedge (m_A(x) \wedge m_B(y))] = [\bigvee_{x \in \infty} (m_{A'}(x) \wedge m_A(x))] \wedge m_B(y) = \\ &= \bigvee_{x \in \infty} m_{A' \cap A}(x) \wedge m_B(y) = \alpha \wedge m_x(y) = m_{\alpha Y \cap B}(y) \end{aligned}$$

Осталось определить ЦТ. В качестве ЦТ можно выбрать центр тяжести композиции максимум-минимум, использовать медианы (среднее значение) и т.п.

$$ЦТ = \frac{\int_Y y m_{B'}(y) dy}{\int_Y m_{B'}(y) dy}$$

Пример системы нечеткого управления

- Нечеткое управление скоростью
- Задача плавного торможения/разгона поезда при соблюдении условия максимально точного позиционирования состава относительно пассажирской платформы.
- Нечеткие контроллеры

Нечеткие контроллеры

Обычно нечеткие контроллеры оперируют лингвистическими правилами управления, представленными в виде:

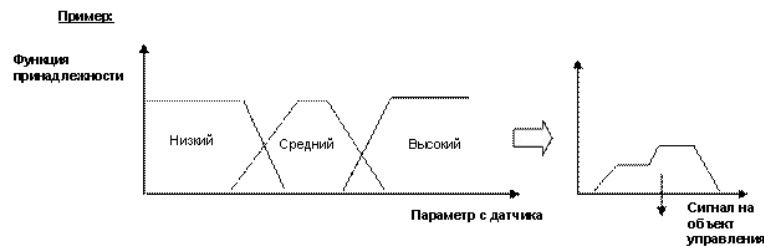
если e_k есть P_1 , то ΔU_k есть P_{U1}

.....

если Δe_k есть P_2 , то ΔU_k есть P_{U2}

и т.п., где

- $e_k = r - y_k$ отклонение регулируемой величины
- $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$
- $\Delta^2 e_k = \Delta e_k - \Delta e_{k-1}$ разность отклонений 2-го порядка
- $\Delta U_k = U_k - U_{k-1}$ приращение задающей величины



Нечеткие контроллеры

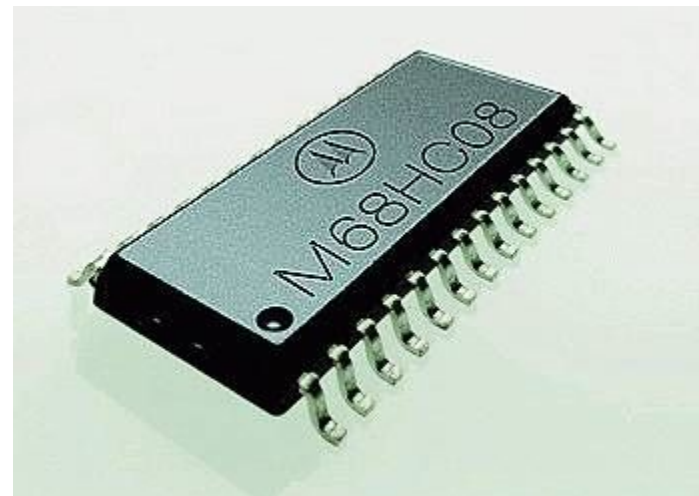
Нечеткий контроллер содержит:

- блок фазификации,
- базу знаний,
- блок решений
- блок дефазификации.

Блок фазификации преобразует четкие величины, измеренные на выходе объекта управления, в нечеткие величины, описываемые лингвистическими переменными в БЗ.

Блок решений использует нечеткие условные правила, заложенные в БЗ, для преобразования нечетких входных данных в требуемые управляющие воздействия также нечеткого характера.

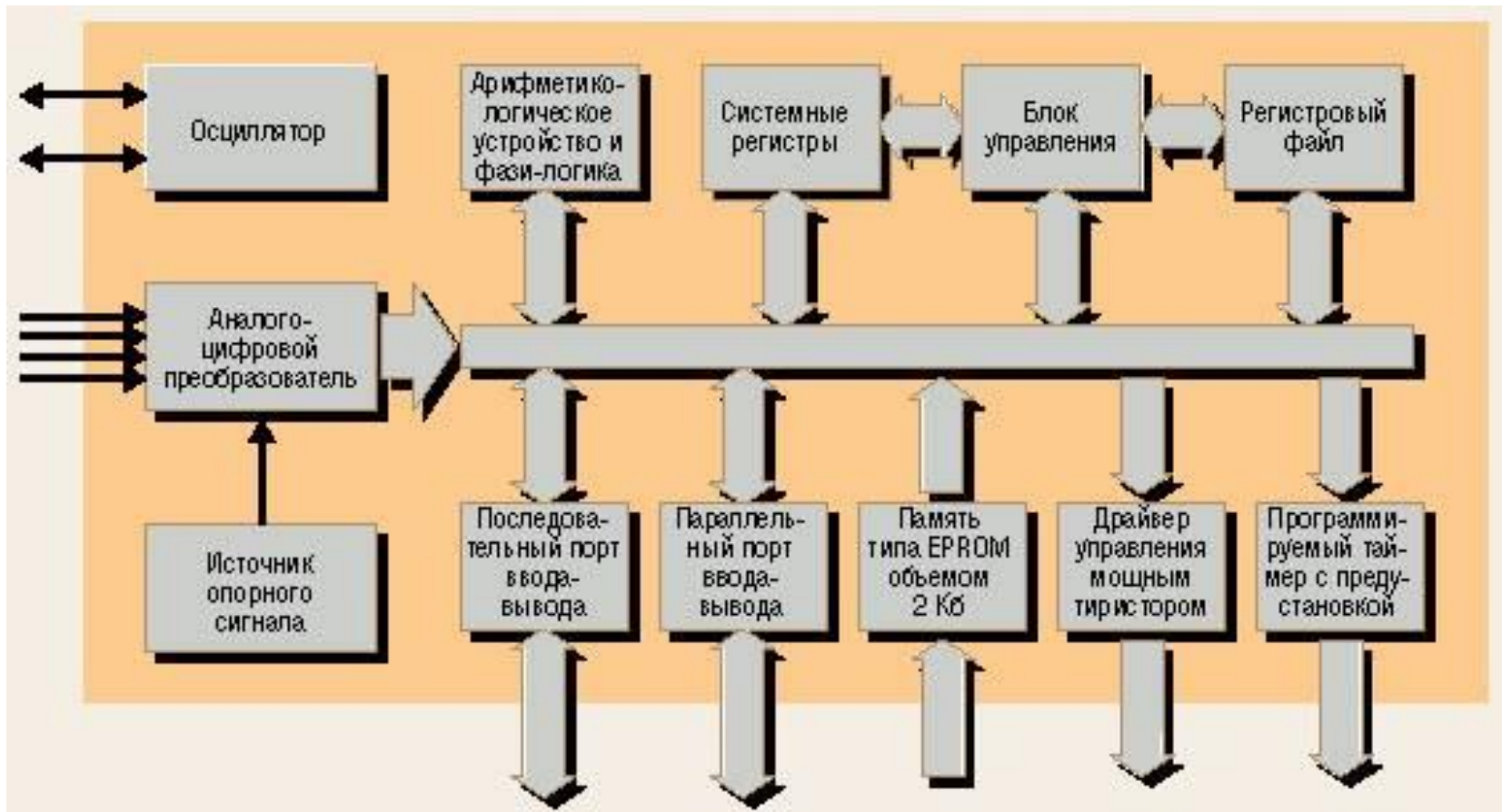
Блок дефазификации преобразует нечеткие данные с выхода блока решений в четкую величину, которая используется для управления объектом.



- Аппаратный реализация
- Программная (эмуляция)
- Гибридная

Микроконтроллер ST52x301

- Блок-схема

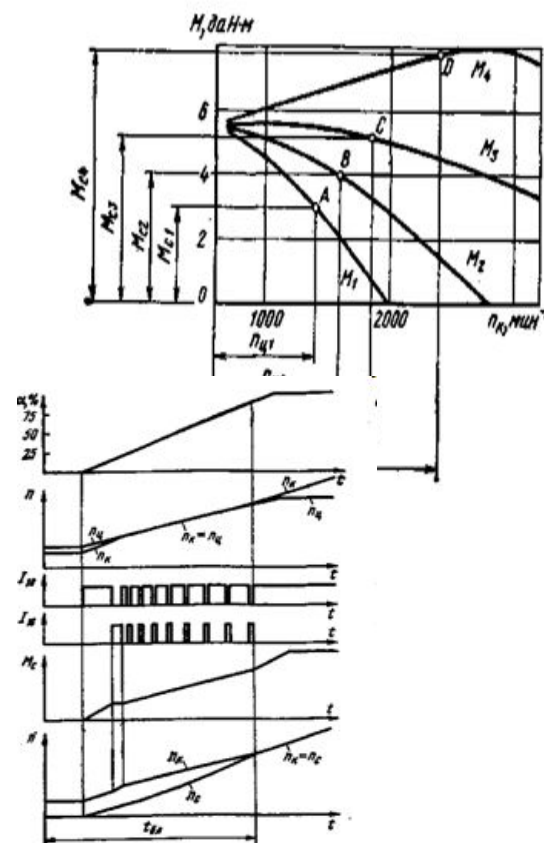


Задача управления автомобилем

- Передаточная функция объекта управления (блок управления + карбюратор + автомобиль) имеет вид

$$F = \frac{35.78}{(1.735p + 1)(16.85p + 1)}$$

Основной задачей СУ может являться регулирование по заданному закону момента M_c , в зависимости от угла открытия дроссельной заслонки, частоты вращения коленчатого вала, его ускорения (замедления) и включения в коробке передач той или иной передачи.



Заключение

- *Zadeh, Lotfi. Fuzzy Sets / Information and Control, 8(3), June 1965, pp.338-53.*
- В 1989 году Национальный научный фонд США обсуждал вопрос об исключении НЛ из всех институтских учебников
- 1990. Комитет по контролю над экспортом (COCOM) внес НЛ в список критически важных оборонных технологий, не подлежащих экспорту потенциальному противнику.
- Fuji Bank. Решение сложной финансовой задачи - игра на рынке ценных бумаг в режиме “on-line”. Первый год использования новой системы приносил банку в среднем \$770'000 в месяц (официально). Нечеткая ЭС, управляющая игрой “электронного трейдера”, состоит всего из 200 правил (50 из которых взяты непосредственно из классического учебника Murphy по финансовому анализу).