

УДК 004.896

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АРХИТЕКТУРА БАЗЫ ЗНАНИЙ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ**И. А. Тарасова**

Донецкий национальный технический университет

ул. Б. Хмельницкого, 84, г. Донецк, 83050, Украина. E-mail: irina_tarasova@i.ua

Приведено исследование существующих методов нечеткого управления, осуществлена формализация модели нечеткого управления на основе использования термов лингвистических переменных с функциями принадлежности нескольких аргументов, которая позволяет сохранить нелинейные взаимосвязи между переменными объекта. Разработаны принципы построения и архитектура базы знаний системы нечеткого управления на основе предложенных подходов к моделированию, а также осуществлен синтез процедур нечеткого вывода при формировании системой управляющих воздействий. Применение полученных результатов позволяет сократить число правил базы знаний и повысить эффективность нечеткого управления плохо формализуемыми объектами со сложной структурой взаимосвязей входных и выходных переменных.

Ключевые слова: функция принадлежности нескольких аргументов, нечеткое управление, принципы построения баз знаний, архитектура баз знаний, нечеткие продукции.

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА АРХІТЕКТУРА БАЗИ ЗНАНЬ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ БАГАТОВИМІРНИХ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ**І. О. Тарасова**

Донецький національний технічний університет

вул. Б. Хмельницького, 84, м. Донецьк, 83050, Україна. E-mail: irina_tarasova@i.ua

Наведено дослідження існуючих методів нечіткого управління, здійснена формалізація моделі нечіткого управління на основі використання термів лінгвістичних змінних з функціями належності декількох аргументів, яка дозволяє зберегти нелінійні взаємозв'язки між змінними об'єкту. Розроблено принципи побудови та архітектура бази знань системи нечіткого управління на основі запропонованих підходів до моделювання, а також здійснено синтез процедур нечіткого виводу при формуванні системою керуючих впливів. Застосування отриманих результатів дозволяє скоротити число правил бази знань і підвищити ефективність нечіткого управління об'єктами, що погано формалізуються, зі складною структурою взаємозв'язків вхідних і вихідних змінних.

Ключові слова: функція належності декількох аргументів, нечітке управління, принципи побудови баз знань, архітектура баз знань, нечіткі продукції.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одним из наиболее популярных и быстро развивающихся направлений в области современных методов управления плохо формализуемыми объектами является нечеткое моделирование и управление. Вопросам проблематики методологии нечеткого моделирования и технологии решения практических задач управления посвящены работы Л. Заде, Э. Мамдани, А.В. Леоненкова, С.Д. Штовбы, А.П. Ротштейна [1–5]. Существующие методы нечеткого управления в основном используют в качестве термов нечеткие переменные с функциями принадлежности одного аргумента. К ним относятся методы Мамдани, Цукамото, Ларсена, Сугено и т.п. [3, 4]. С одной стороны, это позволяет использовать простое и наглядное представление функций принадлежности (например, треугольные или трапециевидные), а также применять не сложные вычислительные процедуры при проведении всех этапов нечеткого вывода. С другой стороны, теряется зависимость между управляющими переменными, обусловленная наличием ряда ограничений на управление. Кроме того, лингвистические переменные могут иметь достаточно сложную физическую природу, требующую при определении их значений использовать несколько связанных величин [6].

Способы построения функций принадлежности существенно зависят от экспертного мнения. Мето-

ды задания и определения вида многомерных функций принадлежности в настоящее время достаточно слабо развиты. Рассмотренные в работах [4, 5, 7, 8] представления многомерных функций принадлежности позволяют построить функции принадлежности заранее известного вида и не обеспечивают задания областей произвольной формы, в которых определены лингвистические термы переменных. Недостатком метода, изложенного в работе [9] можно считать то, что использование нейронных сетей привело к отсутствию возможности выделить как саму функцию принадлежности, так и базу правил, а также функции, описывающие заключения каждого конкретного правила.

Применение для моделирования объектов со сложной структурой входных и выходных переменных иерархических систем нечеткого вывода приводит к тому, что при переходе между уровнями иерархии возникает определенная степень размытости, что может привести к потере значимости результата. Одним из путей решения данной проблемы является использование термов лингвистических переменных с функциями принадлежности нескольких аргументов [10]. Однако представление базы знаний системы, содержащей правила нечеткого вывода с такими термами, в настоящее время отсутствует, что говорит об актуальности исследований в данной области.

Разработка принципов построения и архитектуры базы знаний нечеткого управления на основе функций принадлежности нескольких аргументов является предметом данного исследования.

Целью данной работы является повышение эффективности управления плохо формализованными объектами за счет разработки принципов построения и архитектуры базы знаний систем нечеткого управления на основе функций принадлежности нескольких аргументов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В данной работе решаются следующие задачи:

- формализация модели нечеткого управления на основе термов с функциями принадлежности нескольких аргументов;

- проектирование базы знаний и разработка обобщенной структуры системы нечеткого управления с использованием функций принадлежности нескольких аргументов;

- синтез процедур нечеткого вывода при формировании управляющих воздействий системы нечеткого управления с использованием функций принадлежности нескольких аргументов.

Основные этапы разработки модели нечеткого управления на основе термов с многомерными функциями принадлежности представлены на рис. 1.



Рисунок 1 – Основные этапы разработки модели нечеткого управления на основе многомерных функций принадлежности

В рамках постановки задачи определяются входные и выходные переменные объекта управления, из входных переменных выбираются управляющие переменные. Выделенные величины представляются в виде лингвистических переменных:

$V = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$ – множество входных лингвистических переменных; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_s\}$ – множество выходных лингвистических переменных.

Для каждой из лингвистических переменных формируются терм-множества в виде нечетких переменных. Источниками знаний для этого этапа могут быть эксперты, инженеры, технологи, область профессиональной деятельности которых имеет дело со сложными объектами, с недостаточно изученными свойствами, внутренней структурой и зависимостями между величинами. Эксперименты, формирующие терм-множества, описываются, как правило, оценками по критериям, которые могут иметь различный характер. Для решения этой задачи, являющейся задачей кластеризации, используется методология вербального анализа решений [11].

Методы вербального анализа решений основаны на том принципе, что проблема отнесения экспериментов к конкретным термам лингвистических переменных описывается на языке вербальных оценок на порядковых шкалах критериев. Эксперт определяет перечень критериев, по которым следует оценивать эксперимент и набор термов, упорядоченных по его предпочтению.

Нахождение точного и однозначного описания различных уровней качества по каждой из отдельных характеристик объекта у эксперта вызывает трудности, что обусловлено подсознательным характером процедуральных знаний, которые он использует в своей профессиональной деятельности. Это определяет необходимость применения многомерных функций принадлежности, что позволит избежать ограничений человеческой системы переработки информации. С целью снижения влияния субъективности эксперта, для определения вида функций принадлежности термов могут использоваться методы нечеткого кластерного анализа.

Концептуальная взаимосвязь между кластерным анализом и теорией нечетких множеств основана на том, что при решении задач структуризации сложных систем большинство формируемых классов объектов размыты по своей природе. Эта размытость состоит в том, что переход от принадлежности к непринадлежности элементов к данным классам постепенен. Требование нахождения однозначной кластеризации элементов исследуемой проблемной области является достаточно грубым и жестким, особенно при решении плохо или слабо структурированных задач. Методы нечеткой кластеризации ослабляют это требование за счет введения в рассмотрение нечетких кластеров и соответствующих им функций принадлежности, что позволяет применять их при задании функций принадлежности термов лингвистических переменных.

Различные аспекты нечеткой кластеризации исследовались в работах [12, 13]. Одним из наиболее распространенных методов нечеткой кластеризации является метод нечетких c -средних. Этот метод в силу высокой степени обобщенности стал основой для ряда модификаций, отличающихся формой выделенных кластеров. Однако следует учитывать, что модификации метода стремятся создавать кластеры определенных форм, даже если в исследуемом наборе данных таких кластеров на самом деле нет. Учитывая высокую распространенность и общность метода нечетких c -средних при необходимой простоте численной реализации, предложено его использовать в задаче формирования многомерных функций принадлежности термов лингвистических переменных [13].

Используя выделенные лингвистические переменные и их термы, эксперт формирует базу знаний для организации нечеткого вывода, позволяющего находить искомые значения управляющих переменных.

В современной теории искусственного интеллекта используются несколько основных групп моделей

баз знаний: логика, фреймы, семантические сети, нейронные сети и др. [14]. Логическая модель по своей практической результативности и степени внедрения в реальные технические устройства сегодня занимает центральное место.

Одним из наиболее эффективных и распространенных машинно-ориентированных языков для описания логических задач являются правила продукций.

Продукции по сравнению с другими формами представления знаний имеют следующие преимущества:

- модульность;
- наглядность;
- единообразие структуры (основные компоненты продукционной системы могут применяться для построения интеллектуальных систем с различной проблемной ориентацией);
- естественность (вывод заключения в продукционной системе во многом аналогичен процессу рассуждений эксперта);
- легкость внесения дополнений и простота механизма логического вывода.

В обобщенном виде множество правил нечетких продукций P , сформированных экспертом, представляется следующим образом:

$$\text{Правило } R_r: \text{Если } \bigcap_{i=1}^{N_r} \text{ПУ}_{ir}^{lk} \text{ ТО } \bigcap_{j=1}^{M_r} \text{ПЗ}_{jr}^{zb},$$

где N_r – количество подусловий, входящих в правило r ; M_r – количество подзаключений, входящих в правило r .

Подусловия имеют следующий вид:

$$\text{ПУ}_{ir}^{lk} : \beta_1 \text{ есть } \beta_{1k},$$

где β_{1k} – k -тый терм входной лингвистической переменной β_1 .

Подзаключения представляются следующим образом:

$$\text{ПЗ}_{jr} : w_z \text{ есть } w_{zb},$$

где w_{zb} – b -тый терм выходной лингвистической переменной w_z .

Для хранения выделенных знаний и реализации нечеткого управления необходимо разработать структуру и алгоритмы функционирования системы управления.

На рис. 2 представлена обобщенная структура системы нечеткого управления на основе термов с функциями принадлежности нескольких аргументов.

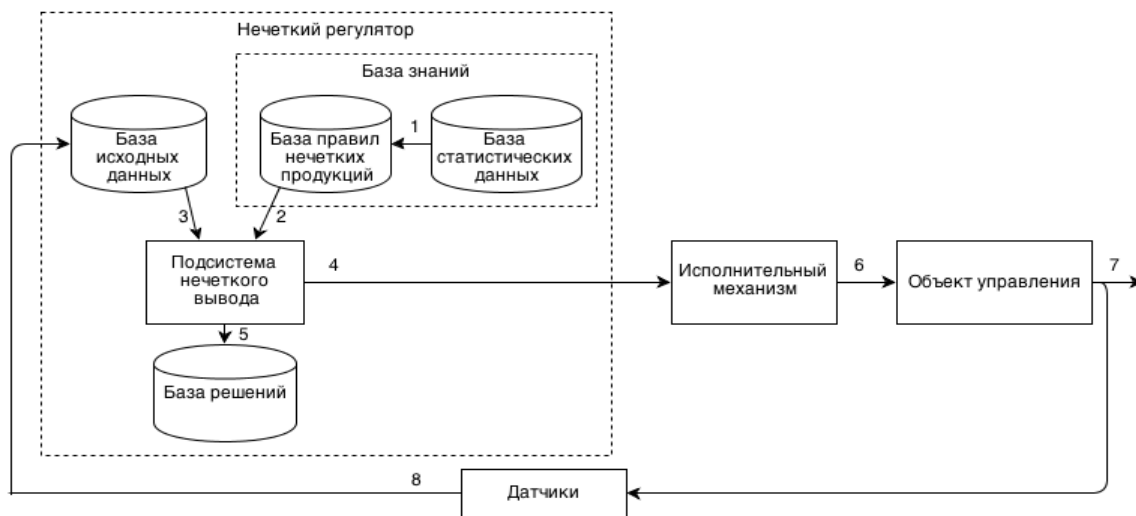


Рисунок 2 – Обобщенная структура системы нечеткого управления

На рис. 2 введены следующие обозначения:

- 1 – множество входных лингвистических переменных V и множество выходных лингвистических переменных W ;
- 2 – множество правил нечетких продукций P ;
- 3 – характеристики текущего состояния объекта;
- 4 – значения управляющих переменных;
- 5 – характеристики текущего состояния объекта и принятое решение по управлению;
- 6 – управляющее воздействие;
- 7 – реакция объекта управления;
- 8 – измеренные характеристики объекта управления.

Как следует из рис. 2, база знаний включает в себя базу нечетких продукций и базу данных, созданную на основе нечеткой кластеризации статистических данных о поведении объекта моделирования. Исходные данные, содержащие информацию с датчиков о текущем состоянии объекта управления, занесены в базу данных. Подсистема нечеткого вывода на основе полученных исходных данных, используя базу знаний, принимает решения по управлению объектом. Решение передается на исполнительный механизм, после чего записывается в базу данных принятых решений.

База статистических данных организована в виде таблицы со следующими атрибутами:

- номер експеримента;
- множество характеристик объекта моделирования;
- множество степеней принадлежности термам лингвистической переменной;

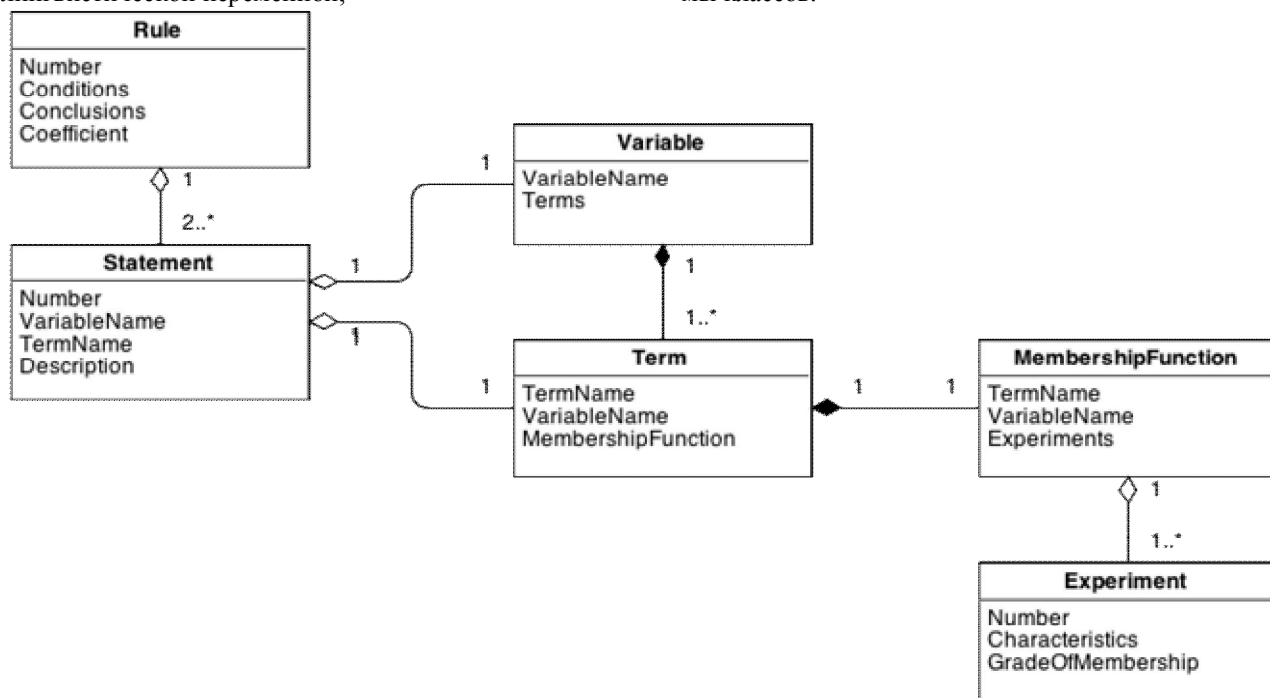


Рисунок 3 – Диаграмма классов базы знаний

Как видно на рис. 3, основными сущностями базы знаний являются классы Rule, Statement, Variable, Term, MembershipFunction, Experiment.

Правила (Rule), соответствующие правилу продукции, задаются с помощью атрибутов, содержащих номер правила (Number), множество подусловий (Conditions) и подзаключений (Conclusions), а также весовой коэффициент (Coefficient). Подусловия и подзаключения состоят из множества высказываний (Statement), связанных между собой при помощи логической операции «И», и связанных с ними объектов других классов.

Нечеткое высказывание описывается набором атрибутов, среди которых: Number – номер высказывания, Description – признак принадлежности высказывания к подусловию или подзаключению, VariableName – название лингвистической переменной, TermName – название термина.

Класс «Variable», соответствующий лингвистической переменной, содержит: название переменной (VariableName), терм-множество (Terms). Терм лингвистической переменной (Term) включает в себя название термина (TermName), название лингвистической переменной (VariableName), к которой терм относится, функцию принадлежности (MembershipFunction), которая в свою очередь определена атрибутами: название термина (TermName), название лингвистической переменной (VariableName), и множество экспериментов (Experiments). Эксперимент (Experiment) характеризуется номером (Number), списком характеристик (Characteristics) и степенью при-

– имя лингвистической переменной, которой сопоставлены характеристики.

Более подробно структура базы правил нечетких продукций представлена на рис. 3 в виде диаграммы классов.

надлежности терму лингвистической переменной (GradeOf-Membership).

Для формирования управляющих воздействий системы нечеткого управления с использованием многомерных функций принадлежности необходимо разработать этапы нечеткого вывода.

Формирование управляющих воздействий выполняется в соответствии с этапами, представленными на рис. 4.



Рисунок 4 – Этапы нечеткого вывода

Процедура фаззификации заключается в установлении соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением S_{ir} степени истинности подусловия $ПУ_{ir}^k$ на основе значения функции принадлежности соответствующего ей термина входной лингвистической переменной, которая, в случае

многомерных функций, рассчитывается по формуле многомерной табличной аппроксимации:

$$S_{ir} = \mu_{lk}(\bar{x}_1), \quad (1)$$

где \bar{x}_1 – вектор значений входных переменных системы нечеткого вывода; $\mu_{lk}(\bar{x}_1)$ – функция принадлежности k -го терма, входящего в подусловие PU_{ir}^{lk} .

Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий S_r по каждому из правил системы нечеткого вывода на основе известных значений истинности подусловий. Если условие правила задано в форме нечетких лингвистических высказываний вида « β_1 есть β_{lk} », этап их агрегирования оставляет степени истинности без изменения. Если же условие состоит из нескольких подусловий, причем лингвистические переменные в подусловиях попарно не равны друг другу, то определяется степень истинности сложного высказывания. При этом для определения результата используется формула:

$$S_r = \min_i S_{ir}. \quad (2)$$

На этапе активизации для каждой из выходных лингвистических переменных, входящих в отдельные подзаключения правил нечетких продукций, определяются функции принадлежности нечетких множеств их значений.

Расчет значения функции принадлежности каждого из подзаключений для рассматриваемых выходных лингвистических переменных осуществляется по формуле:

$$\mu_r^{zb}(\bar{y}_z) = \min_j \{Z_{jr}^{zb}, \mu_{zb}(\bar{y}_z)\}, \quad (3)$$

где $\mu_{zb}(\bar{y}_z)$ – функция принадлежности b -го терма выходной переменной системы нечеткого вывода \bar{y}_z ;

Z_{jr} – степень истинности каждого из подзаключений, рассчитываемая по формуле:

$$Z_{jr} = S_r \cdot K_r, \quad (4)$$

где K_r – весовой коэффициент правила.

Этап аккумуляции заключается в том, чтобы объединить или аккумулятировать с использованием операции max-дизъюнкции все степени истинности заключений для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных:

$$\mu_r^*(\bar{y}_z) = \bigcup_{r=1}^p \bigcup_{b=1}^{q_z} \mu_r^{zb}(\bar{y}_z). \quad (5)$$

Дефазификация заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специ-

альными устройствами, внешними по отношению к системе нечеткого вывода. Для многомерного случая используется обобщение метода центра тяжести:

$$y_{zn}^* = \frac{1}{V_z} \iint \dots \int y_{zn} \cdot \mu_z^*(\bar{y}_z) dv, \quad (6)$$

где y_{zn}^* – результат дефазификации; V_z – объем фигуры, образованной функцией принадлежности $\mu_z^*(\bar{y}_z)$.

ВЫВОДЫ. В данной работе рассмотрена задача повышения эффективности нечеткого управления плохо формализованными объектами с нелинейными ограничениями на управляющие переменные.

Предложены подходы к формализации модели нечеткого управления на основе термов с функциями принадлежности нескольких аргументов, что позволяет сохранить нелинейные взаимосвязи между переменными объекта, а также снизить влияние субъективности эксперта. Для технической реализации нечеткого управления на основе модели объекта, разработанной с использованием функций принадлежности термов нескольких аргументов, выполнено проектирование обобщенной структуры системы управления и ее базы знаний, хранящей знания экспертов в виде нечетких продукций. С целью организации формирования значений управляющих переменных на основе правил предложенной базы знаний системы проведен синтез процедур нечеткого вывода.

Применение результатов работы позволяет сократить и упростить правила базы знаний системы нечеткого управления, сохранив при этом информацию о взаимосвязи переменных объекта, что дает возможность более эффективно решать задачи управления плохо формализуемыми объектами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – PP. 338–353.
2. An experiment in linguistic yn thesis with a fuzzy logic controller. / Mamdani E. H., Assilian S. // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7. – № 1. – PP. 1–13.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
5. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с.
6. Тарасова И.А. Нечеткое управление на основе переменных с многомерными функциями принадлежности в диагностике и лечении гипертензивных осложнений беременности // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2012. – № 4. – С. 169–173.
7. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: монография. / Алтуни А.Е., Се-

мухин М.В. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.

8. Нечеткие модели и сети. / Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.

9. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы; пер. с польск. И.Д. Рудинского / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

10. Метод нечеткого управления на основе переменных с многомерными функциями принадлежности / А.Н. Шушюра, И.А. Тарасова // Искусственный интеллект. – 2010. – № 1. – С. 122–128.

11. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Наука, 1996. – 208 с.

12. Вятчинин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации: монография. – Минск: Технопринт, 2004. – 219 с.

13. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.

14. Осуга С. Обработка знаний. – М.: Мир, 1989. – 293 с.

DESIGN PRINCIPLES AND ARCHITECTURE OF KNOWLEDGE BASE OF THE FUZZY CONTROL SYSTEM BASED ON MULTIDIMENSIONAL MEMBERSHIP FUNCTIONS

I. Tarasova

Donetsk National Technical University

vul. Khmel'nitskogo, 84, Donetsk, 83050, Ukraine. E-mail: irina_tarasova@i.ua

The article is devoted to the research of currently existing methods of fuzzy control. The author has carried out the formalization of a fuzzy control model that uses the linguistic variables with membership functions of several arguments. This model allows keeping the nonlinear relations between the variables of the object. The author has developed the design principles and architecture of the knowledge base of a fuzzy control system on the basis of the proposed modeling approaches and has performed the synthesis of fuzzy logic output procedures for the control signals formed by the system. The use of the results obtained allows reducing the number of rules of the knowledge base and enhancing the efficiency of fuzzy control of badly formalized objects that have the complex structure of intercommunications of input and output variables.

Key words: membership function of several arguments, fuzzy control, design principles of knowledge base, architecture of knowledge base, fuzzy rules.

REFERENCES

1. Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol. 8, pp. 338–353.

2. Mamdani, E.H., Assilian, S. (1975), "An experiment in linguistic yn thesis with a fuzzy logic controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13.

3. Leonenkov A.V. (2005), *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH], BKHV-Peterburg, St-Petersburg, Russia.

4. Shtovba, S.D. (2007), *Proektirovanie nechetkikh system sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems by means of MATLAB], Goryachaya liniya – Telekom, Moscow, Russia.

5. Rotshteyn, A.P. (1999), *Intellektualnye tekhnologii identifikatsii: nechetkaya logika, geneticheskie algoritmy, neironnye seti* [Intellectual identification technology: fuzzy logic, genetic algorithms, neural networks], UNHVERSUM–Vinnytsia, Vinnytsia, Ukraine.

6. Tarasova, I.A. (2012), "Fuzzy control based on variables with multidimensional membership functions in the diagnosis and treatment of hypertensive complications of pregnancy", *Radioelectronic and computer systems*, no.4, pp. 169–173, Kharkiv, Ukraine.

7. Altunin, A.E., Semukhin, M.V. (2000), *Modeli i algoritmy priniatiya reshenii v nechetkikh usloviyakh* [Models and algorithms for decision making in fuzzy conditions]: Monograph, Tyumen State University, Tyumen, Russia.

8. Borysov, V.V., Kruhlov, V.V., Fedulov A.S. (2007), *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy models and sets], Goryachaya liniya – Telekom, Moscow, Russia.

9. Rutkovskaya, D., Pilinskiy, M., Rutkovskiy, L. (2006), *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkiy sistemi* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]: Trans. from Polish by I.D Rudinskiy, Goryachaya liniya – Telekom, Moscow, Russia.

10. Shushura, A.N., Tarasova, I.A. (2010), "Method of unclear control on the basis of variables with the multidimensional membership functions", *Artificial intelligence*, no.1, pp. 122–128, Donetsk, Ukraine.

11. Larichev, O.I., Moshkovich, E.M. (1996), *Kachestvennye metody priniatiya reshenii. Verbalnyi analis reshenii* [Qualitative methods of decision making. Verbal decision analysis], Nauka, Moscow, Russia.

12. Vyatchenin, D.A. (2004), *Nechetkie metody avtomaticheskoi klassifikatsii* [Fuzzy methods of automatic classification]: Monograph, Tehnoprint, Minsk, Belarus.

13. Barsegyan, A.A., Kupriyanov, M.S., Stepanenko, V.V., Kholod, I.I. (2004), *Metody i modeli analiza dannykh: OLAP i Data Mining* [Methods and data mining models: OLAP and Data Mining], BKHV-Peterburg, St-Petersburg, Russia.

14. Osuga S. (1989), *Obrabotka znaniy* [Knowledge processing], Mir, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 21.03.2013.