

УДК 004.[6+8+94]

О. М. ШУШУРА, доктор техн. наук, доцент;

А. П. БОНДАРЧУК, доктор техн. наук, доцент;

К. П. СТОРЧАК, доктор техн. наук, доцент;

О. А. ЗОЛОТУХІНА, канд. техн. наук, доцент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ НА ПРИНЦИПАХ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Запропоновано підходи до формалізації задач керування на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів. Наведено формальний опис змінних, подання правил нечітких продукцій та підходи до завдання обмежень задачі керування, зокрема тих, що мають «розмитий» характер. Результати роботи можуть бути використано у процесі розробки інтелектуальних інформаційних технологій для автоматизації завдань керування складними системами.

Ключові слова: інтелектуальна інформаційна технологія; нечітке керування; функції належності багатьох змінних.

Вступ

Постановка проблеми. Інтелектуальні інформаційні технології широко використовуються для оброблення даних і керування в сучасних технічних та організаційних системах. За відносно короткий період інформаційні системи та технології пройшли шлях розвитку від забезпечення розв'язку окремих прикладних задач до підтримання прийняття рішень у різних сферах діяльності людини. Зростання складності задач, що постають перед розробниками інформаційних технологій, вимагає створення нових та удосконалення існуючих методологічних основ їх побудови. Побудова інтелектуальних інформаційних технологій для автоматизації виконання завдань нечіткого керування складними системами потребує розробки підходів до формалізації задачі, зокрема подання зв'язків між змінними системи, які зумовлені наявністю обмежень на керування. У багатьох задачах керування ці обмеження мають нечіткий, розмитий характер, для опису яких використовується нечітка логіка [1]. У даній роботі запропоновано підходи до формалізації змінних, подання правил нечітких продукцій та підходи до завдання обмежень на керування на засадах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існуючі методології нечіткого логічного виведення, що подано в роботах Мамдані, Сугено, Ларсена та інших науковців, розглядають задачу керування без обмежень [2–4]. При цьому формальна постановка задачі автоматизації керування зазвичай містить лише опис змінних і набір нечітких продукційних правил. Використання при нечіткому моделюванні змінних із функціями належності одного аргументу не дає змоги повною мірою врахувати обмеження на керування під час розробки інформаційних систем керування та підтримання прийняття рішень. Застосування для моделювання об'єктів зі складною структурою вхідних і вихідних змінних ієрархічних систем нечіткого виведення призводить до того, що у разі переходу між рівнями ієрархії виникає певна ступінь розмитості, що може спричинити втрату значимості результату [5; 6]. Задачу побудови інтелектуальних інформаційних технологій для автоматизації керування можливо розв'язати на основі нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів [7].

Таким чином, задача розробки підходів до формалізації задачі керування в інтелектуальних інформаційних технологіях на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів є актуальною.

Основна частина

Метою роботи є розробка підходів до формалізації задач керування в інтелектуальних інформаційних технологіях на принципах нечіткої логіки, зокрема подання змінних, нечітких продукційних правил та обмежень задачі з використанням функцій належності багатьох аргументів.

Узагальнену схему пристрою керування інтелектуальною інформаційною технологією зображено на рисунку.



Узагальнена схема пристрою нечіткого керування

© О. М. Шушура, А. П. Бондарчук, К. П. Сторчак, О. А. Золотухіна, 2019

Як впливає з рисунка, до задач нечіткого керування введено множини вхідних \bar{X} і вихідних (керуючих) \bar{U} змінних, у відповідність до них ставляться множини вхідних та вихідних лінгвістичних змінних $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ і $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$.

Вхідні змінні \bar{X} розбиваються на підмножини \bar{x}_i , $i = \overline{1, n}$, які відповідають кожній вхідній лінгвістичній змінній α_i :

$$\alpha_i \rightarrow \bar{x}_i, \quad (1)$$

у такий спосіб, що задовольняють умови

$$\bar{X} = \bigcup_{i=1}^n \bar{x}_i, \quad (2)$$

$$\bar{x}_i \cap \bar{x}_k = \emptyset \forall i, k. \quad (3)$$

Відповідно до класичного визначення вхідну лінгвістичну змінну α_i можна подати як кортеж:

$$\langle \alpha_i, T_i^\alpha, D_i^\alpha, S_i^\alpha, M_i^\alpha \rangle, \quad (4)$$

де α_i — назва змінної; T_i^α — множина термів лінгвістичної змінної α_i , що визначається як $T_i^\alpha = \{t\alpha_{i1}, t\alpha_{i2}, \dots, t\alpha_{iK_i}\}$; D_i^α — множина можливих значень змінних \bar{x}_i ; S_i^α — синтаксична процедура, яка визначає формування нових термів; M_i^α — семантична процедура, що задає функції належності для нових термів, які генеруються процедурою S_i^α .

У зв'язку зі складністю реалізації процедури S_i^α та M_i^α у практичних задачах побудови інтелектуальних інформаційних технологій для нечіткого керування використовуються дуже рідко.

Для кожного терма $t\alpha_{ik}$ у загальному випадку формується функція належності багатьох аргументів $\mu_{ik}^\alpha(\bar{x}_i)$, задана на універсальній множині D_i^α :

$$\mu_{ik}^\alpha(\bar{x}_i): D_i^\alpha \rightarrow [0, 1]. \quad (5)$$

Множина допустимих значень вхідних змінних визначається як об'єднання універсальних множин вхідних лінгвістичних змінних:

$$D^\alpha = \bigcup_{i=1}^n D_i^\alpha. \quad (6)$$

У такий самий спосіб вихідні змінні \bar{U} розбиваються на підмножини \bar{u}_j , $j = \overline{1, m}$, які відповідають кожній вхідній лінгвістичній змінній β_j :

$$\beta_j \rightarrow \bar{u}_j, \quad (7)$$

$$\bar{U} = \bigcup_{j=1}^m \bar{u}_j, \quad (8)$$

$$\bar{u}_j \cap \bar{u}_k = \emptyset \forall j, k. \quad (9)$$

Вхідну лінгвістичну змінну β_j можна подати як кортеж

$$\langle \beta_j, T_j^\beta, D_j^\beta, S_j^\beta, M_j^\beta \rangle, \quad (10)$$

де β_j — назва змінної; T_j^β — множина термів лінгвістичної змінної β_j , що визначається як $T_j^\beta = \{t\beta_{j1}, t\beta_{j2}, \dots, t\beta_{jZ_j}\}$; D_j^β — множина можливих значень змінних \bar{u}_j ; S_j^β — синтаксична процедура, яка визначає формування нових термів; M_j^β — семантична процедура, яка задає функції належності для нових термів, що генеруються процедурою S_j^β .

Для кожного терма $t\beta_{jz}$ формується функція належності багатьох аргументів $\mu_{jz}^\beta(\bar{u}_j)$, яка задана на універсальній множині D_j^β :

$$\mu_{jz}^\beta(\bar{u}_j): D_j^\beta \rightarrow [0, 1]. \quad (11)$$

Множина допустимих значень керуючих змінних визначається як об'єднання універсальних множин лінгвістичних змінних:

$$D^\beta = \bigcup_{j=1}^m D_j^\beta. \quad (12)$$

Далі необхідно задати зв'язок між вхідними та вихідними змінними задачі керування. Для опису зв'язків між змінними, які визначають правила їх пошуку, використовуються правила нечітких продукцій, оскільки вони, порівняно з іншими формами подання знань, мають такі переваги:

- модульність;
- наочність;
- однаковість структури (основні компоненти виробничої системи можуть застосовуватися для побудови інтелектуальних систем із різною проблемною орієнтацією);
- природність (висновок укладення в продукційній системі багато в чому подібний процесу міркувань експерта);
- легкість внесення доповнень і простота механізму логічного висновку.

Тому модель нечіткого керування на основі функцій належності багатьох аргументів в узагальненому вигляді можна подати як множину нечітких продукційних правил $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$, що у спрощеному вигляді можна записати так:

$$\text{RULE } R_q: \text{ IF condition}_q \text{ THEN conclusion}_q, (F_q), \quad (13)$$

де condition_q та conclusion_q — відповідно антецедент та консеквент правила q у вигляді нечіткого логічного висловлювання; F_q — ваговий коефіцієнт правила, що набуває значення з діапазону $(0, 1]$. За замовчуванням $F_q = 1$.

Антецедент правил типу (13) складається з одного або кількох елементарних нечітких висловлювань SA_{lq}^{ik} , поєднаних між собою операціями нечіткої логіки, виду:

$$SA_{lq}^{ik}: \alpha_i \text{ IS } t\alpha_{ik}, \quad (14)$$

де l — номер елементарного нечіткого висловлювання у антецеденті правила R_q , $l = \overline{1, N_q}$.

Аналогічно консеквент правила складається з одного або кількох елементарних нечітких висловлювань SC_{rq}^{jz} виду

$$SC_{rq}^{jz}: \beta_i \text{ IS } t\beta_{jz}, \quad (15)$$

де r — номер елементарного нечіткого висловлювання у консеквенті правила R_q , $r = \overline{1, M_q}$; $t\beta_{jz}$ — терм лінгвістичної змінної β_j .

Для спрощення подальших розрахунків під час нечіткого виведення зробимо припущення, що для поєднання частин антецедентів та консеквентів правил виду (11) надалі з логічних операцій будемо використовувати лише нечітку кон'юнкцію, яка реалізується за одним із варіантів t -норми.

Обмеження задачі нечіткого керування подаються у вигляді системи функцій належності багатьох змінних

$$\overline{G}(\overline{X}, \overline{U}). \quad (16)$$

Такі обмеження задачі керування у вигляді функцій належності має певну аналогію з використанням штрафних функцій у задачах оптимізації. Однак функція належності забезпечує найбільш універсальний засіб формалізації обмежень задачі, оскільки реалізує у загальному випадку таке відображення:

$$g_i(\overline{X}, \overline{U}): D^\beta \times D^\alpha \rightarrow [0, 1]. \quad (17)$$

Нечітке обмеження є більш універсальним обмеженням, ніж звичайне, оскільки звичайне обмеження легко зводиться до нечіткого завдяки використанню дискретної функції належності.

Розглянемо формалізацію обмежень задачі на прикладі опису невизначеності «розміщено в області». Формалізуємо узагальнену функцію належності точки області.

Нехай область описується нерівністю виду

$$f(\overline{x}) \leq 0, \quad (18)$$

де \overline{x} — вектор змінних, що описує предметну область.

Тоді функцію належності, що моделює невизначеність «розміщено в області», можна подати у вигляді

$$\mu(\overline{x}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f(\overline{x}) \leq 0, \\ 1 - \lambda \cdot f(\overline{x}), & \text{якщо } 0 < 1 - \lambda \cdot f(\overline{x}) < 1, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (19)$$

де λ — позитивний параметр, що задає розмір «перехідної» області для конкретного виду кривої.

Функція (19) дозволяє віднести до області з деяким ступенем належності ті точки, які розміщено поблизу від її межі поза областю. У низці задач такий підхід є неприйнятним, оскільки можливе строге вимагання не включати до області точки поза її межею. У такому разі необхідно ступенем належності, меншим за одиницю, характеризувати точки, які перебувають в області біля її кордону. Відповідну функцію належності можна побудувати у вигляді

$$\mu(\overline{x}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f(\overline{x}) \leq \xi, \\ (f(\overline{x}) - \lambda) / (\xi - \lambda), & \text{якщо } \xi < 1 - f(\overline{x}) < \lambda, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (20)$$

де λ — невід'ємний параметр, що задає плавність «перехідної» області для конкретного виду кривої; ξ — від'ємне число, яке визначає міру наближення до межі області, після якої значення функції належності має стати меншим за одиницю.

У разі, якщо область задано строгою нерівністю, функцію належності можна дістати аналогічно.

Нехай область визначається за рівністю виду

$$f(\overline{x}) = 0, \quad (21)$$

де \overline{x} — вектор змінних, що описує предметну область.

Тоді функцію належності, що моделює невизначеність «розміщено в області», можна подати так:

$$\mu(\bar{x}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f(\bar{x}) = 0, \\ 1 - |\lambda \cdot f(\bar{x})|, & \text{якщо } 0 < |\lambda \cdot f(\bar{x})| < 1, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (22)$$

де λ — позитивний параметр, що задає розмір «перехідної» області для конкретного виду кривої.

У разі відкритої області вона описується нерівністю

$$f(\bar{x}) < 0, \quad (23)$$

де \bar{x} — вектор змінних, що визначає предметну область.

Для обмеження (23) функція належності (19) побудована бути не може, оскільки вона матиме розрив у тих точках області визначення, де $f(\bar{x}) = 0$. Тому для відкритих областей, що задаються нечіткими обмеженнями, доцільно використовувати функції належності виду (20), із тим уточненням, що параметр λ має бути таким, що дорівнює нулю.

Визначення конкретних значень параметрів функції належності залежить від специфіки задачі і виконується експертом. Експерт має досконально володіти не тільки особливостями предметної області, а й також мати відповідну математичну підготовку та вміння ставити задачі нечіткого керування.

Побудуємо функції належності, аналогічні (19) і (20), для області, яку задано нерівністю

$$f(\bar{x}) \geq 0, \quad (24)$$

де \bar{x} — вектор змінних, що описує предметну область.

Для випадку, коли «перехідна зона» значень функції розташовується у від'ємній частині, функція належності набиратиме вигляду

$$\mu(\bar{x}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f(\bar{x}) \geq 0, \\ 1 + \lambda \cdot f(\bar{x}), & \text{якщо } 0 < 1 + \lambda \cdot f(\bar{x}) < 1, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (25)$$

де λ — позитивний параметр, що задає розмір «перехідної» області для конкретного виду кривої.

Функція належності, аналогічна за призначенням функції типу (20), для обмеження (24) матиме вигляд:

$$\mu(\bar{x}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f(\bar{x}) \geq \xi, \\ (f(\bar{x}) - \lambda) / (\xi - \lambda), & \text{якщо } \lambda < f(\bar{x}) < \xi, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (26)$$

де λ — не додатний параметр, що задає плавність «перехідної» області для конкретного виду кривої; ξ — додатне число, яке визначає міру наближення до межі області, після якої значення функції належності має стати меншим за одиницю.

Аналогічно випадку (23) для відкритої області за строгої нерівності в формулі (24) будується функція належності виду (26) із параметром λ , що дорівнює нулю.

Для областей, заданих системою нерівностей

$$\mu(\bar{x}) = \begin{cases} f_1(\bar{x}) \leq 0, \\ \dots \\ f_m(\bar{x}) \leq 0, \end{cases} \quad (27)$$

спочатку будуються функції належності для кожної з нерівностей системи, використовуючи формули (19) або (20).

Результуючу функцію належності $\mu(\bar{x})$ системи (27) можна дістати завдяки застосуванню нечіткої логічної операції — кон'юнкції для функцій належності кожної з нерівностей $\mu_1(\bar{x}) \dots \mu_m(\bar{x})$:

$$\mu(\bar{x}) = \mu_1(\bar{x}) \wedge \mu_2(\bar{x}) \wedge \dots \wedge \mu_m(\bar{x}). \quad (28)$$

Операція кон'юнкції може бути реалізована за одним із варіантів завдання t -норми. Для спрощення розрахунків рекомендується у формулі (28) використовувати реалізацію нечіткої кон'юнкції у вигляді добутку функцій належності нерівностей системи.

Висновки

Таким чином, у роботі запропоновано підходи до формалізації задач керування в інтелектуальних інформаційних технологіях на принципах нечіткої логіки, зокрема подання змінних, нечітких продукційних правил та обмежень задачі з використанням функцій належності багатьох аргументів. Сформульована узагальнена математична постановка задачі містить функції належності багатьох змінних як для опису характеристик термів лінгвістичних змінних, так і для завдання обмежень задачі нечіткого

керування. Формалізація «розмитих» обмежень у вигляді функцій належності дозволяє врахувати їх в задачах нечіткого керування та підтримання прийняття рішень. Результати роботи можуть бути використані у процесі розробки інтелектуальних інформаційних технологій для автоматизації виконання завдань керування складними системами.

Список використаної літератури

1. Zadeh L. A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
2. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. 2001 [Електронний ресурс]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.
3. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. Киев, 2010. 344 с.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
5. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва, 2007. 288 с.
6. Zeinali M. Multi-layer fuzzy system modeling a new approach: Theory and application: International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY). Pingtung. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/iFUZZY.2017.8311811.
7. Шушура О. М. Інформаційна технологія для автоматизації нечіткого керування з нелінійними обмеженнями // *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018. № 2. С. 28–32.

Рецензент: доктор техн. наук, професор М. І. Сидоренко, Інститут радіофізики та електроніки НАН України, Харків.

А. Н. Шушура, А. П. Бондарчук, К. П. Сторчак, О. А. Золотухина

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ НА ПРИНЦИПАХ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Предложены подходы к формализации задач управления на принципах нечеткой логики с использованием функций принадлежности многих аргументов. Приведены формальное описание переменных, представление правил нечетких продукций и подходы к заданию ограничений задачи управления, в том числе имеющих «размытый» характер. Результаты работы могут быть использованы при разработке интеллектуальных информационных технологий для автоматизации задач управления сложными системами.

Ключевые слова: интеллектуальная информационная технология; нечеткое управление; функции принадлежности многих переменных.

O. M. Shushura, A. P. Bondarchuk, K. P. Storchak, O. A. Zolotukhina

FORMALIZATION OF MANAGEMENT TASKS IN INTELLIGENT INFORMATION FUZZY LOGIC TECHNOLOGY

Intelligent information technologies are widely used for data processing and control in modern technical and organizational systems. The increasing complexity of the challenges faced by IT developers requires the creation of new ones methodological bases for their construction. Building intelligent information technology to automate the tasks of fuzzy control of complex systems requires the development of approaches to formalizing the task, including presenting relationships between system variables that are subject to control constraints. In many management tasks, these constraints are blurred, and fuzzy logic is used to describe them. The paper proposes approaches to formalizing management problems in intelligent information technologies based on fuzzy logic, including the presentation of variable, fuzzy production rules, and constraints on the problem using the membership function of several arguments. The generalized mathematical formulation of the problem contains the membership function of several arguments to describe the characteristics of terms of linguistic variables and to specify the constraints of the fuzzy control problem. The formalization of «blurred» constraints in the form of membership functions allows them to be taken into account in the problems of fuzzy management and decision support. Forming the form of these membership functions is not an easy task, even if one variable is used. Determination of specific values of the parameters of the membership function depends on the specifics of the problem and is performed by an expert. The expert must have a thorough knowledge of not only the peculiarities of the subject area, but also have mathematical training and ability to set the tasks of fuzzy control. The results of the work can be used in the development of intelligent information technology to automate the tasks of managing complex systems.

Keywords: intelligent information technology; fuzzy control; membership function of several arguments.