

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ФАКТОРОВ ОПАСНОСТИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Д.П. Сафонов;

М.И. Гвоздик, кандидат технических наук, профессор.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Рассмотрены основные понятия нечеткой логики. Приведен пример разработанного алгоритма оценки нечетких данных факторов опасности для принятия автономного решения об эвакуации робототехнического комплекса.

Ключевые слова: нечеткая логика, обработка информации, автономное функционирование

DEVELOPING AN ALGORITHM FOR ASSESSING HAZARDS ROBOTIC SYSTEM BASED ON FUZZY LOGIC

D.P. Safonov; M.I. Gvozdik. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

The article includes basic concepts of fuzzy logic and an example of the developed fuzzy algorithm estimates data hazards for making autonomous decision for evacuation of robotic system.

Keywords: fuzzy logic, information processing, autonomous functioning

Используемая человеком информация субъективна, ее представление содержит большое количество неопределенностей. В связи с этим одной из важнейших проблем науки на сегодняшний день является построение моделей приближенных рассуждений человека и использование их в компьютерных системах будущих поколений. Значительное продвижение в этом направлении сделано профессором Калифорнийского университета Беркли Лотфи Заде. В последнее время нечеткая технология завоевывает все больше сторонников среди разработчиков систем управления.

За прошедшее время нечеткая логика прошла путь от почти антинаучной теории, практически отвергнутой в Европе и США, до банальной ситуации конца девяностых годов, когда в Японии в широком ассортименте появились нечеткие бритвы, пылесосы, фотокамеры.

Нечеткое управление оказывается особенно полезным, когда технологические процессы являются слишком сложными для анализа с помощью общепринятых количественных методов или когда доступные источники информации интерпретируются качественно, неточно или неопределенно. Нечеткая логика, на которой основано нечеткое управление, ближе по духу к человеческому мышлению и естественным языкам, чем традиционные логические системы. Нечеткая логика, в основном, обеспечивает эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реального мира. Наличие математических средств отражения нечеткости исходной информации позволяет построить модель, адекватную реальности [1].

Теория нечетких множеств (fuzzy sets theory) ведет свое начало с 1965 г., когда профессор Лотфи Заде из университета Беркли опубликовал основополагающую работу «Fuzzy Sets» в журнале «Information and Control». Прилагательное «fuzzy», которое можно перевести на русский как нечеткий, размытый, ворсистый, пушистый, введено в название

новой теории с целью дистанцирования от традиционной четкой математики и аристотелевой логики, оперирующих с четкими понятиями: «принадлежит – не принадлежит», «истина – ложь». Концепция нечеткого множества зародилась у Лотфи Заде «как неудовлетворенность математическими методами классической теории систем, которая вынуждала добиваться искусственной точности, неуместной во многих системах реального мира, особенно в так называемых гуманистических системах, включающих людей».

Началом практического применения теории нечетких множеств можно считать 1975 г., когда Мамдани и Ассилиан построили первый нечеткий контроллер для управления простым паровым двигателем. В 1982 г. Холмблад и Остергад разработали первый промышленный нечеткий контроллер, который был внедрен в управление процессом обжига цемента на заводе в Дании. Успех первого промышленного контроллера, основанного на нечетких лингвистических правилах «Если – то» привел к всплеску интереса к теории нечетких множеств среди математиков и инженеров. Несколько позже Бартоломеем Коско была доказана теорема о нечеткой аппроксимации (Fuzzy Approximation Theorem), согласно которой любая математическая система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике. Другими словами, с помощью естественно-языковых высказываний-правил «Если – то», с последующей их формализацией средствами теории нечетких множеств, можно сколько угодно точно отразить произвольную взаимосвязь «вход-выход» без использования сложного аппарата дифференциального и интегрального исчисления, традиционно применяемого в управлении и идентификации.

Системы, основанные на нечетких множествах, разработаны и успешно внедрены в таких областях, как: управление технологическими процессами, управление транспортом [2], медицинская диагностика, техническая диагностика, финансовый менеджмент, биржевое прогнозирование, распознавание образов. Спектр приложений очень широкий – от видеокamer и бытовых стиральных машин до средств наведения ракет ПВО и управления боевыми вертолетами [3]. Практический опыт разработки систем нечеткого логического вывода свидетельствует, что сроки и стоимость их проектирования значительно меньше, чем при использовании традиционного математического аппарата [4].

Математический аппарат нечеткой логики

Характеристикой нечеткого множества выступает функция принадлежности (Membership Function). Обозначим через $MF_c(x)$ – степень принадлежности к нечеткому множеству C , представляющей собой обобщение понятия характеристической функции обычного множества. Тогда нечетким множеством C называется множество упорядоченных пар вида $C = \{MF_c(x)/x\}$, $MF_c(x) \in [0,1]$. Значение $MF_c(x)=0$ означает отсутствие принадлежности к множеству, 1 – полную принадлежность.

Проиллюстрируем это на простом примере. Формализуем неточное определение «горячий чай». В качестве x (область рассуждений) будет выступать шкала температуры в градусах Цельсия. Очевидно, что она будет изменяться от 0 до 100 °С. Нечеткое множество для понятия «горячий чай» может выглядеть следующим образом:

$$C = \{0/0; 0/10; 0/20; 0,15/30; 0,30/40; 0,60/50; 0,80/60; 0,90/70; 1/80; 1/90; 1/100\}.$$

Так, чай с температурой 60 °С принадлежит к множеству «Горячий» со степенью принадлежности 0,80. Для одного человека чай при температуре 60 °С может оказаться горячим, для другого – не слишком горячим. Именно в этом и проявляется нечеткость задания соответствующего множества [5].

Для нечетких множеств, как и для обычных, определены основные логические операции. Самыми основными, необходимыми для расчетов, являются пересечение и объединение.

Пересечение двух нечетких множеств (нечеткое «И»): $A \cap B$:

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

Объединение двух нечетких множеств (нечеткое «ИЛИ»): $A \cup B$:

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

В теории нечетких множеств разработан общий подход к выполнению операторов пересечения, объединения и дополнения, реализованный в так называемых треугольных нормах и конормах. Приведенные выше реализации операций пересечения и объединения – наиболее распространенные случаи t -нормы и t -конормы.

Для описания нечетких множеств вводятся понятия нечеткой и лингвистической переменных.

Нечеткая переменная описывается набором (N, X, A) , где N – это название переменной; X – универсальное множество (область рассуждений); A – нечеткое множество на X .

Значениями лингвистической переменной могут быть нечеткие переменные, то есть лингвистическая переменная находится на более высоком уровне, чем нечеткая переменная. Каждая лингвистическая переменная состоит из:

- названия;
- множества своих значений, которое также называется базовым терм-множеством T . Элементы базового терм-множества представляют собой названия нечетких переменных;
- универсального множества X ;
- синтаксического правила G , по которому генерируются новые термы с применением слов естественного или формального языка;
- семантического правила P , которое каждому значению лингвистической переменной ставит в соответствие нечеткое подмножество множества X .

Рассмотрим этапы обработки информации на примере оценки факторов опасности для робототехнического комплекса.

В зависимости от типа чрезвычайной ситуации, факторы опасности для робототехнического комплекса могут быть следующими:

- температура;
- разряд батарей;
- влажность;
- механические повреждения;
- химические повреждения;
- радиационные повреждения и др.

Рассмотрим два основных фактора опасности – температура и разряд батарей.

Предположим, что график принадлежности функции «температура» выглядит следующим образом (рис. 1):

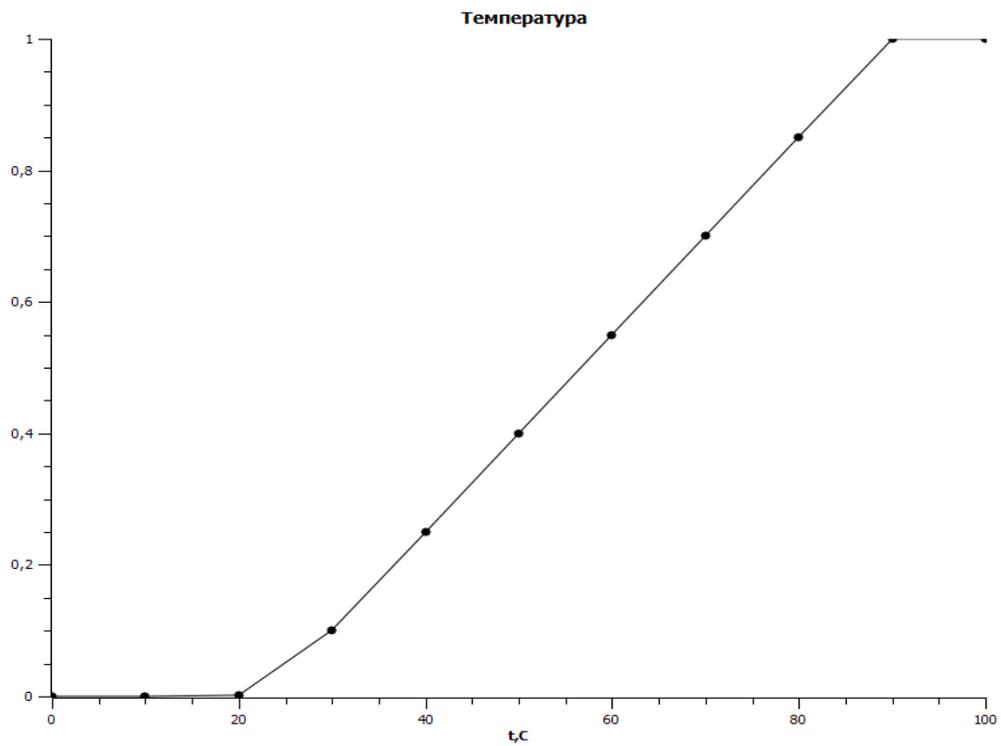


Рис. 1. График принадлежности функции «температура»

Пороговые значения заряда батарей практически универсальны для аккумуляторной техники. Предположим, что график принадлежности функции «заряд батарей» выглядит следующим образом (рис. 2):

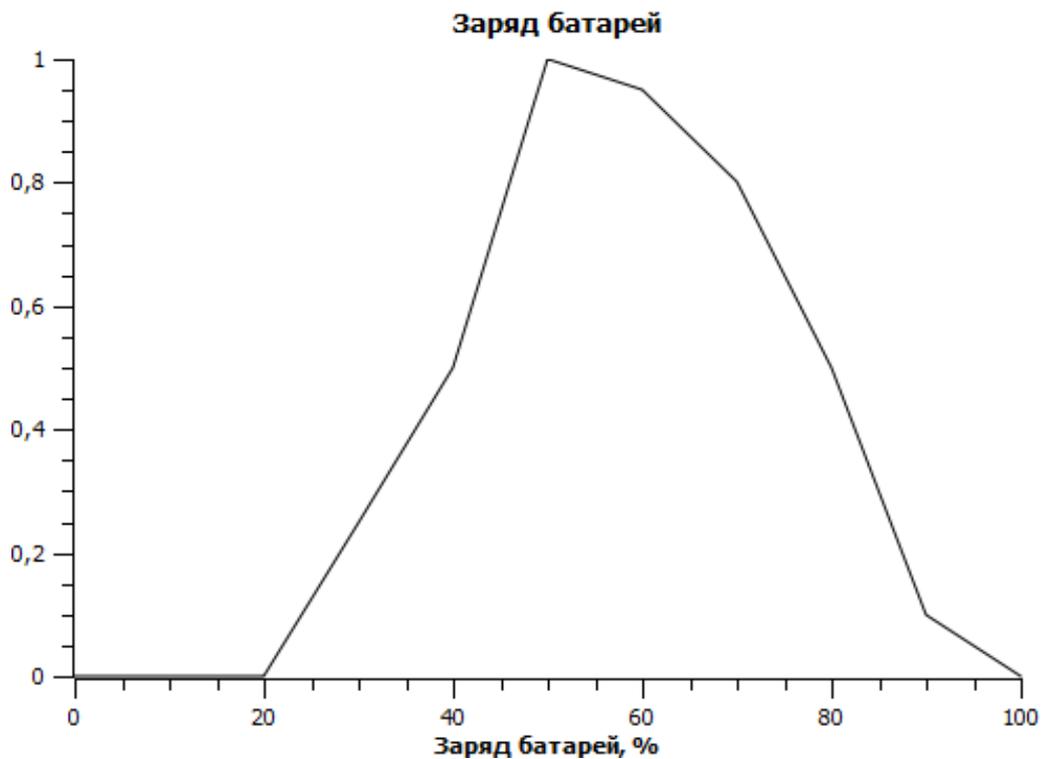


Рис. 2. График принадлежности функции «заряд батарей»

Формирование базы правил системы нечеткого вывода

База правил системы нечеткого вывода, соответствующая знаниям эксперта о том, когда робототехническому комплексу следует перейти к алгоритму возвращения, будет выглядеть следующим образом:

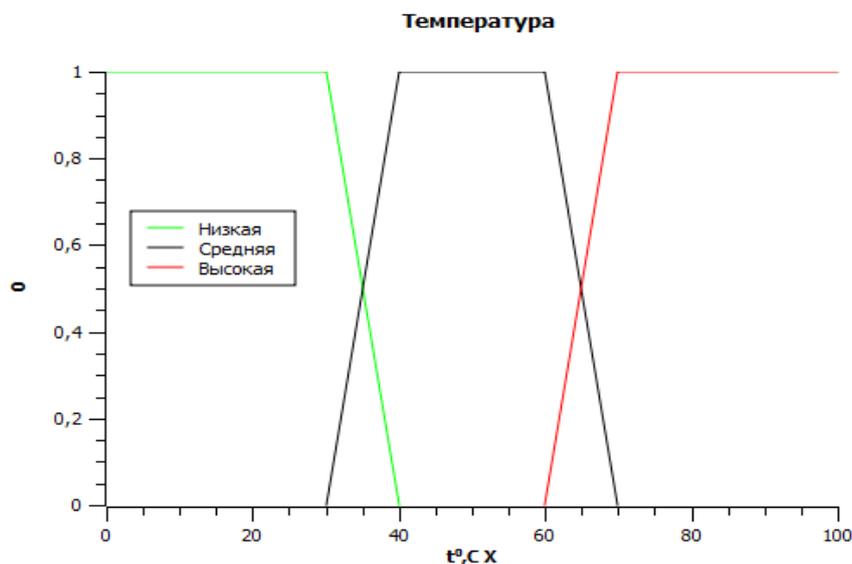
1. Если температура низкая и батареи полные, то опасность =0;
2. Если температура низкая и батареи средние, то опасность =0;
3. Если температура низкая и батареи пустые, то опасность =1;
4. Если температура средняя и батареи полные, то опасность =0;
5. Если температура средняя и батареи средние, то опасность =1;
6. Если температура средняя и батареи пустые, то опасность =1;
7. Если температура высокая и батареи полные, то опасность =1;
8. Если температура высокая и батареи средние, то опасность =1;
9. Если температура высокая и батареи пустые, то опасность =1.

Фаззификация

Фаззификация (введение нечеткости) – это установка соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма лингвистической переменной. На этапе фаззификации значениям всех входных переменных системы нечеткого вывода, полученным внешним по отношению к системе нечеткого вывода способом, например, при помощи датчиков, ставятся в соответствие конкретные значения функций принадлежности соответствующих лингвистических термов, которые используются в условиях (антецедентах) ядер нечетких продукционных правил, составляющих базу нечетких продукционных правил системы нечеткого вывода. Фаззификация считается выполненной, если найдены степени истинности $\mu_A(x)$ всех элементарных логических высказываний вида « β ЕСТЬ α », входящих в антецеденты нечетких продукционных правил, где α – некоторый терм с известной функцией принадлежности $\mu_A(x)$, а – четкое численное значение, принадлежащее универсуму лингвистической переменной β [6].

Рассмотрим процесс фаззификации шести нечетких высказываний (рис. 3):

- температура низкая;
- температура средняя;
- температура высокая;
- батареи полные;
- батареи средние;
- батареи пустые.



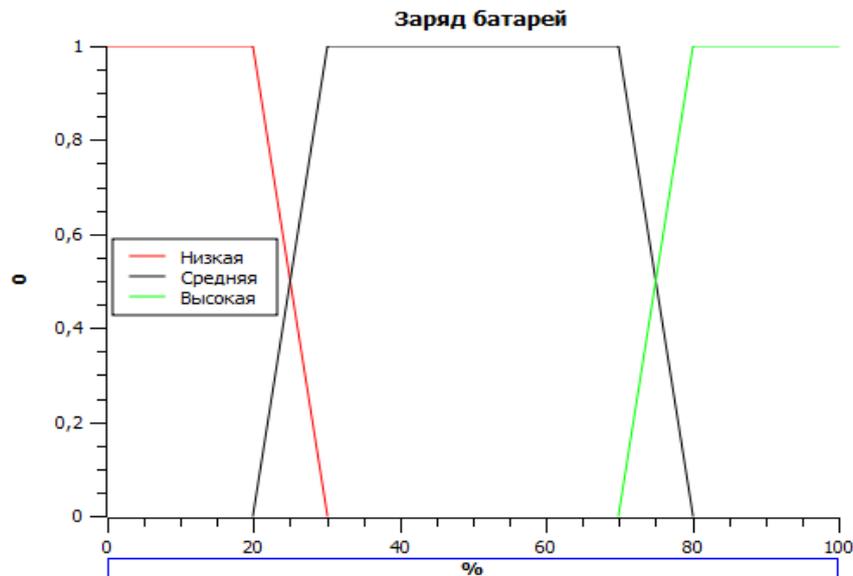


Рис. 3. Фаззификация нечетких выражений

Предположим, что $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $C=25\%$. Тогда фаззификация первого нечеткого высказывания дает в результате степень истинности, равную 0. Фаззификация второго нечеткого высказывания дает в результате степень истинности, равную 1. Фаззификация третьего нечеткого высказывания дает в результате степень истинности, равную 1 (рис. 4).

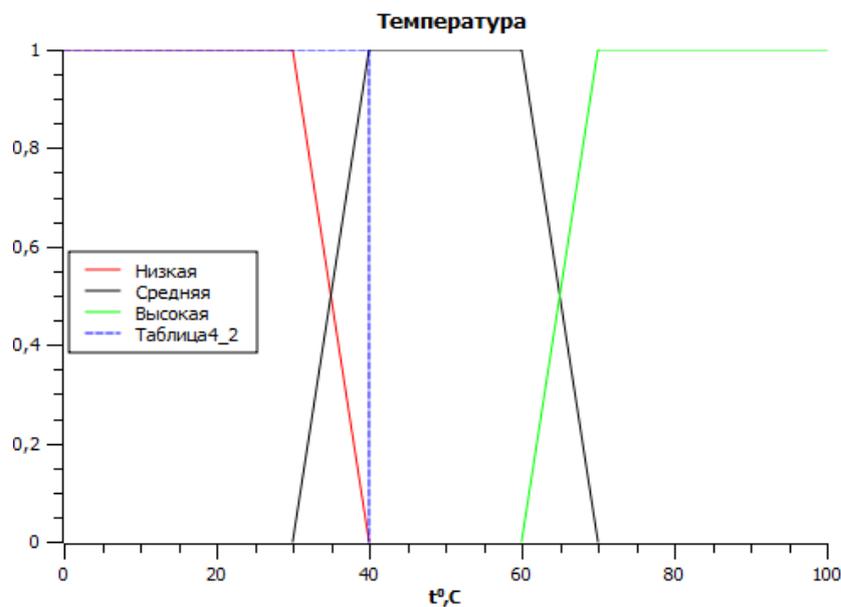


Рис. 4. Результаты фаззификации при $t=40$

Агрегатирование

Агрегирование – это процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. При этом используются полученные на этапе фаззификации значения функций принадлежности термов лингвистических переменных, составляющих вышеупомянутые условия (антецеденты) ядер нечетких продукционных правил.

Если условие нечеткого продукционного правила является простым нечетким высказыванием, то степень его истинности соответствует значению функции принадлежности соответствующего терма лингвистической переменной.

Если условие представляет составное высказывание, то степень истинности сложного высказывания определяется на основе известных значений истинности составляющих его

элементарных высказываний при помощи введенных ранее нечетких логических операций в одном из оговоренных заранее базисов.

Например, с учетом полученных в результате фаззификации значений истинности элементарных высказываний, степень истинности условий для каждого составного правила системы нечеткого вывода по определению необходимости возврата, в соответствии с определением по Заде нечеткого логического «И» двух элементарных высказываний А, В: $T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\}$, будет следующей.

Правило 1: антецедент «температура низкая» и «батареи полные», степень истинности антецедента $\min\{0;0\}=0$.

Правило 2: антецедент «температура низкая» и «батареи средние», степень истинности антецедента $\min\{0;0,5\}=0$.

Правило 3: антецедент «температура низкая» и «батареи пустые», степень истинности антецедента $\min\{0;0,5\}=0$.

Правило 4: антецедент «температура средняя» и «батареи полные», степень истинности антецедента $\min\{1,00;0\}=0$.

Правило 5: антецедент «температура средняя» и «батареи средние», степень истинности антецедента $\min\{1;0,5\}=0,5$.

Правило 6: антецедент «температура средняя» и «батареи пустые», степень истинности антецедента $\min\{1;0,5\}=0,5$.

Правило 7: антецедент «температура высокая» и «батареи полные», степень истинности антецедента $\min\{0;0\}=0$.

Правило 8: антецедент «температура высокая» и «батареи средние», степень истинности антецедента $\min\{0;0,5\}=0$.

Правило 9: антецедент «температура высокая» и «батареи пустые», степень истинности антецедента $\min\{0;0,5\}=0$.

Активизация

Активизация в системах нечеткого вывода – это процедура или процесс нахождения степени истинности каждого из элементарных логических высказываний (подзаклучений), составляющих консеквенты ядер всех нечетких продукционных правил. Поскольку заключения делаются относительно выходных лингвистических переменных, то степеням истинности элементарных подзаклучений при активизации ставятся в соответствие элементарные функции принадлежности.

Если заключение (консеквент) нечеткого продукционного правила является простым нечетким высказыванием, то степень его истинности равна алгебраическому произведению весового коэффициента и степени истинности антецедента данного нечеткого продукционного правила.

Если заключение представляет составное высказывание, то степень истинности каждого из элементарных высказываний равна алгебраическому произведению весового коэффициента и степени истинности антецедента данного нечеткого продукционного правила.

Если весовые коэффициенты продукционных правил не указаны явно на этапе формирования базы правил, то их значения по умолчанию равны единице.

Функции принадлежности $\mu(y)$ каждого из элементарных подзаклучений консеквентов всех продукционных правил находятся при помощи одного из методов нечеткой композиции:

- min-активизация – $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$;
- prod-активизация – $\mu(y) = c \mu(x)$;
- average-активизация – $\mu(y) = 0,5(c + \mu(x))$,

где $\mu(x)$ и c – соответственно функции принадлежности термов лингвистических переменных и степени истинности нечетких высказываний, образующих соответствующие следствия (консеквенты) ядер нечетких продукционных правил.

Аккумуляция

Аккумуляция (или аккумуляирование) в системах нечеткого вывода – это процесс нахождения функции принадлежности для каждой из $\mu B(x)$ (max-объединение), также выходных лингвистических переменных. Цель аккумуляции состоит в объединении всех степеней истинности подзаключений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных. Результат аккумуляции для каждой выходной лингвистической переменной определяется как объединение нечетких множеств всех подзаключений нечеткой базы правил относительно соответствующей лингвистической переменной. Объединение функций принадлежности всех подзаключений проводится как правило классически $\forall x \in X \mu A \cup B(x) = \max\{\mu A(x)\}$; могут использоваться операции:

- алгебраического объединения $\forall x \in X \mu A + B(x) = \mu A(x) + \mu B(x) - \mu A(x) \cdot \mu B(x)$;
- граничного объединения $\forall x \in X \mu A \cdot B(x) = \min\{\mu A(x), \mu B(x)\}$;
- драстического объединения $\forall x \in X \mu A \nabla B(x) = \begin{cases} \mu B(x), & \text{если } \mu A(x) = 0, \\ \mu A(x), & \text{если } \mu B(x) = 0, 1, \end{cases}$ в остальных случаях,
- а также λ -суммы $\forall x \in X \mu(A + B)(x) = \lambda \mu A(x) + (1 - \lambda) \mu B(x), \lambda \in [0; 1]$.

Дефаззификация

Дефаззификация в системах нечеткого вывода – это процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее четкому (числовому) значению. Цель дефаззификации состоит в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить количественные значения для каждой выходной переменной, которые используются внешними по отношению к системе нечеткого вывода устройствами (исполнительными механизмами интеллектуальной системы автоматического управления).

Переход от полученной в результате аккумуляции функции принадлежности $\mu(x)$ выходной лингвистической переменной к численному значению y выходной переменной производится одним из следующих методов:

- метод центра тяжести (Centre of Gravity) заключается в расчете центра тяжести площади $y = \frac{\int x \min_{x \max} x \max \mu(x) dx}{\int x \min_{x \max} x \max \mu(x) dx}$, где $[x \max; x \min]$ – носитель нечеткого множества выходной лингвистической переменной;
- метод центра площади (Centre of Area) заключается в расчете абсциссы y , делящей площадь, ограниченную кривой функции принадлежности $\mu(x)$, так называемой биссектрисы площади $\int x \min_{y \max} y \max \mu(x) dx = \int y \max_{x \max} x \max \mu(x) dx$;
- метод левого модального значения $y = x \min$;
- метод правого модального значения $y = x \max$.

Алгоритм нечеткого вывода Мамдани

Рассмотренные этапы нечеткого вывода могут быть реализованы неоднозначным образом: агрегирование может проводиться не только в базисе нечеткой логики Заде, активизация может проводиться различными методами нечеткой композиции, на этапе аккумуляции объединение можно провести отличным от max-объединения способом, дефаззификация также может проводиться различными методами. Таким образом, выбор конкретных способов реализации отдельных этапов нечеткого вывода определяет тот или иной алгоритм нечеткого вывода. В настоящее время остается открытым вопрос критериев и методов выбора алгоритма нечеткого вывода в зависимости от конкретной технической

задачи. На текущий момент в системах нечеткого вывода наиболее часто применяется Алгоритм Мамдани (Mamdani). Он нашел применение в первых нечетких системах автоматического управления. Был предложен в 1975 г. английским математиком Е. Мамдани для управления паровым двигателем.

Формирование базы правил системы нечеткого вывода осуществляется в виде упорядоченного согласованного списка нечетких продукционных правил в виде «IF A THEN B», где антецеденты ядер правил нечеткой продукции построены при помощи логических связок «И», а консеквенты ядер правил нечеткой продукции простые.

Фаззификация входных переменных осуществляется описанным выше способом, так же, как и в общем случае построения системы нечеткого вывода.

Агрегирование подусловий правил нечеткой продукции осуществляется при помощи классической нечеткой логической операции «И» двух элементарных высказываний A, B : $T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\}$.

Активизация подзаклучений правил нечеткой продукции осуществляется методом min-активизации $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$, где $\mu(x)$ и c – соответственно функции принадлежности термов лингвистических переменных и степени истинности нечетких высказываний, образующих соответствующие следствия (консеквенты) ядер нечетких продукционных правил.

Аккумуляция подзаклучений правил нечеткой продукции проводится при помощи классического для нечеткой логики max-объединения функций принадлежности $\forall x \in X \mu A \vee B x = \max\{\mu A x; \mu B x\}$.

Дефаззификация проводится методом центра тяжести или центра площади.

Литература

1. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2000. 352 с.

2. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов // СПб.: Наука, 2001.

3. Демидова Л.А., Кираковский В.В., Пылькин А.Н. Алгоритмы и системы нечеткого вывода при решении задач диагностики городских инженерных коммуникаций в среде MATLAB. М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2005. 365 с.

4. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калиничко С.В. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука, 2001.

5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

6. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 144 с.