Лекция 8 Системы нечеткого вывода Часть 2

8.3 Основные алгоритмы нечеткого вывода

Рассмотренные выше этапы нечеткого вывода могут быть реализованы неоднозначным образом, поскольку включают в себя отдельные параметры, которые должны быть фиксированы или специфицированы. Тем самым выбор конкретных вариантов параметров каждого из этапов определяет некоторый алгоритм, который в полном объеме реализует нечеткий вывод в системах правил нечетких продукций. К настоящему времени предложено несколько алгоритмов нечеткого вывода. Те из них, которые получили наибольшее применение в системах нечеткого вывода, рассматриваются ниже.

Алгоритм Мамдани (Mamdani)

Алгоритм Мамдани является одним из первых, который нашел применение в системах нечеткого вывода. Он был предложен в 1975 г. английским математиком Е. Мамдани (Ebrahim Mamdani) в качестве метода для управления паровым двигателем. По своей сути этот алгоритм порождает рассмотренные выше этапы, поскольку в наибольшей степени соответствует их параметрам.

Формально алгоритм Мамдани может быть определен следующим образом.

- Формирование базы правил систем нечеткого вывода. Особенности формирования базы правил совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Фаззификация входных переменных. Особенности фаззификации совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечетких продукций используются парные нечеткие логические операции. Те правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.
- Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций. Осуществляется по формуле (8.6), при этом для сокращения времени вывода учитываются только активные правила нечетких продукций.
- Аккумуляция заключений нечетких правил продукций. Осуществляется по формуле (4.4) для объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным.
- Дефаззификация выходных переменных. Традиционно используется метод центра тяжести в форме (8.9)—(8.10) или метод центра площади (8.11).

Алгоритм Цукамото (Tsukamoto)

Формально алгоритм Цукамото может быть определен следующим образом.

- Формирование базы правил систем нечеткого вывода. Особенности формирования базы правил совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Фаззификация входных переменных. Особенности фаззификации совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Для нахождения степени истинности условий всех правил нечетких продукций используются парные нечеткие логические операции. Те правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.
- Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций. Осуществляется

аналогично алгоритму Мамдани по формуле (8.6), после чего находятся обычные (не нечеткие) значения всех выходных лингвистических переменных в каждом из подзаключений активных правил нечетких продукций. В этом случае значение выходной лингвистической переменной w_j в каждом из подзаключений находится как решение уравнения:

$$c_i = \mu(w_i) \ (\forall i \in \{1, 2, ..., q\})$$
 (8.14)

где q — общее количество подзаключений в базе правил.

- Аккумуляция заключений нечетких правил продукций. Фактически отсутствует, поскольку расчеты осуществляются с обычными действительными числами w_i .
- Дефаззификация выходных переменных. Используется модифицированный вариант в форме метода центра тяжести для одноточечных множеств:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i * w_i}{\sum_{i=1}^{n} c_i},$$
(8.15)

где n — общее количество активных правил нечетких продукций, в подзаключениях которых присутствует выходная лингвистическая переменная w_i .

Алгоритм Ларсена (Larsen)

Формально алгоритм Ларсена может быть определен следующим образом.

- Формирование базы правил систем нечеткого вывода. Особенности формирования базы правил совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Фаззификация входных переменных. Особенности фаззификации также совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Используются парные нечеткие логические операции для нахождения степени истинности условий всех правил нечетких продукций (как правило, тах-дизъюнкция и тельконъюнкция). Те правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.
- Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций. Осуществляется использованием формулы (8.7), посредством чего находится совокупность нечетких множеств: C), C_1 ,..., C_q , где q общее количество подзаключений в базе правил.
- Аккумуляция заключений нечетких правил продукций. Осуществляется по формуле (4.4) для объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным.
- Дефаззификация выходных переменных. Может использоваться любой из рассмотренных выше методов дефаззификации.

Алгоритм Сугено (Sugeno)

Формально *алгоритм Сугено*, предложенный Сугено и Такаги, может быть определен следующим образом.

- Формирование базы правил систем нечеткого вывода. В базе правил используются только правила нечетких продукций в форме:
 - ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ " β_1 есть α " И " β_2 есть α "" ТО " $w=\varepsilon_1 \cdot a_1 + \varepsilon_2 \cdot a_2$ ". (8.16) Здесь ε_1 , ε_2 —некоторые весовые коэффициенты. При этом значение выходной переменной w в заключении определяется как некоторое действительное число.
- Фаззификация входных переменных. Особенности фаззификации совпадают с рассмотренными выше при описании данного этапа.
- Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций. Для нахождения степени истинности условий всех правил нечетких продукций, как правило, используется логическая операция min-коньюнкции. Те правила, степень истинности условий которых отлична от нуля, считаются активными и используются для дальнейших расчетов.

- Активизация подзаключений в нечетких правилах продукций. Во-первых, с использованием метода (8.6) находятся значения степеней истинности всех заключений правил нечетких продукций. Во-вторых, осуществляется расчет обычных (не нечетких) значений выходных переменных каждого правила. Это выполняется с использованием формулы для заключения (8.16), в которую вместо a_1 и a_2 подставляются значения входных переменных до этапа фаззификации. Тем самым определяются множество значений $C=\{c_1, c_2,..., c_n\}$ и множество значений выходных переменных $W=\{w_1, w_2,..., w_n\}$, где n— общее количество правил в базе правил.
- Аккумуляция заключений нечетких правил продукций. Фактически отсутствует, поскольку расчеты осуществляются с обычными действительными числами w_i .
- Дефаззификация выходных переменных. Используется модифицированный вариант в форме метода центра тяжести для одноточечных множеств (8.15).

8.4. Примеры использования систем нечеткого вывода в задачах управления

Одним из основных направлений практического использования систем нечеткого вывода является решение задач управления различными объектами или процессами. В этом случае построение нечеткой модели основывается на формальном представлении характеристик исследуемой системы в терминах лингвистических переменных. Поскольку кроме алгоритма управления, основными понятиями систем управления являются входные и выходные переменные, то именно они рассматриваются как лингвистические переменные при формировании базы правил в системах нечеткого вывода.

В общем случае цель управления заключается в том, чтобы на основе анализа текущего состояния объекта управления определить значения управляющих переменных, реализация которых позволяет обеспечить желаемое поведение или состояние объекта управления. В настоящее время для решения соответствующих задач используется общая теория управления, в рамках которой разработаны различные алгоритмы нахождения оптимальных законов управления объектами различной физической природы.

Рассмотрим лишь основные определения, необходимые для понимания особенностей и места систем нечеткого вывода при решении задач управления.

Базовая архитектура или модель классической теории управления основывается на представлении объекта и процесса управления в форме некоторых систем (рис. 8.13). При этом объект управления характеризуется некоторым конечным множеством входных параметров и конечным множеством выходных параметров. На вход системы управления поступают некоторые входные переменные, которые формируются с помощью конечного множества датчиков. На выходе системы управления с использованием некоторого алгоритма управления формируется множество значений выходных переменных, которые еще называют управляющими переменными или переменными процесса управления. Значения этих выходных переменных поступают на вход объекта управления и, комбинируясь со значениями входных параметров объекта управления, изменяют его поведение в желаемом направлении.

Рассмотренная архитектура называется *процессом управления с обратной связью*, а используемые для управления техническими объектами системы управления — *контроллерами*.

Наиболее типичным примером рассмотренной модели управления является так называемый *интегрально-дифференцирующий контроллер* или PID-контроллер (proportional-integral-derivative controller). Алгоритм его управления основан на сравнении выходных параметров объекта управления с некоторыми заданными параметрами и определении величины расхождения между ними или ошибки. После этого рассчитываются величины выходных переменных в форме аддитивной суммы величины этой ошибки, значения интеграла и производной по времени в течение некоторого промежутка времени.

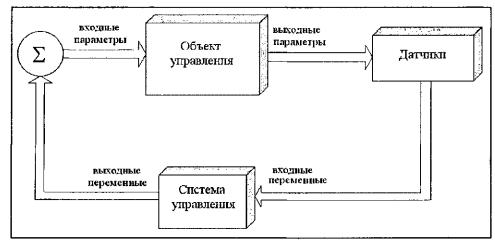


Рис. 8.13. Архитектура компонентов процесса управления с обратной связью

Один из недостатков PID-контроллеров заключается в предположении о линейном характере зависимости входных и выходных переменных процесса управления, что существенно снижает адекватность этой модели при решении отдельных практических задач. Другой недостаток модели связан со сложностью выполнения соответствующих расчетов, что может привести к недопустимым задержкам в реализации управляющих воздействий при оперативном управлении объектами с высокой динамикой изменения выходных параметров.

Архитектура или модель нечеткого управления основана на замене классической системы управления системой нечеткого управления, в качестве которой используются системы нечеткого вывода. В этом случае модель нечеткого управления (рис. 8.14) строится с учетом необходимости реализации всех этапов нечеткого вывода, а сам процесс вывода реализуется на основе одного из рассмотренных выше алгоритмов нечеткого вывода.

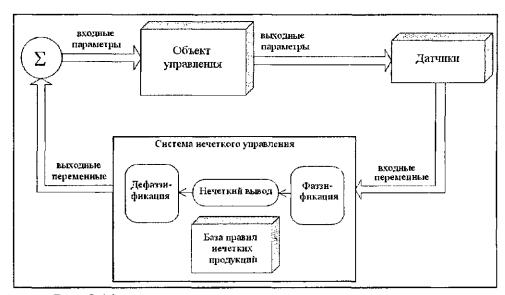


Рис. 8.14. Архитектура компонентов процесса нечеткого управления

Далее рассматриваются особенности построения некоторых моделей систем нечеткого управления с целью решения практических задач по управлению конкретными объектами.

Нечеткая модель управления смесителем воды при принятии душа

В качестве первого примера использования систем нечеткого вывода в задачах управления рассматривается задача управления смесителем воды при принятии душа. Эта задача является одной из наиболее простых, которая может быть решена методами нечеткого моде-

лирования. Для определенности предположим, что в качестве алгоритма нечеткого вывода будет использоваться алгоритм Мамдани.

Содержательная постановка задачи

При принятии душа на вход смесителя подается холодная и горячая вода по соответствующим магистральным трубопроводам. Наиболее комфортные условия для душа создаются при наличии на выходе смесителя теплой воды постоянной температуры. Поскольку во время принятия душа может наблюдаться неравномерный расход воды, температура воды на выходе смесителя будет колебаться, приводя к необходимости ручного изменения подачи холодной или горячей воды. Задача состоит в том, чтобы сделать регулировку температуры воды автоматической, обеспечивая постоянную температуру воды на выходе смесителя (рис. 8.15).

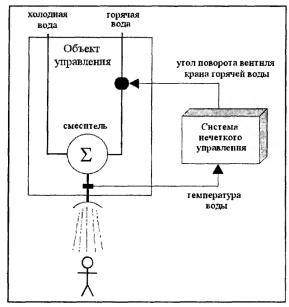


Рис 8.15. Иллюстрация модели нечеткого управления смесителем воды при принятии душа.

Опыт принятия душа позволяет сформулировать несколько эвристических правил, которые мы применяем в случае регулирования температуры воды на выходе смесителя:

- 1. Если вода горячая, то следует повернуть вентиль крана горячей воды на большой угол вправо.
- 2. Если вода не очень горячая, то следует повернуть вентиль крана горячей воды на небольшой угол вправо.
- 3. Если вода теплая, то оставить вентиль крана горячей воды без воздействия.
- 4. Если вода прохладная, то следует повернуть вентиль крана горячей воды на небольшой угол влево.
- 5. Если вода холодная, то следует повернуть вентиль крана горячей воды на большой угол влево.

Эта информация будет использоваться при построении базы правил системы нечеткого вывода, которая позволяет реализовать данную модель нечеткого управления.

Построение базы нечетких лингвистических правил

Для формирования базы правил систем нечеткого вывода необходимо предварительно определить входные и выходные лингвистические переменные. Очевидно, в качестве входной лингвистической переменной следует использовать температуру воды на выходе смесителя или формально: β_1 — "температура воды". В качестве выходной лингвистической переменной будем использовать угол поворота вентиля крана горячей воды или формально: β_2 — "угол поворота".

В этом случае система нечеткого вывода будет содержать 5 правил нечетких продукций следующего вида:

ПРАВИЛО_1: ЕСЛИ "вода горячая" ТО "повернуть вентиль крана горячей воды на большой угол вправо"

ПРАВИЛО_2: ЕСЛИ "вода не очень горячая" ТО "повернуть вентиль крана горячей воды на небольшой угол вправо"

ПРАВИЛО_3: ЕСЛИ "вода теплая" ТО "оставить угол поворота крана горячей воды без изменения"

ПРАВИЛО_4: ЕСЛИ "вода прохладная" ТО "повернуть вентиль крана горячей воды на небольшой угол влево"

ПРАВИЛО_5: ЕСЛИ "вода холодная" ТО "повернуть вентиль крана горячей воды на большой угол влево"

Фаззификация входных переменных

В качестве терм-множества первой лингвистической переменной будем использовать множество $T_I = \{"горячая", "не очень горячая", "теплая", "прохладная", "холодная") с функциями принадлежности, изображенными на рис. <math>8.16$, a.

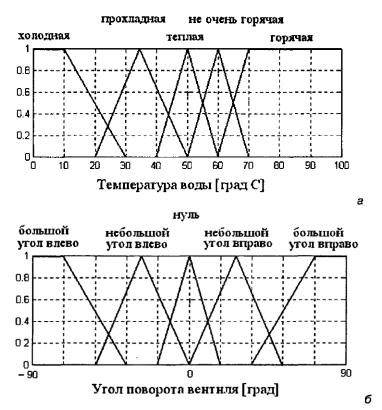


Рис. 8.16. Графики функций принадлежности для термов лингвистической переменной "*Температура воды*" (а) и лингвистической переменной "*Угол поворота вентиля крана*" (б)

В качестве терм-множества второй лингвистической переменной будем использовать множество $T_2 = \{$ "большой угол вправо", "небольшой угол вправо", "небольшой угол вправо", "небольшой угол влево" $\}$ с кусочно-линейными функциями принадлежности, изображенными на рис. 8.16, δ .

При этом температура воды измеряется в градусах Цельсия, а угол поворота — в угловых градусах. В последнем случае поворот вправо означает положительное направление отсчета, а поворот влево — отрицательное.

Используя в качестве алгоритма вывода алгоритм Мамдани, рассмотрим пример его выполнения для случая, когда текущая температура воды на выходе смесителя равна 55 °C. В

этом случае фаззификация входной лингвистической переменной приводит к значениям степеней истинности 0.5 для правил нечетких продукций с номерами 2 и 3. Эти правила считаются активными и используются в текущем процессе нечеткого вывода.

Поскольку все условия в правилах 1—5 заданы в форме нечетких лингвистических высказываний первого вида, этап их агрегирования тривиален и оставляет степени истинности 0.5 без изменения.

Следующим этапом нечеткого вывода является активизация заключений в нечетких правилах продукций. Поскольку все заключения правил 1—5 заданы в форме нечетких лингвистических высказываний первого вида, а весовые коэффициенты правил по умолчанию равны 1, то активизация правил 2 и 3 приводит к нечетким множествам, функции принадлежности которых изображены на рис. 8.17, *а*.

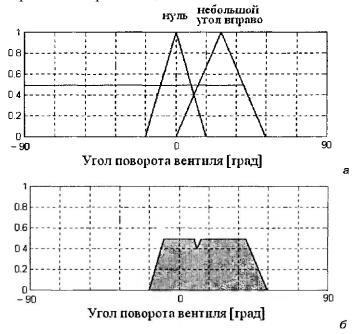


Рис. 8.18. Графики функции принадлежности для двух термов выходной лингвистической переменной "Угол поворота вентиля крана" (а) и функции принадлежности после аккумуляции (б)

Аккумулирование заключений нечетких правил продукций с использованием операции max-дизьюнкции для правил 2 и 3 приводит в результате к нечеткому множеству, функция принадлежности которого изображена на рис. 8.17, δ .

Дефаззификация выходной лингвистической переменной "Угол поворота вентиля крана" методом центра тяжести для значений функции принадлежности, изображенной на рис. 8.17, приводит к значению управляющей переменной, равному повороту вентиля крана вправо на 16° (приближенное значение). Это значение и является результатом решения задачи нечеткого вывода для текущего значения входной лингвистической переменной "Температура воды".

Для реализации этого алгоритма нечеткого управления необходимо организовать периодическое измерение температуры воды на выходе смесителя в некоторые дискретные моменты времени. При этом, чем меньше интервал измерения этой температуры, тем выше оказывается точность регулирования температуры воды.

Что касается реализации собственно процедуры нечеткого управления, то для этой цели необходимо использовать соответствующие программные или аппаратные средства, специально предназначенные для выполнения всех этапов нечеткого вывода. В частности, для этой цели могут быть применены специальные программируемые нечеткие контроллеры, которые обладают возможностью реализовывать программу нечеткого вывода, записанную, например, на языке нечеткого управления или языка FCL.

Литература:

Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде МАТLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ Петербург, 2005. — 736 с.: ил.