

Шушура О. М.

*доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри автоматизації проектування
енергетичних процесів і систем
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна*

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ НЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ БАГАТЬОХ АРГУМЕНТІВ

В роботі представлені методологічні основи побудови інформаційних технологій для підвищення якості функціонування об'єктів зі складною структурою шляхом автоматизації обробки інформації і управління на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів. Розроблено метод концептуального моделювання предметних областей задачі нечіткого управління, метод автоматизації нечіткого управління, який враховує обмеження на керуючі змінні, формалізовані за допомогою функцій належності багатьох аргументів. Представлено узагальнену структуру інформаційної технології нечіткого управління, розроблено моделі структури її баз даних та знань, алгоритми переробки інформації.

Вступ

Інформаційні технології широко використовуються для обробки даних і управління, пройшовши в своєму розвитку шлях від забезпечення розв'язку окремих прикладних задач до підтримки прийняття рішень в різних сферах діяльності людини. Зростання складності задач управління та підтримки прийняття рішень вимагає створення нових та удосконалення існуючих методологічних основ побудови інформаційних технологій.

Одним з найбільш важливих сучасних напрямів розвитку інформаційних технологій є застосування нечіткої логіки при розробці систем автоматизованої обробки інформації та управління. Перевагами використання нечіткої логіки є

спрощення моделювання складних систем, створення гнучких алгоритмів підтримки прийняття рішень на основі зрозумілих людині наборів правил, можливість обробки неточної та неповної інформації [1; 2].

Визнаючи наукову і практичну цінність наявних робіт, присвячених застосуванню нечіткої логіки, слід зазначити, що вони в основному містять математичні аспекти формалізації та вирішення практичних задач, але майже не охоплюють методологічні питання побудови інформаційних технологій для реалізації нечіткого управління складними системами. Існуючі підходи до концептуального моделювання предметних галузей інформаційних систем містять спрощені форми подання задач нечіткого управління, які не відображають в повній мірі зв'язки між змінними та їх характеристики [3-5]. Дослідження методів нечіткого управління, серед яких можна виділити алгоритми Мамдані, Сугено, ієрархічний нечіткий вивід, показало, що їх недоліком є використання в якості термів нечітких змінних з функціями належності одного аргументу, що може призводити до втрати взаємозв'язку між величинами і не дозволяє врахувати обмеження задачі [6-8]. Застосування для моделювання об'єктів зі складною структурою змінних ієрархічних систем нечіткого виводу викликає певну розмитість при переході між рівнями ієрархії, що може призвести до втрати значимості результату. Зазначено, що при зростанні кількості змінних та правил бази знань в моделі нечіткого управління стає актуальною задача підвищення ефективності процедур нечіткого виведення [6]. Використання нейронних мереж виключає можливість виділити функцію належності і базу правил, а також функції, що описують консеквенти кожного правила.

Таким чином, виникає об'єктивне протиріччя між потребами розробки інформаційних технологій для ефективного управління системами зі складною структурою зв'язків змінних і обмеженими можливостями існуючого науково-методологічного апарату побудови інформаційних систем на основі нечіткої логіки. Можливим напрямом розв'язання даного протиріччя є застосування в інформаційних системах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох змінних. У зв'язку з цим є актуальною науково-прикладна проблема теоретичного обґрунтування та розробки методологічних основ побудови інформаційних технологій для підвищення якості

функціонування об'єктів зі складною структурою шляхом автоматизації обробки інформації і управління на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів.

Метою дослідження є підвищення якості функціонування складних систем за рахунок розробки моделей та методів інформаційної технології для автоматизованої переробки інформації і управління на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох змінних.

Для досягнення даної мети в роботі поставлені та вирішені наступні завдання:

- провести аналіз існуючих підходів до побудови інформаційних технологій на основі застосування нечіткої логіки в задачах переробки інформації та управління складними системами;

- розробити метод концептуального моделювання предметних галузей інформаційних технологій в задачах нечіткого управління;

- розробити метод переробки інформації з метою формування функцій належності багатьох аргументів для термів лінгвістичних змінних;

- сформулювати метод для вирішення задач автоматизації нечіткого управління складними системами при наявності нелінійних обмежень на керуючі змінні;

- адаптувати метод центру тяжіння для етапу дефазифікації нечіткого логічного виведення при використанні функцій належності багатьох аргументів;

- удосконалити модель структури даних інформаційної технології для нечіткого управління з використанням функцій належності багатьох аргументів;

- дослідити ефективність застосування розроблених методологічних основ побудови інформаційних технологій для управління на принципах нечіткої логіки в практичних задачах керування конкретними об'єктами.

1. Моделювання складних систем в задачах нечіткого управління на основі функцій належності багатьох змінних

В основу методології побудови інформаційних технологій для автоматизації управління на засадах нечіткої логіки необхідно покласти підходи до розробки моделей та методів нечіткого

управління, інваріантних стосовно предметної області, що вимагає формування підходів до концептуального моделювання та формалізації.

Метод концептуального моделювання задач автоматизації нечіткого управління передбачає побудову наступних діаграм [9]:

- концептуальна модель задачі нечіткого управління;
- модель лінгвістичних змінних;
- модель структури правил нечіткого виводу.

Концептуальна модель задачі нечіткого управління представляється у вигляді діаграми, що містить графічне представлення вхідних та вихідних змінних блоку нечіткого управління, відповідних їм лінгвістичних вхідних та вихідних змінних, а також опис обмежень задачі. Приклад концептуальної моделі задачі нечіткого управління наведено на рисунку 1.

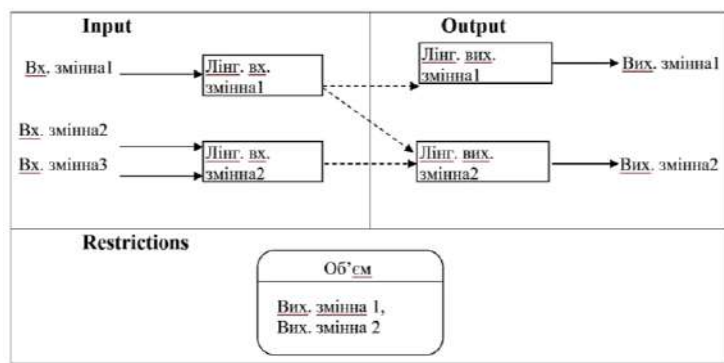


Рис. 1. Приклад концептуальної моделі задачі нечіткого управління

Як бачимо на рисунку 1, область моделі поділена на три частини: вхід блоку управління (Input), вихід блоку управління (Output), обмеження (Restrictions). У вхідній та вихідній частинах наведені назви звичайних вхідних та вихідних змінних блоку управління відповідно.

У прямокутниках наведено назви лінгвістичних змінних та стрілками вказано зв'язок між звичайними і відповідними їм лінгвістичними змінними. Пунктирними лініями зображено узагальнений вплив вхідних лінгвістичних змінних на формування значень вихідних лінгвістичних змінних, який

необхідно буде врахувати при формалізації нечітких продукцій бази знань нечіткого виводу. У частині діаграми, що відповідає обмеженням задачі, у вигляді прямокутників з округленими кутами наводяться обмеження. По кожному обмеженню вказується назва, що відбиває його фізичний сенс, та перераховуються звичайні змінні, які входять до обмеження. В подальшому для кожної лінгвістичної змінної необхідно деталізувати її структуру.

Детальний опис структури та характеристик кожної лінгвістичної змінної відбувається у її графічній моделі. Загальний вид моделі лінгвістичної змінної відповідно до її класичного визначення наведено на рисунку 2.

Назва лінгвістичної змінної	
Тип	Input/ Output
Блок змінних	
Назва звичайної змінної	Множина допустимих значень
Блок термів	
Назва терму	Характеристика функції належності
Опис процедури формування нових термів	
Опис процедури формування функцій належності термів	

Рис. 2. Узагальнений вид моделі лінгвістичної змінної

Як видно на рисунку 2, лінгвістична змінна представляється у вигляді фрейму. В першому полі вказується назва лінгвістичної змінної, а потім позначається, чи є вона вхідною або вихідною змінною.

Далі наводяться назви звичайних змінних, яким поставлена у відповідність дана лінгвістична змінна, а також їх області допустимих значень, тим самим визначаючи універсальну множину лінгвістичної змінної. Наступний блок моделі – множина термів лінгвістичної змінної.

Вказуються назви термів та надається характеристика їх функцій належності.

За наявності також наводиться опис процедури формування нових термів змінної та процедури визначення функцій належності нових термів.

На підставі зв'язків між лінгвістичними змінними, що зображуються в концептуальній моделі задачі нечіткого управління, та моделей лінгвістичних змінних формуються правила бази знань нечіткого виводу у вигляді нечітких продукцій, для представлення структури яких запропонована модель, приклад якої можна побачити на рисунку 3.

З рисунку 3 зрозуміло, що модель структури правил нечіткого виводу відображає зв'язок між антецедентами та консеквентами правил, представлених у вигляді логічних виразів зі значеннями лінгвістичних змінних.

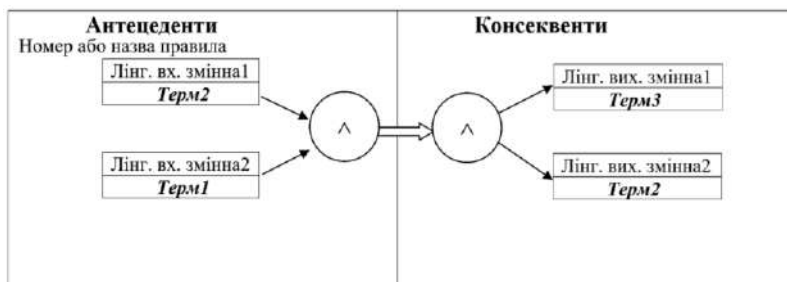


Рис. 3. Приклад моделі структури правил нечіткого виведення

Модель структури правила поділяється на дві частини: антецеденти та консеквенти. В частині антецедентів вказуються у вигляді прямокутників лінгвістичні змінні та їх значення (терми). Частини антецедентів поєднуються у складні структури за допомогою логічних операцій кон'юнкції та диз'юнкції, які наводяться у вигляді кіл з відповідною позначкою операції.

Логічна структура антецедентів може бути складною, сформованою в результаті кількох логічних операцій з різними рівнями вкладення. Широкою стрілкою позначено закінчення умовної частини правила та перехід до виводу.

Структура висновку правила будується на принципах, аналогічних умовній частині, але у дзеркальному порядку. Спочатку наводиться логічна операція, яка буде виконуватися між консеквентами, а далі самі консеквенти.

Структура заключної частини правила також може бути складною. Однак у більшості моделей нечіткого виведення робиться припущення, що для поєднання частин антецедентів чи

консеквентів використовується лише логічна операція кон'юнкції.

Використання розробленого методу концептуального моделювання дозволяє наочно представити базові компоненти предметної області задачі нечіткого управління. На основі концептуальної моделі сформована узагальнена математична постановка задачі нечіткого управління з обмеженнями на керуючі змінні.

На базі концептуальної моделі задачі нечіткого управління формуються множини вхідних \bar{X} і вихідних (керуючих) \bar{U} змінних пристрою управління, у відповідність ним ставляться множини вхідних та вихідних лінгвістичних змінних $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ та $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}$.

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

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

$$\bar{X} = \bigcup_{i=1}^n \bar{x}_i, \bar{x}_i \cap \bar{x}_k = \emptyset \forall i, k. \quad (2)$$

Відповідно до класичного визначення, вхідна лінгвістична змінна α_i представляється як кортеж:

$$\langle \alpha_i, T_i^\alpha, D_i^\alpha, S_i^\alpha, M_i^\alpha \rangle,$$

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

Для кожного терму $t\alpha_{ik}$ у загальному випадку формується функція належності багатьох аргументів $\mu_{ik}^\alpha(\bar{x}_i)$, яка задана на універсальній множині D_i^α і здійснює відображення на відрізок $[0, 1]$.

Вихідна лінгвістична змінна β_j формалізується аналогічним чином.

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

$$\beta_j \rightarrow \bar{u}_j, \quad (3)$$

$$\bar{U} = \bigcup_{j=1}^m \bar{u}_j, \bar{u}_j \cap \bar{u}_k = \emptyset \forall j, k. \quad (4)$$

Вхідна лінгвістична змінна β_j представляється як кортеж:

$$\langle \beta_j, T_j^\beta, D_j^\beta, S_j^\beta, M_j^\beta \rangle,$$

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

Для кожного терму $t\beta_{jz}$ формується функція належності багатьох аргументів $\mu_{jz}^\beta(\bar{u}_j)$, яка задана на універсальній множині D_j^β і здійснює відображення на відрізок $[0,1]$.

Модель нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів в узагальненому вигляді можна представити як множину нечітких продукційних правил $\{R_1, R_2, \dots, R_p\}$, що у спрощеному вигляді представляються як:

$$\text{RULE } R_q: \text{IF } condition_q \text{ THEN } conclusion_q, (F_q) \quad (5)$$

де $condition_q$ та $conclusion_q$ – відповідно антецедент та консеквент правила у вигляді нечіткого логічного висловлювання; F_q – ваговий коефіцієнт правила, що приймає значення з діапазону $(0,1]$.

Антецедент правил типу (5) складається з одного або кількох елементарних нечітких висловлювань SA_{iq}^{ik} виду:

$$SA_{iq}^{ik} : \alpha_i \text{ IS } t\alpha_{ik}, \quad (6)$$

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:

$$SC_{rq}^{jz} : \beta_j \text{ IS } t\beta_{jz}, \quad (7)$$

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

З метою спрощення розрахунків під час нечіткого виведення у антецеденті та консеквенті правил виду (5) будемо використовувати лише нечітку кон'юнкцію, що реалізується за одним з варіантів t -норми.

Обмеження задачі нечіткого управління представляються у вигляді системи функцій належності багатьох змінних:

$$\bar{G}(\bar{X}, \bar{U}). \quad (8)$$

Вид функцій належності $\mu_{ik}^{\alpha}(\bar{x}_i)$ і $\mu_{jz}^{\beta}(\bar{u}_j)$ для термів лінгвістичних змінних α_i та β_j може бути заздалегідь визначеним у вигляді аналітичної залежності, або формуватися на основі експериментальних даних.

З метою використання в задачах нечіткого моделювання та керування в роботі запропоновано кілька типів функцій належності багатьох аргументів у вигляді аналітичних залежностей. Як приклад, наведена пірамідальна функція належності багатьох змінних:

$$\mu(\bar{x}) = \max \left\{ \left(1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{|x_j - x_j^0|}{h_j} \right) \right); 0 \right\},$$

де x_j – значення j -ої компоненти вектора змінних \bar{x} ; x_j^0 – j -е значення центру основи піраміди; h_j – ненульові числові параметри, що задають масштабування за координатами вектора \bar{x} ; n – кількість змінних в векторі \bar{x} .

Пірамідальна функція є певним аналогом трикутної функції належності. Центр основи піраміди відповідає вектору значень, якому приблизно дорівнює величина, що моделюється. Приклад побудови пірамідальної функції належності двох аргументів з

координатами центру (1,1) і одиничними значеннями параметрів h_j , представлений на рисунку 4.

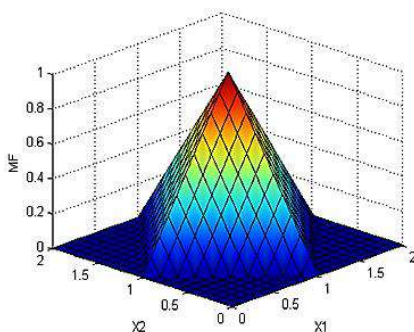


Рис. 4. Приклад графіку пірамідальної функції належності

Визначення виду функції належності при побудові нечіткої моделі процесу керування є складною задачею, особливо у випадку використання функцій належності багатьох змінних. Не завжди можна апіорно визначити аналітичний вид функції належності, тому в деяких випадках необхідно використовувати також і статистичні дані [10; 11]. На рисунку 5 показано етапи методу переробки інформації для формування функцій належності термів лінгвістичних змінних на основі експериментальних даних щодо функціонування об'єкту управління.

Як видно з рисунку 5, на першому етапі відбувається підготовка даних, характерних для універсальної множини функції належності. Потім застосовуються методи нечіткої кластеризації для формування таблично-заданої функції належності багатьох змінних. Якщо кластеризація була проведена для універсальної множини лінгвістичної змінної, то на основі її результатів також можливе визначення термів змінної. Отримана таблично-задана функція аналізується експертами для визначення варіантів типу функції. Для функцій належності з невеликою кількістю аргументів бажано застосовувати побудову графіку самої функції або її проекцій.

Для обраних варіантів типу функції здійснюється пошук параметрів. З метою пошуку значень параметрів може бути використаний метод найменших квадратів або метод Монте-Карло. Для оцінки якості формування функції належності розраховується відмінність між таблично-заданою функцією та

аналітичною функцією за допомогою парних критеріїв похибки [12]. З використанням методів експертних оцінок обирається вид функції належності, або експерт може переглянути її тип чи відмовитися від пошуку аналітичного виду функції належності на користь використання чисельних методів апроксимації.



Рис. 5. Етапи реалізації методу формування функцій належності термів

2. Нечітке управління на основі функцій належності багатьох аргументів

Представлено розробку методу автоматизації вирішення формалізованої задачі нечіткого управління при наявності нелінійних обмежень на керуючі змінні, запропоновано метод дефазифікації нечіткого логічного виведення для випадку використання функцій належності багатьох змінних, наведено метод нечіткого виведення, що базується на формуванні та обході графа питальника.

Етапи методу автоматизації розв'язку задачі нечіткого управління при наявності обмежень на керуючі змінні представлено на рисунку 6.

Як видно на рисунку 6, для формування керуючих впливів \bar{U} інформаційної технології нечіткого управління з використанням функцій належності багатьох аргументів розроблено етапи

процедури нечіткого виведення, до яких входять фазифікація, агрегування, активізація, акумуляція, дефазифікація.

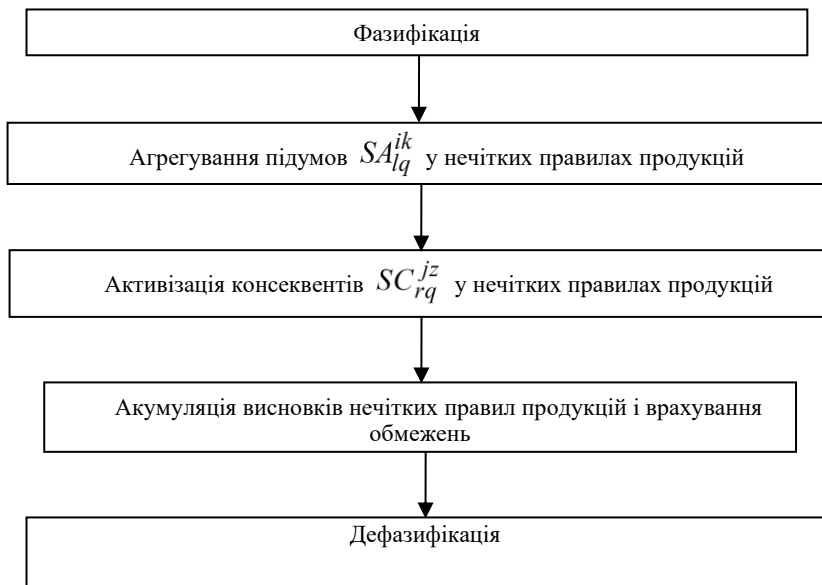


Рис. 6. Етапи реалізації методу нечіткого управління з обмеженнями

Процедура фазифікації полягає в розрахунку ступенів істинності W_{lq} нечітких висловлювань SA_{lq}^{ik} антецедентів правил на основі значень функцій належності відповідних термів вхідних лінгвістичних змінних для заданого набору значень вхідних змінних \bar{x}_i^0 :

$$W_{lq} = \mu_{ik}^{\alpha}(\bar{x}_i^0). \quad (10)$$

На етапі агрегування відбувається визначення істинності антецедентів W_q кожного правила R_q бази знань нечіткої моделі, для чого використовується один з варіантів t-норми. Наприклад, агрегування може відбуватися за формулою:

$$W_q = \min_l W_{lq}.$$

На етапі активізації відбувається обмеження значення функції належності кожного з нечітких висловлювань, що входять до консеквентів правил бази знань, за допомогою одного з класичних способів, серед яких популярністю користуються *min*-активізація, *prod*-активізація чи *average*-активізація. Наприклад, при використанні *min*-активізації розрахунки відбуваються за формулою:

$$\mu_{rq}^{jz}(\bar{u}_j) = \min\{W_q \cdot F_q, \mu_{jz}^{\beta}(\bar{u}_j)\},$$

де $\mu_{rq}^{jz}(\bar{u}_j)$ – функція належності терму $t\beta_{jz}$ вихідної змінної β_j у нечіткому висловлюванні SC_{rq}^{jz} .

На етапі акумуляції відбувається об'єднання функцій належності нечітких висловлювань консеквентів, а також враховуються обмеження на керуючі змінні для отримання функції належності кожної вихідної лінгвістичної змінної β_j . Об'єднання функцій належності виконується з застосуванням одного з варіантів *s*-норми, а перетин реалізується за одним з варіантів *t*-норми.

Формується функція належності вихідної лінгвістичної змінної β_j :

$$\mu_j^*(\bar{U}) = \left(\bigcup_{q=1}^p \bigcup_{r=1}^{M_q} \bigcup_{z=1}^{Z_j} \mu_{rq}^{jz}(\bar{u}_j) \right) \bigcap_{b=1}^{N^g} g_b(\bar{X}^0, \bar{U}),$$

де p – кількість правил, що входять до бази знань; z_j – кількість термів вихідної лінгвістичної змінної β_j ; N^g – кількість обмежень в задачі управління; \bar{X}^0 – значення вхідних змінних інформаційної системи.

Дефазифікація полягає в тому, щоб, використовуючи результати акумуляції всіх вхідних лінгвістичних змінних, отримати звичайне кількісне значення кожної з вхідних керуючих змінних. Для функцій належності багатьох аргументів формула дефазифікації ґрунтується на ідеї методу центру тяжіння:

$$u_k^o = \frac{\iint_V \dots \int u_k \cdot \mu_j^*(\bar{U}) dV}{\iint_V \dots \int \mu_j^*(\bar{U}) dV},$$

де u_k^o – значення керуючої змінної $u_k \in \bar{u}_j$; V – область можливих значень керуючих змінних \bar{U} .

Для дефазифікації за формулою (14) необхідно розв'язати задачу пошуку значення багатомірного інтегралу, як для розрахунку чисельника, так і для обчислення знаменника. З цією метою можна використати чисельні методи, наприклад, метод Монте-Карло. Оскільки функція належності дорівнює нулю в тих точках області V , 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 (14), тобто значення інтегралу:

$$\iint_V \dots \int \mu_j^*(\bar{U}) dV.$$

Для кожної керуючої змінної u_k будується відрізок $[a_k, A_k]$ шляхом проєціювання області V на вісь цієї змінної, такий що:

$$a_k \leq u_k \leq A_k.$$

Зробимо заміну змінних:

$$u_k = a_k + (A_k - a_k)\gamma_k, \quad k = \overline{1, m},$$

де змінна γ_k належить відрітку $[0, 1]$.

Для застосування методу Монте-Карло необхідно обрати m рівномірно розподілених на відрітку $[0, 1]$ послідовностей випадкових чисел:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{1s} \\ \gamma_{21}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{2s} \\ \dots \\ \gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \dots, \gamma_{ms} \end{bmatrix}.$$

Далі слід перейти в інтегралі (15) до нових змінних. Якобіан переходу має вигляд:

$$\begin{vmatrix} A_1 - a_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 - a_2 & \dots & 0 \\ & & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & A_m - a_m \end{vmatrix} = (A_1 - a_1)(A_2 - a_2) \cdot \dots \cdot (A_m - a_m).$$

Використовуючи знайдений Якобіан, на основі ідеї методу Монте-Карло отримано формулу для наближеного розрахунку інтегралу (15):

$$\iint_V \dots \int \mu_j^*(\bar{u}) dV \approx \frac{(A_1 - a_1) \cdot \dots \cdot (A_m - a_m)}{\delta} \sum_{\tau=1}^{\delta} \mu_j^*(a_1 + (A_1 - a_1)\gamma_{1\tau}, \dots, a_m + (A_m - a_m)\gamma_{m\tau}).$$

Формула для розрахунку значення чисельника в формулі (14) знаходиться аналогічно:

$$\begin{aligned} \iint_V \dots \int u_k \cdot \mu_z^*(\bar{u}_z) dV &\approx \frac{(A_1 - a_1) \cdot \dots \cdot (A_m - a_m)}{\delta} \times \\ &\times \sum_{\tau=1}^{\delta} (a_k + (A_k - a_k)\gamma_{k\tau}) \times \mu_j^*(a_1 + (A_1 - a_1)\gamma_{1\tau}, \dots, a_g + (A_m - a_m)\gamma_{m\tau}). \end{aligned}$$

Підставивши вирази (17) і (18) у формулу (14), та виконавши нескладні перетворення, отримано формулу дефазифікації на основі методу Монте-Карло для функцій належності багатьох аргументів:

$$u_k^o = \frac{\sum_{\tau=1}^{\delta} (a_k + (A_k - a_k)\gamma_{k\tau}) \times \mu_j^*(a_1 + (A_1 - a_1)\gamma_{1\tau}, \dots, a_m + (A_m - a_m)\gamma_{m\tau})}{\sum_{\tau=1}^{\delta} \mu_j^*(a_1 + (A_1 - a_1)\gamma_{1\tau}, \dots, a_m + (A_m - a_m)\gamma_{m\tau})}.$$

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

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

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

Оскільки виконання етапів нечіткого виведення для методу автоматизації управління з використанням функцій належності

багатьох аргументів передбачає складні обчислювальні процедури, був розроблений метод логічного виведення на основі формування та обходу графу питальника [13]. Теорія питальників застосовується у таких областях діяльності людини, де зустрічаються завдання, рішення яких можна і доцільно шукати у вигляді деякого графа спеціального виду, і тим самим розглядати ці завдання з деякою спільної точки зору. Як приклади подібних завдань можна навести відшукування слів в машинному словнику, перевірку об'єктів контролю, технічної діагностики і т.п. [14]. Проведене дослідження показало можливість реалізації логічного виведення на основі теорії питальників для бази продукційних правил. Розроблений метод містить побудову питальника для бази нечітких продукційних правил та процедури нечіткого виведення на основі графу питальника.

Побудова питальника для бази нечітких продукцій передбачає формалізацію структури правил, опис базових складових питальника, встановлення відповідності структури правил та основних складових питальника, процедуру формування питальника на основі базових даних.

Нехай $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_m$ – вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі, β – вихідна лінгвістична змінна. Для кожної лінгвістичної змінної α_i визначено множину термів $\{s_{ij}\}$. Аналогічно для лінгвістичної змінної β задана множина термів $\{d_j\}$.

Структуру бази нечітких продукційних правил представимо у вигляді:

- 1) ЯКЩО $\alpha_1=s_{11}$ та $\alpha_2=s_{12}$ та... $\alpha_m=s_{1m}$ ТО $\beta=d_1$ (вага p_1);
- 2) ЯКЩО $\alpha_1=s_{21}$ та $\alpha_2=s_{22}$ та... $\alpha_m=s_{2m}$ ТО $\beta=d_2$ (вага p_2);

...

- n) ЯКЩО $\alpha_1=s_{n1}$ та $\alpha_2=s_{n2}$ та... $\alpha_m=s_{nm}$ ТО $\beta=d_n$ (вага p_n).

Вважається, що у системі (20) в антецедентах правил в загальному випадку може бути різна кількість складових, бо різні вхідні лінгвістичні змінні можуть мати різну кількість термів. У випадку, коли модель має кілька вихідних змінних, правила нечітких продукцій розбиваються на блоки виду (20). Для системи правил розглянемо відповідні структури питальника.

У загальному випадку питальник визначає кінцеву множину Y , що складається з N елементів y_j , що називаються подіями. Кожній події $y_j \in Y$ поставлена у відповідність вагова функція $\omega(y_j)$, яка характеризує частоту даної події. Також визначена множина питань T з заданою кількістю відповідей $a(t_i)$ на кожне питання t_i .

Число елементів у множині T дорівнює R . Елементи t_i множини T називаються питаннями. Як правило, кожному питанню $t_i \in T$ поставлена у відповідність позитивна вагова функція $c(t_i)$, яка називається вартістю питання. Опис розвитку множини подій U питаннями з T на підмножини прийнято проводити за допомогою анкети. Анкета являє собою матрицю A розмірності $R \times N$, елементи якої Z_{ij} визначають відповіді на питання t_i для події y_j . Сукупність питань T і послідовності, в яких задаються ці питання для повної ідентифікації кожної з N подій множини U , утворюють питальник для U . Для одних і тих же множин T і U можуть бути побудовані питальники, що відрізняються як послідовністю постановки, так і множинами поставлених питань. Тому теорія питальників пропонує методи побудови оптимальних (в деякому сенсі) питальників [14].

На підставі аналізу структури бази нечітких продукційних правил та базових складових питальника можна зробити висновок про їх значну схожість. Кожному питанню $t_i \in T$ поставимо у відповідність вхідну лінгвістичну змінну α_i , а кожній події y_j – терм d_j вихідної лінгвістичної змінної β . У якості відповідей на питання Z_{ij} можуть бути використані терми s_{ij} вхідних лінгвістичних змінних. Однак вагові коефіцієнти p_j нечітких продукційних правил у загальному випадку не можуть розглядатися як значення вагових функцій подій $\omega(y_j)$, тому що вони мають зовсім різний сенс. Ваговий коефіцієнт характеризує впевненість експерта у вірності правила, а вагова функція події позначає її частоту. Тому значення вагової функції покладемо рівними $1/|d_j|$. Значення функції вартості $c(t_i)$ приймемо рівними 1 для всіх питань. Таким чином, оскільки кількість термів у вхідних лінгвістичних змінних не є однаковою, відповідний питальник є неоднорідним з однаковою ціною питання.

Спираючись на встановлену відповідність між компонентами питальника та нечітких продукцій, процедура формування питальника для бази нечітких продукційних правил містить етапи:

- формування анкети питальника;
- побудова питальника одним з методів теорії питальників.

Формування анкети питальника для бази продукційних правил є, як показано вище, тривіальною задачею. У випадку відсутності для вхідної лінгвістичної змінної відповідного значення терму через їх неоднакову кількість для різних змінних,

значення відповідного елемента матриці анкети питальника вважається рівним \emptyset .

Побудова питальника полягає у формуванні навантаженого орієнтованого графа $G(X, \Gamma)$ з однією кореневою вершиною, такого що:

$$\begin{aligned} X: \{x \in (T \cup Y)\}; \\ x = y \in Y \Rightarrow |\Gamma y| = \emptyset; \\ x = t \in T \Rightarrow |\Gamma t| = a(t); \\ T \cap Y = \emptyset. \end{aligned}$$

У якості критерію формування графа питальника використовується мінімальна довжина його обходу. Побудова оптимального питальника може бути виконана з застосуванням динамічного програмування або алгоритму Пікара.

На основі побудованого для кожної лінгвістичної змінної графа питальника формуються процедури нечіткого логічного виведення.

Етапи нечіткого логічного виведення на основі питальника представлено на рисунку 7.

Для проведення обходу графа питальника будемо використовувати принцип пошуку в глибину. Позначимо через Q_j^g підмножину вершин питань T графа питальника, які утворюють шлях g від кореневої вершини до вершини події y_j . Відповідну множину дуг, які поєднують вершини Q_j^g , позначимо V_j^g .



Рис. 7. Етапи нечіткого логічного виведення на основі питальника

Розрахунок показника належності W_j^g шляху g для кожної вершини події u_j на основі значень вхідних змінних здійснюється за формулою:

$$W_j^g = \bigcap_{v \in V_j^g, v \neq \emptyset} \mu_{ik}, \quad (21)$$

де μ_{ij} – значення для заданих величин вхідних змінних блоку нечіткого управління функції належності терму s_{ik} вхідної лінгвістичної змінної α_i , що відповідає вершині, з якої виходить дуга v .

Операція перетину реалізується одним з варіантів t-норми.

Акумуляція функцій належності термів вихідної лінгвістичної змінної β відбувається за формулою:

$$\mu(u) = \bigcup_{y_j, g} (W_j^g \cap p_j \cap \mu_j(u)).$$

Операція об'єднання реалізується за одним з варіантів s-норми.

При наявності обмежень на керуючі змінні, представлені у вигляді функцій належності багатьох аргументів, вони можуть бути додані у формулу (22) аналогічно формулі (13).

Для отримання звичайних значень вихідних змінних u блоку управління може бути використано один з методів дефазифікації.

3. Методика побудови інформаційних технологій для автоматизації нечіткого управління

З метою практичної реалізації методів, розроблених у розділах 1 та 2, виконано розробку основних етапів методики побудови інформаційних технологій для автоматизації нечіткого управління, представлено узагальнену структуру інформаційної технології для реалізації нечіткого управління з використанням функцій належності багатьох аргументів, її баз даних та знань, розроблені алгоритми нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів.

Узагальнені етапи методики побудови інформаційних технологій для автоматизації нечіткого управління представлено на рисунку 8.



Рис. 8. Етапи розробки інформаційної технології нечіткого управління

Концептуальне моделювання предметної області задачі нечіткого управління, завдання функцій належності термів лінгвістичних змінних та наявних обмежень задачі здійснюється на основі методів, представлених у першому розділі роботи. Використовуючи концептуальну модель, за участі експертів предметної області формуються нечіткі продукційні правила, які описують процес керування, та вносяться до бази знань. На основі розроблених у другому розділі роботи методів нечіткого управління відбувається розробка програмного забезпечення, тестування та впровадження інформаційної технології.

Узагальнена структура інформаційної технології нечіткого управління наведена на рисунку 9.

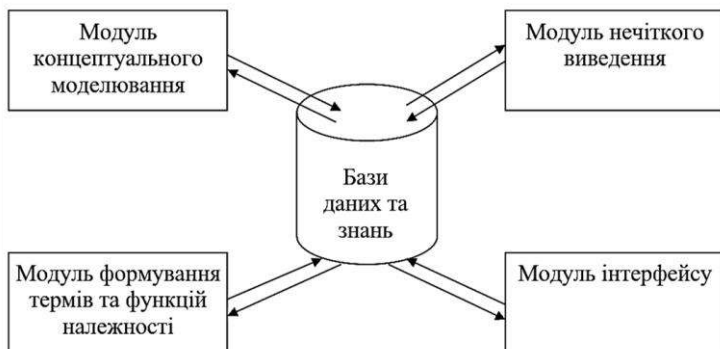


Рис. 9. Узагальнена структура інформаційної технології нечіткого управління

Як видно з рисунку 9, інформаційна технологія містить бази даних та знань, модуль концептуального моделювання, модуль формування термів лінгвістичних змінних та їх функцій належності, модуль нечіткого логічного виведення та модуль інтерфейсу.

Модуль концептуального моделювання забезпечує розробку моделей предметної області задачі нечіткого управління на основі методу, представленого у першому розділі роботи. Модуль формування термів лінгвістичних змінних та їх функції належності допомагає експертам визначити відповідні елементи нечіткої моделі за допомогою розробленого у роботі методу. Модуль нечіткого виведення виконує розрахунки на основі наведених у другому розділі роботи методів нечіткого управління. Модуль інтерфейсу забезпечує взаємодію інформаційної технології з об'єктом керування та користувачами.

Бази даних та знань інформаційної технології містять інформацію щодо діяльності об'єкта керування, нечіткої моделі, прийнятих рішень. Для представлення в інформаційній технології даних щодо змінних задачі та правил бази знань розроблено відповідні структури даних, представлені на рисунку 10.

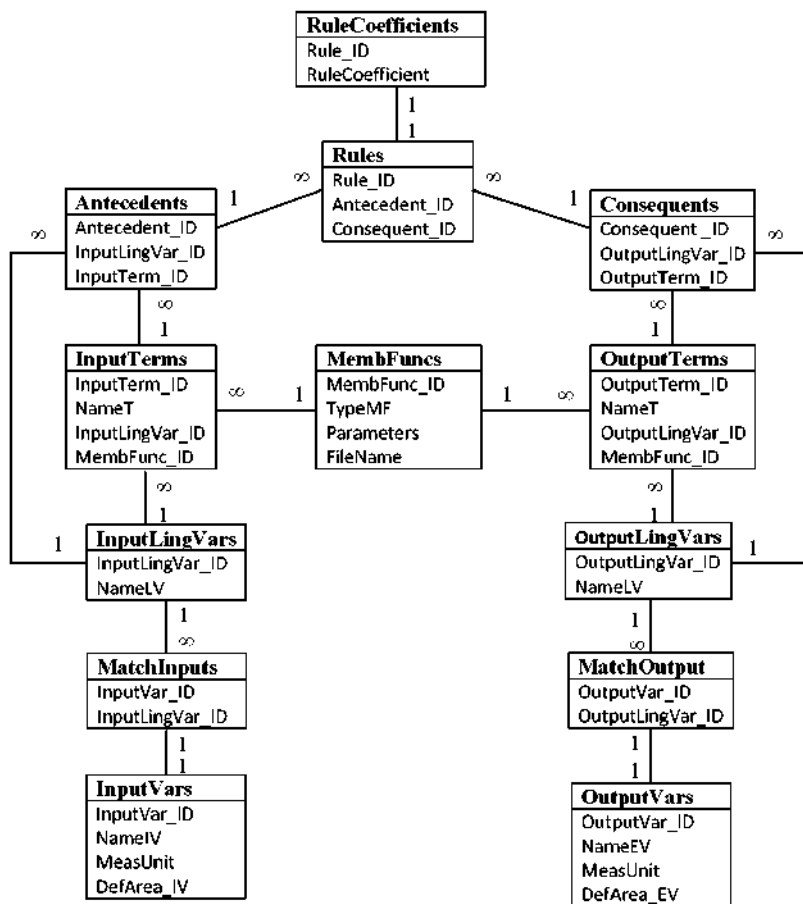


Рис. 10. Модель структури даних нечітких продукцій інформаційної технології

Як видно з рисунку 10, до структур даних інформаційної технології для формалізації бази нечітких продукцій виду (5) включені таблиці правил Rules та їх вагових коефіцієнтів RuleCoefficients [15]. Правило може містити кілька антецедентів або консеквентів, в цьому випадку в таблиці Rules формується кілька рядків з однаковим значенням ключа Rule_ID. Вважається,

що в одному правилі частини антецедента та консеквента пов'язані між собою тільки операцією перетину.

Для збереження даних щодо антецедентів та консеквентів сформовано відповідні таблиці Antecedents та Consequents. Їх структура в цілому схожа і відповідає вимогам формул (6) та (7). Ці таблиці пов'язані з таблицями термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних InputTerms та OutputTerms відповідно. До структури таблиць термів InputTerms та OutputTerms включені код терму та його назва, а також посилання на відповідну лінгвістичну змінну і зв'язок з функцією належності терму. Основою вирішення задачі нечіткого управління певним об'єктом є формування функцій належності, які необхідно визначити для термів лінгвістичних змінних, наведених у концептуальній моделі. Інформаційна технологія має забезпечувати можливість побудови та корекції концептуальної моделі і дозволяти зберігати та оброблювати дані щодо функцій належності термів і обмежень задачі. Таблиця функцій належностей MembFuncs містить код функції, її тип (для аналітично заданих стандартних функцій) та масив значень параметрів. Якщо вид функції належності нестандартний, то може бути вказано ім'я файлу, в якому знаходиться програмний код для розрахунку її значень. Розрахунок значень функцій належності ґрунтується на зв'язку лінгвістичних змінних з вхідними та вихідними змінними, який задається за допомогою таблиць MatchInputs та MatchOutput. Розроблена модель структури даних враховує особливості використання функцій належностей багатьох аргументів.

Для програмної реалізації інформаційної технології на основі методів, наведених у розділах 1 та 2, розроблено набір алгоритмів.

До основних алгоритмів інформаційної технології відносяться:

- алгоритм переробки інформації для формування функцій належності багатьох аргументів;
- алгоритм автоматизації нечіткого управління для задач з обмеженнями;
- алгоритм нечіткого виведення на основі побудови та обходу графа питальника.

У якості прикладу на рисунку 11 наведено алгоритм розрахунку ступенів належності антецедентів нечітких продукційних правил.

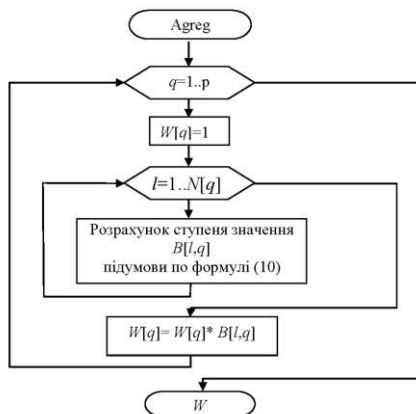


Рис. 11. Алгоритм розрахунку ступенів належності антецедентів правил

Як видно на рисунку 11, для реалізації нечіткої кон'юнкції підумов антецедентів правил в алгоритмі використано формулу (10). При необхідності наведений алгоритм може бути легко модифікований для використання інших способів розрахунку нечіткої кон'юнкції.

Алгоритм дефазифікації акумульованих функцій належності наведено на рисунку 12.

Як видно на рисунку 12, на початку роботи алгоритму визначаються коефіцієнти масштабування відрізка значень керуючої змінної на відрізок $[0,1]$. Далі, виходячи з вимог до точності розрахунків, встановлюється обсяг вибірки по всім керуючим змінним випадкових чисел, рівномірно розподілених на відріжку $[0,1]$. Після цього відбувається генерація масиву цих чисел. Потім у циклі відповідно розраховуються значення керуючих змінних, результати розрахунку заносяться до бази даних інформаційної технології. В алгоритмі використовується акумульована функція належності $\mu_j()$, розрахунок якої представлено у вигляді алгоритму на рисунку 13.

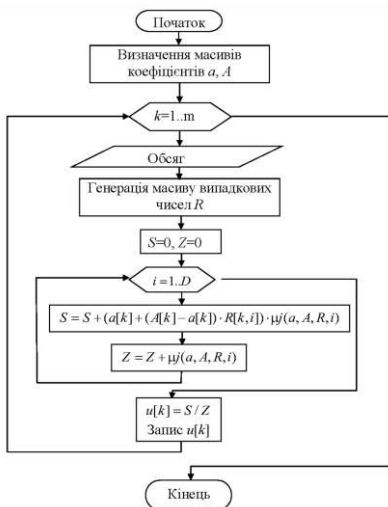


Рис. 12. Алгоритм дефазифікації акумульованих функцій належності

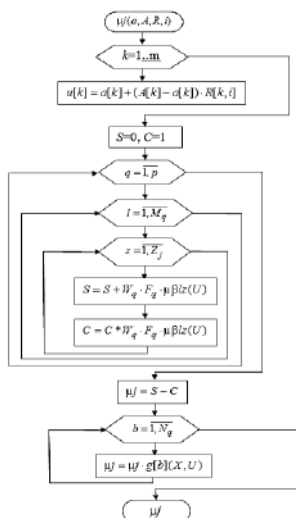


Рис. 13. Алгоритм розрахунку акумульованих функцій належності

Як видно на рисунку 13, на початку алгоритму відбувається розрахунок значень керуючих змінних відповідно до заданих значень аргументів функції.

Далі відбуваються обчислення за формулою акумуляції. Для реалізації нечіткої операції об'єднання використана формула ймовірнісного об'єднання з метою забезпечення неперервності підінтегральної функції. В формулі акумуляції зразу враховуються значення ступенів належності антецедентів, розраховані за допомогою алгоритму, наведеного на рисунку 11.

Крім того, відповідно до формули активізації методу нечіткого управління, використані значення вагових коефіцієнтів нечітких продукційних правил бази знань інформаційної технології.

Для акумульованого значення функції належності керуючої змінної застосовуються наявні в задачі управління нелінійні обмеження, представлені у вигляді масиву функцій належності багатьох аргументів. Реалізація операції нечіткого перетину здійсненна у вигляді добутку операндів. Отримане значення функції належності передається у алгоритм дефазифікації, який викликав цей розрахунок.

Запропоновані алгоритми можуть бути використані при створенні програмного забезпечення для автоматизації нечіткого управління.

Висновки

Розроблено методологічні основи побудови інформаційних технологій для підвищення якості функціонування об'єктів зі складною структурою шляхом автоматизації обробки інформації і управління на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів.

Враховуючи недостатній рівень розвитку існуючих підходів для опису задач нечіткого управління при розробці інформаційних технологій було розроблено метод концептуального моделювання, що враховує специфіку нечіткого управління з використанням функцій належності багатьох аргументів. Застосування розроблених засобів концептуального моделювання дозволило представити у графічному вигляді основні складові задачі нечіткого управління, структуру лінгвістичних змінних та зв'язки між ними, необхідні для формування нечітких продукційних правил бази знань та

визначення функцій належності при побудові інформаційних технологій.

Виконано формалізацію узагальненої моделі задачі нечіткого управління при наявності обмежень на значення керуючих змінних. На основі цієї моделі розроблено метод автоматизації управління на принципах нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів, застосування якого дозволяє враховувати взаємозв'язок керуючих змінних і зменшити кількість правил нечітких продукцій в базі знань в порівнянні з відомими методами. Розробка методу дає можливість розширити перелік завдань управління, виконання яких можливо автоматизувати на основі інформаційних технологій з використанням нечіткої логіки.

Сформовано узагальнену методику розробки інформаційних технологій для автоматизації управління складними системами на основі нечіткої логіки з використанням функцій належності багатьох аргументів. Представлена узагальнена структура інформаційної технології нечіткого управління, яка завдяки модульності та гнучкості налаштування може бути застосована для широкого кола задач. Для реалізації всіх етапів нечіткого виведення розроблені відповідні алгоритми, які можуть бути використані при створенні програмного забезпечення для автоматизації виконання завдань управління складними системами.

Література:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965. Vol. 8. PP. 338–353.
2. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. К., 2010. 344 с.
3. Буч Г., Рамбо Д., Якобсон И. Краткая история UML. Язык UML. Руководство пользователя The Unified Modeling Language User Guide. М., 2006. 496 с.
4. Han D., Yang Q., Xing J. Extending UML for the modeling of fuzzy self-adaptive software systems. The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). 2014. P. 2400-2406.
5. X. Zhang, Q. Yang, J. Xing, D. Han and Y. Chen. A Similarity-Based Approach to Recognizing Voice-Based Task Goals in Self-Adaptive Systems. IEEE 41st Annual Computer Software and Applications

Conference (COMPSAC). Turin. 2017. pp. 536-542. DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.35.

6. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М., 2007. 288 с.

7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб., 2005. 736 с.

8. M. Zeinali, "Multi-layer fuzzy system modeling a new approach: Theory and application," International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY). Pingtung. 2017. pp. 1-6. DOI: 10.1109/iFUZZY.2017.8311811.

9. Shushura O. M. Infological modeling of information systems subject industries in solving of fuzzy control tasks. *Зв'язок*. 2018. № 2. С. 53-56.

10. Shtovba S., Pankevich O., Nagorna A. Analyzing the criteria for fuzzy classifier learning. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2015. Vol. 49. № 3. P. 123-132.

11. Штовба С.Д. Побудова функції належності нечітких множин за кластеризацією експериментальних даних. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2006. № 2. С. 92-95.

12. Oleksii Shushura, Liudmyla Asieieva, Iryna Husyeva, Mykhailo Stepanov, Oksana Datsiuk. "Construction of Membership Functions in Fuzzy Modeling Tasks Using the Analytic Hierarchy Process". *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. Volume 9, № 3, May – June 2020/ p. 2702-2707. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/33932020>.

13. Шушура О. М. Нечітке логічне виведення на основі теорії питальників. *Штучний інтелект*. 2018. № 1. С. 56-61.

14. Аржененко А.Ю., Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. М., 1989. 128 с.

15. Шушура О. М. Структури даних інформаційної технології нечіткого управління на основі функцій належності багатьох аргументів. *Зв'язок*. 2018. № 1. С. 21-24.