

УДК 004.94

Шушура О. М. Державний університет телекомунікацій, Київ

**ДЕФАЗИФІКАЦІЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ НЕЧІТКОГО
УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ БАГАТЬОХ АРГУМЕНТІВ**

Розглянуті питання використання нечіткої логіки для управління складними системами з наявністю зв'язків між їх характеристиками та обмеженнями на керуючі змінні. Для чого необхідно розробити реалізацію етапів нечіткого виводу. Проаналізовані існуючі підходи до реалізації дефазифікації в системах нечіткого виводу. Запропоновано новий метод дефазифікації для реалізації нечіткого виводу на основі функцій належності багатьох аргументів у термів лінгвістичних змінних системи управління.

Ключові слова: складна система, нечітке управління, інформаційна технологія, функція належності багатьох змінних, дефазифікація.

Shushura O. M. State University of Telecommunications, Kyiv

**DEFASIFICATION IN INFORMATIONAL TECHNOLOGIES OF FUZZY CONTROL
ON THE BASIS OF MEMBERSHIP FUNCTIONS OF SEVERAL ARGUMENTS**

Using the information technologies for the fuzzy control of complex systems with depended characteristics and restrictions on control variables requires the applying of fuzzy logic with the membership functions of several arguments. It requires developing the implementation of fuzzy conclusion phases. The formalization of fuzzy control problem based on the membership functions of several arguments is presented. A generalized view of the knowledge base rules for fuzzy conclusion is presented. Formulas for computing at all stages of fuzzy conclusion for calculating the values of control variables are described. One of the most difficult stages of fuzzy conclusion is defuzzification. Existing approaches to realization of defuzzification in systems of fuzzy conclusion are considered. Among them the methods of the center of gravity, the median, the largest of the maxima, the smallest of the maxima, the center of the maxima could be single out. The most popular among the existing methods of defuzzification is the method of the center of gravity. Classical methods of defuzzification in general case is very difficult to use in the case of membership functions of several arguments. Based on the idea of the center of gravity method, a new defuzzification method is proposed for the membership functions of several arguments, using the Monte Carlo method to calculate the integrals. The use of the numerical method makes it possible to carry out defuzzification with a certain error, depending on the number of points chosen at random. This method of defuzzification can be used in the development of information technologies that implement fuzzy logical conclusion based on the membership functions of several arguments in control tasks.

Keywords: complex system, fuzzy control, information technology, membership function of several arguments, defuzzification/

Шушура А. Н. Государственный университет телекоммуникаций, Киев

**ДЕФАЗИФИКАЦИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ НЕЧЕТКОГО
УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕСКОЛЬКИХ
ПЕРЕМЕННЫХ**

Рассмотрены вопросы использования нечеткой логики для нечеткого управления сложными системами с наличием связей между их характеристиками и ограничениями на управляющие переменные. Проанализированы существующие подходы к реализации дефазификации в системах нечеткого вывода. Предложен новый метод дефазификации для реализации нечеткого вывода на основе функций принадлежности многих аргументов у термов лингвистических переменных системы управления.

Ключевые слова: сложная система, нечеткое управление, информационная технология, функция принадлежности многих переменных, дефазификация.

© Шушура О. М., 2018

1. Вступ. Постановка задачі

Розширення застосування інформаційних технологій для управління складними системами вимагає врахування при прийнятті рішень зв'язків між характеристиками об'єкту та обмежень на керуючі змінні. Одним з напрямків врахування складної структури зв'язків системи є використання для управління нечіткого виводу на основі функцій належності багатьох змінних [1]. Даний підхід вимагає реалізації всіх етапів нечіткого виводу на новій математичній основі, оскільки використання функцій належності багатьох змінних ускладнює певні процедури. До етапів нечіткого виводу належать: фазифікація, агрегування, активізація, акумуляція, дефазифікація.

Одним з найбільш складних етапів нечіткого виводу з точки зору математичних розрахунків є процедура дефазифікації.

Метою даної роботи є дослідження та розробка методу дефазифікації нечіткого логічного виводу на основі функцій належності багатьох змінних (ФНБЗ) для реалізації інформаційних технологій нечіткого управління складними системами.

В роботі наведено опис основних етапів нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів, проведено огляд існуючих підходів до реалізації дефазифікації в наявних інформаційних технологіях, запропоновано процедуру дефазифікації для нечіткого логічного виводу з використанням функцій належності багатьох змінних.

2. Узагальнена структура системи нечіткого управління

Модель нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів в узагальненому вигляді можна представити як множину правил нечітких продукцій $P = \{R_1, R_2, \dots, R_p\}$ виду:

$$\text{Правило } R_r: \quad \text{ЯКЩО } \bigcap_{i=1}^{N_r} ПУ_{ir}^{lk} \text{ ТО } \bigcap_{j=1}^{M_r} ПЗ_{jr}^{zb}, (K_{fr}) \quad (1)$$

де N_r – кількість антецедентів, що входять до правила r ;

M_r – кількість консеквентів, що входять до правила r ;

$ПУ_{ir}^{lk}$ – i -а антецедента, що входить до правила r , яка представляє собою нечітке висловлювання, що складається з вхідної лінгвістичної змінної β_1 та відповідного їй k -го терму;

$ПЗ_{jr}^{zb}$ – j -а консеквента, що входить до правила r , яке представляє собою нечітке висловлювання, що складається з вихідної лінгвістичної змінної w_z та відповідного їй b -го терму [1].

Антецеденти в (1) мають вид:

$$ПУ_{ir}^{lk} : \beta_1 \in \beta_{lk}, \quad (2)$$

де β_1 – назва вхідної лінгвістичної змінної l ; β_{lk} – k -й терм вхідної лінгвістичної змінної β_1 .

Консеквенти в (1) представляються наступним чином:

$$ПЗ_{jr}^{zb} : w_z \in w_{zb}, \quad (3)$$

де w_z – назва z -ї вихідної лінгвістичної змінної;

w_{zb} – b -й терм вихідної лінгвістичної змінної w_z .

Для формування керуючих впливів \bar{U}_o інформаційної технології нечіткого управління з використанням ФНБЗ розроблено процедури нечіткого виведення, до яких входять фазифікація, агрегування, активізація, акумуляція, дефазифікація.

Процедура фазифікації полягає в розрахунку ступеня істинності S_{ir} антецеденти $ПУ_{ir}^{lk}$ (2) на основі значення функції належності відповідного їй терму вхідної лінгвістичної змінної:

$$S_{ir} = \mu_k^l(\bar{x}_l),$$

де \bar{x}_l – вектор значень вхідних змінних системи нечіткого виведення;

$\mu_k^l(\bar{x}_l)$ – функція належності k -го терму, що входить до антецеденти $ПУ_{ir}^{lk}$.

Агрегування представляє собою процедуру визначення ступеню істинності умов S_r за кожним правилом системи нечіткого виведення:

$$S_r = \min_i S_{ir}.$$

На етапі активізації відбувається обмеження значення функції належності кожної з консеквентів (3) вихідних лінгвістичних змінних за формулою:

$$\mu_r^{zb}(\bar{u}_z^o) = \min_j \{ Z_{jr}^{zb}, \mu_{zb}(\bar{u}_z^o) \},$$

де $\mu_{zb}(\bar{u}_z^o)$ – функція належності b -го терму вихідної змінної w_z системи нечіткого виведення;

Z_{jr}^{zb} – ступінь істинності кожної з консеквент:

$$Z_{jr}^{zb} = S_r \cdot Kf_r,$$

де Kf_r – ваговий коефіцієнт правила.

Етап акумуляції полягає в об'єднанні всіх ступенів істинності консеквентів для отримання функції належності кожної з вихідних змінних:

$$\mu_z^*(\bar{u}_z^o) = \bigcup_{r=1}^p \bigcup_{b=1}^c \mu_r^{zb}(\bar{u}_z^o),$$

де p – кількість правил, що входять до бази знань;

c – кількість термів вихідної лінгвістичної змінної w_z .

Дефазифікація полягає в тому, щоб, використовуючи результати акумуляції всіх вихідних лінгвістичних змінних, отримати звичайне кількісне значення кожної з вихідних змінних.

3. Дефазифікація на основі методу Монте-Карло

Серед існуючих підходів до дефазифікації у випадках використання функцій належності однієї змінної виділяють методи [2]:

- центр тяжіння;
- медіана;
- найбільший з максимумів;
- найменший з максимумів;
- центр максимумів.

Найбільше розповсюдження серед наведених методів отримав метод центру тяжіння. Інші методи вимагають більш складних процедур. Наприклад, розв'язок рівнянь у методі медіани, або пошук усіх локальних максимумів функції належності. Їх реалізація для функцій належності одного аргументу, від яких змінюється за рахунок застосування операцій активізації та акумуляції, є непростою та витратною задачею. У випадку використання

функцій належності багатьох аргументів обчислювальні процедури пошуку всіх локальних максимумів або розв'язок рівнянь стають дуже складними.

Для функцій належності багатьох аргументів формула дефазифікації ґрунтується на ідеї методу центру тяжіння:

$$u_{zn}^{o*} = \frac{\iint \dots \int_{V_z} u_{zn}^o \cdot \mu_z^*(\bar{u}_z^o) dv}{\iint \dots \int_{V_z} \mu_z^*(\bar{u}_z^o) dv}, \quad (4)$$

де u_{zn}^{o*} – значення n -ї змінної, зіставленої з лінгвістичною змінною w_z ;

V_z – область можливих значень керуючих змінних \bar{u}_z^o .

У випадку дискретної універсальної множини керуючих змінних формула (4) приймає вигляд:

$$u_{zn}^{o*} = \frac{\sum_{i=1}^q \mu_z^*(\bar{u}_i^{oz}) u_{in}^{oz}}{\sum_{i=1}^q \mu_z^*(\bar{u}_i^{oz})}. \quad (5)$$

Для дефазифікації по формулі (4) необхідно розв'язати задачу пошуку значення багатомірного інтегралу, як для розрахунку чисельника, так і для обрахування знаменника. З цією метою можна використати чисельні методи, наприклад, метод Монте-Карло. Оскільки функція належності дорівнює нулю в тих точках області V_z , що не є допустимими, застосування методу Монте-Карло в задачі дефазифікації нечіткого виводу на основі функцій належності багатьох аргументів значно спрощується.

Розглянемо знаходження методом Монте-Карло значення знаменника в формулі (4), тобто значення інтегралу:

$$\iint \dots \int_{V_z} \mu_z^*(\bar{u}_z^o) dv. \quad (6)$$

Нехай функція $\mu_z^*(\bar{u}_i^{oz})$ неперервна у області V_z . Для кожної змінної u_{zj}^o , $j = \overline{1, g}$ будується шляхом проєціювання області V_z на вісь цієї змінної відрізок $[a_j^z, A_j^z]$, такий що:

$$a_j^z \leq u_{zj}^o \leq A_j^z, \quad j = \overline{1, g}.$$

Зробимо заміну змінних:

$$u_{zj}^o = a_j^z + (A_j^z - a_j^z) \gamma_j^z, \quad j = \overline{1, g}, \quad (7)$$

де змінна γ_j^z належить відріzkу $[0, 1]$.

Для застосування методу Монте-Карло обираємо g рівномірно розподілених на відріzkу $[0, 1]$ послідовностей випадкових чисел:

$$\begin{aligned} &\gamma_{11}^z, \gamma_{12}^z, \dots, \gamma_{1\delta}^z \\ &\gamma_{21}^z, \gamma_{22}^z, \dots, \gamma_{2\delta}^z \\ &\dots \\ &\gamma_{g1}^z, \gamma_{g2}^z, \dots, \gamma_{g\delta}^z \end{aligned}$$

Для застосування методу Монте-Карло необхідно перейти в інтегралі (6) до змінних γ_j^z (7). Якобіан переходу має вигляд:

$$\begin{vmatrix} A_1^z - a_1^z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2^z - a_2^z & \dots & 0 \\ & & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & A_g^z - a_g^z \end{vmatrix} = (A_1^z - a_1^z)(A_2^z - a_2^z) \cdot \dots \cdot (A_g^z - a_g^z).$$

Використовуючи знайдений Якобіан, на основі ідеї методу Монте-Карло отримано формулу для наближеного розрахунку інтегралу (6):

$$\iint_{V_z} \dots \int \mu_z^*(\bar{u}_z^o) dv = \frac{(A_1^z - a_1^z) \cdot \dots \cdot (A_g^z - a_g^z)}{\delta} \sum_{\tau=1}^{\delta} \mu_z^*(a_1^z + (A_1^z - a_1^z)\gamma_{1\tau}^z, \dots, a_g^z + (A_g^z - a_g^z)\gamma_{g\tau}^z) \quad (8)$$

Формула для розрахунку значення чисельника в формулі (4) знаходиться аналогічно:

$$\begin{aligned} \iint_{V_z} \dots \int u_{zn}^o \cdot \mu_z^*(\bar{u}_z^o) dv &= \frac{(A_1^z - a_1^z) \cdot \dots \cdot (A_g^z - a_g^z)}{\delta} \times \\ &\times \sum_{\tau=1}^{\delta} (a_n^z + (A_n^z - a_n^z)\gamma_{n\tau}^z) \times \mu_z^*(a_1^z + (A_1^z - a_1^z)\gamma_{1\tau}^z, \dots, a_g^z + (A_g^z - a_g^z)\gamma_{g\tau}^z). \end{aligned} \quad (9)$$

Підставивши вирази (8) і (9) у формулу (4), та виконавши нескладні перетворення, отримано формулу дефазифікації на основі методу Монте-Карло для функцій належності багатьох аргументів:

$$u_{zn}^{o*} = \frac{\sum_{\tau=1}^{\delta} (a_n^z + (A_n^z - a_n^z)\gamma_{n\tau}^z) \times \mu_z^*(a_1^z + (A_1^z - a_1^z)\gamma_{1\tau}^z, \dots, a_g^z + (A_g^z - a_g^z)\gamma_{g\tau}^z)}{\sum_{\tau=1}^{\delta} \mu_z^*(a_1^z + (A_1^z - a_1^z)\gamma_{1\tau}^z, \dots, a_g^z + (A_g^z - a_g^z)\gamma_{g\tau}^z)} \quad (10)$$

Як бачимо, загальний вид формули (10) в цілому нагадує формулу (5) дефазифікації методом центра тяжіння для випадку дискретного завдання функцій належності, однак на відміну від неї, у формулі (10) значення аргументів визначаються випадковим чином, бо в ній використовуються послідовності випадкових величин, рівномірно розподілених на відрізьку [0,1].

Точність отриманої формули дефазифікації оцінюється відповідно до методу Монте-Карло та залежить від розміру вибірки випадкових величин [3]:

$$\Delta = \frac{1}{2\sqrt{\delta(1-\theta)}}$$

де θ – гарантована ймовірність попадання похибки в інтервал $[-\Delta; +\Delta]$

4. Висновки.

В роботі наведено основні етапи методу нечіткого виводу на основі використання функцій належності багатьох аргументів.

Проведено аналіз існуючих підходів до реалізації етапу дефазифікації та запропоновано новий метод дефазифікації на основі методу Монте-Карло, який може бути застосований для функцій належності як однієї, так і декількох змінних.

Результати роботи можуть бути використані при розробці інформаційних технологій для управління складними системами на основі нечіткої логіки.

Список використаної літератури

1. Шушура О. М. Метод нечеткого управления на основе переменных с многомерными функциями принадлежности / О. М. Шушура, И. О. Тарасова. – Донецьк: Штучний інтелект. – 2010. – № 1. – С. 122-128.
2. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С. Д. Штовба – 2001. – URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
3. Кветний Р. Н. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 2 / Р. Н. Кветний., І. В. Богач, О. Р. Бойко, О. Ю. Софіна. О.М. Шушура. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 235 с.

References

1. Shushura O. M., Tarasova I. O. "Method of fuzzy control based on variables with multidimensional membership functions." *Donetsk: Shtuchnyi intelekt* 1 (2010): 122-128.
2. Shtovba S. D. "Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic." *Electronic resource* (2001): URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
3. Kvietyi R. N., Bogach I. V., Boiko O. R., Sophina O.Yu., Shushura O. M. "Computer simulation of systems and processes. Methods of calculation. Part 2." *Vinnitsa: VNTU* (2013): 235.

Автори статті

Шушура Олексій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри системного аналізу, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.:+380 (50) 470 15 67. E-mail: leshu@i.ua.

Authors of the article

Shushura Oleksii Mykolaiovych – candidate of sciences (technical), associate professor, head of the department of system analysis, State University of Telecommunications, Kyiv. Phone: + 380 (50) 470 15 67. E-mail: leshu@i.ua.

Дата надходження
в редакцію: 16.01.2018 р.

Рецензент:
доктор технічних наук, професор К. С. Козелкова
Державний університет телекомунікацій, Київ