

19 СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

Нечеткий вывод занимает центральное место в нечеткой логике и системах нечеткого управления. Процесс нечеткого вывода представляет собой некоторую процедуру или алгоритм получения нечетких заключений на основе нечетких условий или предпосылок с использованием рассмотренных ранее понятий нечеткой логики. Этот процесс соединяет в себе все основные концепции теории нечетких множеств: функции принадлежности, лингвистические переменные, нечеткие логические операции, методы нечеткой импликации и нечеткой композиции.

Системы нечеткого вывода предназначены для реализации процесса нечеткого вывода и служат концептуальным базисом всей современной нечеткой логики. Достигнутые успехи в применении этих систем для решения широкого класса задач управления послужили основой становления нечеткой логики как прикладной науки с богатым спектром приложений. Системы нечеткого вывода позволяют решать задачи автоматического управления, классификации данных, распознавания образов, принятия решений, машинного обучения и многие другие.

Поскольку разработка и применение систем нечеткого вывода имеет междисциплинарный характер, данная проблематика исследований тесно взаимосвязана с целым рядом других научно-прикладных направлений, таких как: нечеткое моделирование, нечеткие экспертные системы, нечеткая ассоциативная память, нечеткие логические контроллеры, нечеткие регуляторы и просто нечеткие системы.

19.1 Базовая архитектура систем нечеткого вывода

Рассматриваемые в настоящей лекции системы нечеткого вывода явля-

ются частным случаем продукционных нечетких систем или систем нечетких правил продукций, в которых условия и заключения отдельных правил формулируются в форме нечетких высказываний относительно значений тех или иных лингвистических переменных. Поскольку нечеткие лингвистические высказывания имеют фундаментальное значение в контексте современной нечеткой логики, изучение систем нечеткого вывода начнем именно с них.

Нечеткие лингвистические высказывания

Нечеткое лингвистическое высказывание. *Нечетким лингвистическим высказыванием* будем называть высказывания следующих видов.

1. Высказывание " β есть α ", где β – наименование лингвистической переменной, α – ее значение, которому соответствует отдельный лингвистический терм из базового терм-множества T лингвистической переменной β .

2. Высказывание " β есть $\nabla\alpha$ ", где ∇ – модификатор, соответствующий таким словам, как: "ОЧЕНЬ", "БОЛЕЕ ИЛИ МЕНЕЕ", "МНОГО БОЛЬШЕ" и другим, которые могут быть получены с использованием процедур G и M данной лингвистической переменной.

3. Составные высказывания, образованные из высказываний видов 1 и 2 и нечетких логических операций в форме связок: "И", "ИЛИ", "ЕСЛИ-ТО", "НЕ".

Поскольку в системах нечеткого вывода нечеткие лингвистические высказывания занимают центральное место, далее будем их называть просто нечеткими высказываниями.

Рассмотрим некоторые примеры нечетких высказываний. Первое из них – "*скорость автомобиля высокая*" представляет собой нечеткое высказывание первого вида, в рамках которого лингвистической переменной "*скорость автомобиля*" присваивается значение "*высокая*". При этом предполагается, что на универсальном множестве X переменной "*скорость автомобиля*" определен соответствующий лингвистический терм "*высокая*", который задается в форме функции принадлежности некоторого нечеткого множества.

Нечеткое высказывание второго вида "*скорость автомобиля очень вы-*

сокая" означает, что лингвистической переменной *"скорость автомобиля"* присваивается значение *"высокая"* с модификатором "ОЧЕНЬ", который изменяет значение соответствующего лингвистического термина *"высокая"* на основе использования некоторой расчетной формулы для операции концентрации $CON(A)$ нечеткого множества A для термина *"высокая"*.

Нечеткое высказывание второго вида *"скорость автомобиля более или менее высокая"* означает, что лингвистической переменной *"скорость автомобиля"* присваивается значение *"высокая"* с модификатором "БОЛЕЕ ИЛИ МЕНЕЕ", КОТОРЫЙ изменяет значение соответствующего лингвистического термина *"высокая"* на основе использования некоторой расчетной формулы, например, операции растяжения $DEL(A)$ нечеткого множества A для термина *"высокая"*.

Ниже на рисунке 1 изображен пример функции принадлежности термножества *"средняя"* лингвистической переменной *"скорость автомобиля"* (а) и определение значений функций принадлежности этого же термножества для модификаторов "ОЧЕНЬ" (б) и "БОЛЕЕ МЕНЕЕ" (в).

Наконец, нечеткое высказывание третьего вида *"скорость автомобиля высокая и расстояние до перекрестка близкое"* означает, что одной лингвистической переменной *"скорость автомобиля"* присваивается значение *"высокая"*, а другой лингвистической переменной *"расстояние до перекрестка"* присваивается значение *"близкое"*. Эти нечеткие высказывания первого вида соединены логической операцией нечеткая конъюнкция (операцией нечеткое "И").

При записи нечетких высказываний в форме структурируемого текста на языке FCL используется специальная связка "IS". В этом случае нечеткое высказывание *"давление большое"* может быть представлено в виде *"давление IS большое"*, что может оказаться более удобным для последующей интерпретации.

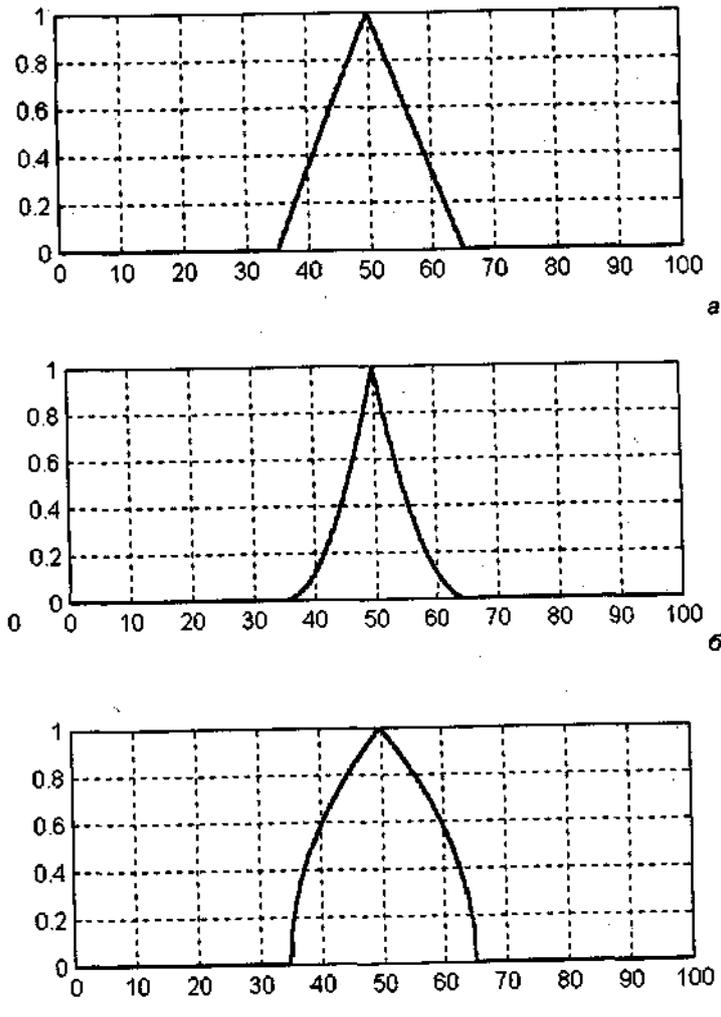


Рисунок 1 – Применение модификаторов "ОЧЕНЬ" (б) и "БОЛЕЕ МЕНЕЕ" (в) к терму "*средняя скорость*" (а)

Правила нечетких продукций в системах нечеткого вывода

Как уже отмечалось ранее, рассматриваемые здесь системы нечеткого вывода являются частным случаем продукционных нечетких систем или систем нечетких правил продукций. Основная особенность нечетких правил, используемых в системах нечеткого вывода, – условия и заключения отдельных нечетких правил формулируются в форме нечетких высказываний вида 1–3 относительно значений тех или иных лингвистических переменных.

Таким образом, всюду далее под *правилом нечеткой продукции* или просто – *нечеткой продукцией* будем понимать выражение следующего вида: $(i): Q; P; A \Rightarrow B; S; F; N$ в котором условие ядра (антецедент) A и заключение ядра (консеквент) B представляют собой нечеткие лингвистические высказы-

вания вида 1–3.

Простейший вариант правила нечеткой продукции, который наиболее часто используется в системах нечеткого вывода, может быть записан в форме:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ЕСЛИ } " \beta_1 \text{ есть } \alpha' ", \text{ ТО } " \beta_2 \text{ есть } \alpha' ". \quad (1)$$

Здесь нечеткое высказывание " β_1 есть α' " представляет собой условие данного правила нечеткой продукции, а нечеткое высказывание " β_2 есть α' " – нечеткое заключение данного правила. При этом считается, что $\beta_1 \neq \beta_2$.

Запись простейшего варианта правила нечеткой продукции в англоязычной транскрипции: RULE $\langle \# \rangle$: IF " β_1 есть α' ", THEN " β_2 есть α' " считается эквивалентной записи (1), если не оговорено обратное. Использование той или иной записи определяется соображениями удобства или необходимости следования некоторым стандартным нотациям.

Система нечетких правил продукции. *Система нечетких правил продукции* или *продукционная нечеткая система* представляет собой некоторое согласованное множество отдельных *нечетких продукции* или правил нечетких продукции в форме "ЕСЛИ A , ТО B " (или в виде: "IF A THEN B "), где A и B – нечеткие лингвистические высказывания вида 1, 2 или 3. Два последних случая нечетких высказываний требуют дополнительного пояснения.

Рассмотрим вариант использования в качестве условия или заключения в некотором правиле нечеткой продукции нечеткого высказывания вида 2, т. е. вида " β есть $\nabla \alpha$ ", где ∇ – модификатор, определяемый процедурами G и M лингвистической переменной β . Пусть терму α соответствует нечеткое множество A . В этом случае исходное нечеткое высказывание " β есть $\nabla \alpha$ " можно преобразовать к виду 1 в форме нечеткого высказывания " β есть α' ", где терм α' получается на основе применения определенной процедурами G и M операции к нечеткому множеству A . Полученное в результате подобной операции нечеткое множество A' принимается за значение терм-множества α' .

Если в качестве условия или заключения используются составные нечеткие высказывания, т. е. образованные из высказываний видов 1 и 2 и нечет-

ких логических операций в форме связок: "И", "ИЛИ", "ЕСЛИ-ТО", "НЕ", то ситуация несколько усложняется. Поскольку вариант использования нечетких высказываний вида 2 сводится к нечетким высказываниям вида 1, то достаточно рассмотреть сложные высказывания, в которых нечеткими логическими операциями соединены только нечеткие высказывания вида 1.

Эта ситуация может соответствовать простейшему случаю, когда нечеткими логическими операциями соединены нечеткие высказывания, относящиеся к одной и той же лингвистической переменной, т. е. в форме: " β есть α " ОП " β есть α ", где ОП – некоторая из бинарных операций нечеткой конъюнкции "И" или нечеткой дизъюнкции "ИЛИ".

Очевидно, в этом простейшем случае нечеткое высказывание " β есть α " И " β есть α " эквивалентно нечеткому высказыванию " β есть α^* ", где термножеству α^* соответствует нечеткое множество A^* , равное пересечению нечетких множеств A' и A'' , которые соответствуют термам α' и α'' .

Соответственно, нечеткое высказывание " β есть α " ИЛИ " β есть α " эквивалентно нечеткому высказыванию " β есть α^* ", где термножеству α^* соответствует нечеткое множество A^* , равное объединению нечетких множеств A' и A'' , которые соответствуют термам α' и α'' .

Рассмотрим составное нечеткое высказывание вида 3: *"скорость автомобиля средняя и скорость автомобиля высокая"*. Ему соответствуют два нечетких высказывания первого вида, соединенные логической операцией нечеткой конъюнкции. Тогда исходное нечеткое высказывание эквивалентно нечеткому высказыванию первого вида: *"скорость автомобиля средняя и высокая"*. Функция принадлежности терма *"средняя и высокая"* изображена на рисунке 2, б более темным фоном.

Рассмотрим аналогичное составное нечеткое высказывание вида 3: *"скорость автомобиля средняя или скорость автомобиля высокая"*. Ему также соответствуют два нечетких высказывания первого вида, соединенные логической операцией нечеткой дизъюнкции. Тогда исходное нечеткое высказывание эквивалентно нечеткому высказыванию первого вида: *"скорость автомобиля*

средняя или высокая". Функция принадлежности термина "*средняя или высокая*" изображена на рисунке 2, в более темном фоне.

Во-вторых, ситуация может соответствовать более сложному случаю, когда нечеткими логическими операциями соединены нечеткие высказывания, относящиеся к разным лингвистическим переменным в условии правила нечеткой продукции, т.е. в форме: " β_1 есть α " ОП " β_2 есть α ", где ОП – некоторая из бинарных операций нечеткой конъюнкции "И" или нечеткой дизъюнкции "ИЛИ", а β_1 и β_2 – различные лингвистические переменные.

Этот вариант правил нечетких продукций может быть записан в следующей общей форме:

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ " β_1 есть α " И " β_2 есть α " ТО " β_3 есть ν " или
 ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ " β_1 есть α " ИЛИ " β_2 есть α " ТО " β_3 есть ν ". (2)

Здесь нечеткие высказывания: " β_1 есть α " И " β_2 есть α ", " β_1 есть α " ИЛИ " β_2 есть α " представляют собой условия правил нечетких продукций, а нечеткое высказывание " β_3 есть ν " – заключение правил. При этом считается, что $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$, а каждое из нечетких высказываний " β_1 есть α ", " β_2 есть α " называют *подусловиями* данных правил нечетких продукций.

В случае правил нечетких продукций в форме (2) необходимо использовать один из методов агрегирования условий в левой части этих правил. Соответствующие методы агрегирования рассматриваются далее при описании этапа агрегирования.

Наконец, нечеткими логическими операциями могут быть соединены нечеткие высказывания, относящиеся к разным лингвистическим переменным в заключении правила нечеткой продукции, т. е. в форме: " β есть α " ОП " β есть α ", где ОП – некоторая из бинарных операций нечеткой конъюнкции "И" или нечеткой дизъюнкции "ИЛИ", а β_1 и β_2 – различные лингвистические переменные.

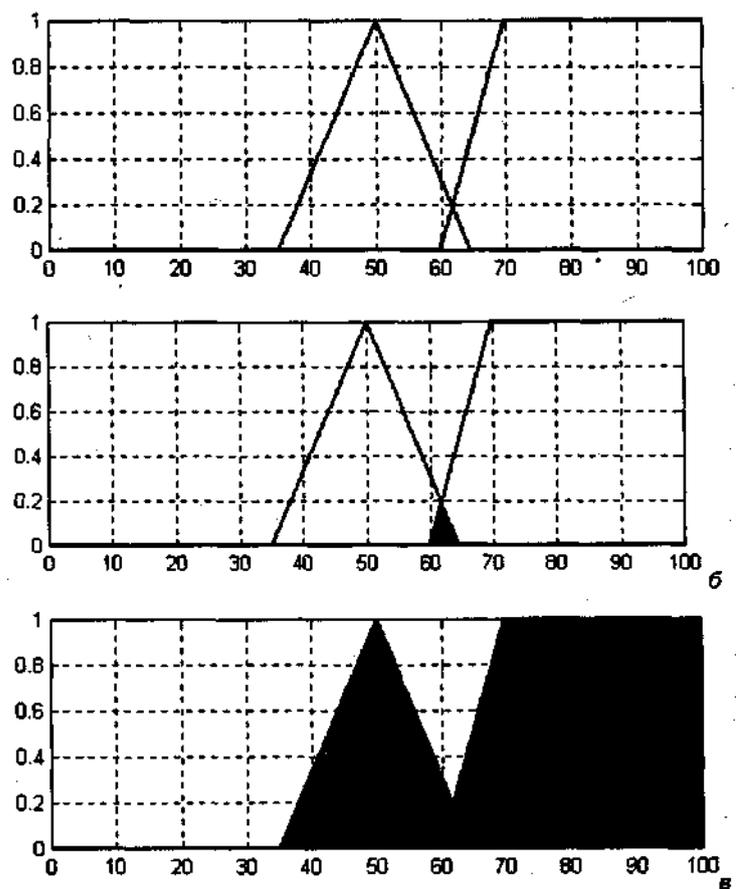


Рисунок 2 – Преобразование составных нечетких высказываний, относящихся к одной и той же лингвистической переменной

Этот вариант правил нечетких продукций может быть записан в следующей общей форме:

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ " β_1 есть α " ТО " β_2 есть α " И " β_3 есть ν " или

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ " β_1 есть α " ТО " β_2 есть α " ИЛИ " β_3 есть ν ". (3)

Здесь нечеткое высказывание " β_1 есть α " представляет собой условие правил нечетких продукций, а нечеткие высказывания: " β_2 есть α " И " β_3 есть ν ", " β_2 есть α " ИЛИ " β_3 есть ν " – заключения данных правил. При этом считается, что $\beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3$, а каждое из нечетких высказываний β_2 есть α , " β_3 есть ν " называют *подзаключениями* данного правила нечеткой продукции.

В случае правил нечетких продукций в форме (3) необходимо использовать один из методов аккумуляции заключений в правилах нечетких продукций. Эти методы также рассматриваются ниже при описании этапа аккумуля-

ции.

Следует отметить, что если использование правил нечетких продукций в форме (2) является широко распространенным, то записи правил нечетких продукций в форме (3) стараются избегать, преобразуя их к форме (1) или (2) на этапе построения базы правил нечетких продукций.

Механизм или алгоритм вывода в системах нечеткого вывода

Механизм или алгоритм вывода является следующей важной частью базовой архитектуры систем нечеткого вывода. Применительно к системам нечеткого вывода механизм вывода представляет собой конкретизацию рассмотренных ранее методов прямого и обратного вывода заключений в системах нечетких продукций. В данном случае алгоритм вывода оперирует правилами нечетких продукций, в которых условия и заключения записаны в форме нечетких лингвистических переменных.

Для получения заключений в системах нечеткого вывода предложены несколько алгоритмов, характерные особенности и примеры применения которых изложены далее. Описание этих алгоритмов базируется на разделении процесса вывода на ряд последовательных этапов, которые рассматриваются в следующем разделе. Тем самым оказывается возможным не только достичь определенной систематизации понятий нечеткой логики, но и получить некоторую общую схему, которая позволяет формировать и другие алгоритмы нечеткого вывода.

19.2 Основные этапы нечеткого вывода

Говоря о нечеткой логике, чаще всего имеют в виду системы нечеткого вывода, которые широко используются для управления техническими устройствами и процессами. Разработка и применение систем нечеткого вывода включают в себя ряд этапов, реализация которых выполняется с помощью рассмотренных ранее основных положений нечеткой логики.

Информацией, которая поступает на вход системы нечеткого вывода,

являются измеренные некоторым образом входные переменные. Эти переменные соответствуют реальным переменным процесса управления. Информация, которая формируется на выходе системы нечеткого вывода, соответствует выходным переменным, которыми являются управляющие переменные процесса управления.

Системы нечеткого вывода предназначены для преобразования значений входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких правил продукций. Для этого системы нечеткого вывода должны содержать базу правил нечетких продукций и реализовывать нечеткий вывод заключений на основе посылок или условий, представленных в форме нечетких лингвистических высказываний.

Таким образом, основными этапами нечеткого вывода являются (рисунок 3):

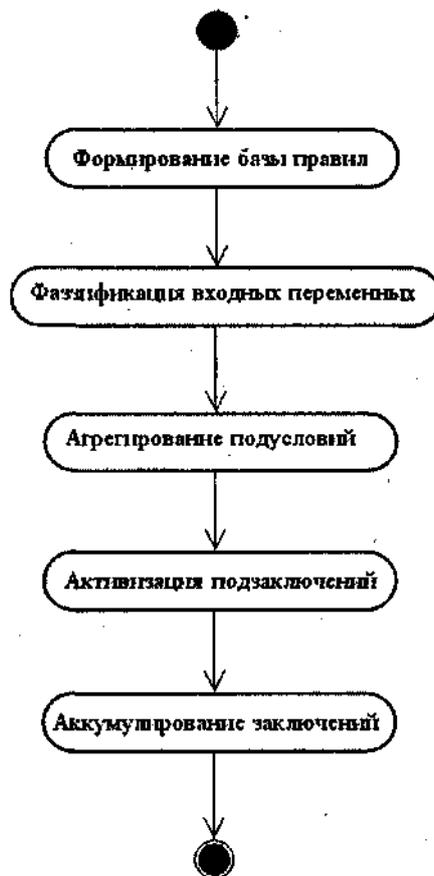


Рисунок 3 – Диаграмма деятельности процесса нечеткого вывода в форме диаграммы деятельности языка UML

- Формирование базы правил систем нечеткого вывода.
 - Фаззификация входных переменных.
 - Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций.
 - Активизация или композиция подзаклучений в нечетких правилах продукций.
 - Аккумуляирование заключений нечетких правил продукций.
- Основные особенности каждого из этих этапов и простые примеры их выполнения будут рассмотрены в следующей лекции.

19.3 Контрольные вопросы

1. Что такое процесс нечеткого вывода?
2. Какие задачи позволяют решать системы нечеткого вывода?
3. Что такое нечеткое лингвистическое высказывание?
4. Какая связка используется при записи нечетких высказываний в форме структурируемого текста на языке FCL?
5. Что такое система нечетких правил продукций?
6. Для чего предназначены системы нечеткого вывода?
7. Перечислите основные этапы нечеткого вывода.