

О. Ю. Заковоротний, Т. О. Орлова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ДРУГОГО ТИПУ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ ШВИДКОСТІ

**Анотація.** Інтервальні нечіткі множини другого типу використовуються при проектуванні нечітких систем, пов'язаних з керуванням швидкістю в умовах невизначеності. У статті розглядається можливість використання інтервальних нечітких множин другого типу для опису змінних, що можуть бути різними значеннями однієї і тієї ж динамічної системи або змінами технічних параметрів, що відбуваються під впливом зовнішніх факторів. Також представлено складні інтервальні нечіткі множини другого типу та наведено приклади їх використання для зменшення кількості нечітких множин та правил у нечіткій базі знань. Також наведено необхідні умови для побудови складних інтервальних нечітких множин другого типу та методи визначення нижньої та верхньої функцій належності в них. Слід невизначеності для складної інтервальної нечіткої множини другого типу представлено верхніми та нижніми функціями належності різних нечітких множин. Всі методи, описані в роботі, можуть бути використані при проектуванні систем підтримки прийняття рішень, для вибору оптимальних параметрів нелінійної системи або при проектуванні нечітких регуляторів швидкості.

**Ключові слова:** інтервальна нечітка множина другого типу; нечіткі системи; керування швидкістю; система підтримки прийняття рішень; нечіткі регулятори.

### Вступ

Нечітка логіка широко застосовується для розв'язання задач, з якими стикаються дослідники в різних галузях, таких як прогнозування часових рядів [1], прийняття рішень [2], автоматизоване управління [3, 4], розпізнавання об'єктів [5] та інших задач [6]. Розглянемо застосування інтервальних нечітких множин другого типу в проектуванні регулятора швидкості та дамо визначення предмету дослідження. Регулятори швидкості використовуються для контролю або регулювання швидкості руху системи або процесу. Існують різні типи регуляторів, включаючи пропорційно-інтегрально-диференціальні (PID) регулятори, адаптивні регулятори, нечіткі регулятори та інші. Регулятори швидкості працюють на основі зворотного зв'язку, де вимірювальні сигнали порівнюються зі заданими значеннями і видаються керуючі сигнали для підтримання встановленої швидкості. Регулятори швидкості використовуються в широкому спектрі технічних систем, включаючи робототехніку, автомобільну промисловість, електроенергетику, авіаційну та космічну техніку, виробництво і багато інших галузей. Деякі з викликів, пов'язаних з регуляторами швидкості, включають точність регулювання, стабільність системи, компенсацію збурень та невизначеностей, а також врахування динамічних властивостей об'єктів керування.

**Метою роботи** є розгляд властивостей інтервальних нечітких множин другого типу для опису невизначеностей з якими працюють системи підтримки прийняття рішень під час пошуку оптимальних параметрів керування. Оцінка площі невизначеності в інтервальних нечітких множинах другого типу через визначення нижньої та верхньої функцій належності різних видів. Проектування інтервальних нечітких множин другого типу, що враховують різні форми невизначеності.

### Огляд існуючих методів проектування регуляторів швидкості

При проектуванні регуляторів можуть бути прийняті до уваги такі наступні класичні види регу-

ляторів, як: PID-регулятори, адаптивні алгоритми, системи на основі штучних нейронних мереж та інші. Розглянемо деякі з них.

**PID-регулятори** є одними з найпоширеніших та найбільш використовуваних методів в системах автоматичного керування. Основною ідеєю PID-регулятора є керування величиною виходу системи, так щоб вона досягла заданого значення. Вони використовуються для стабілізації, регулювання та керування системами зворотного зв'язку, але мають деякі недоліки: надчутливість до параметрів (неадекватні значення параметрів можуть призвести до нестабільності або недосяжності цільового значення); затримка реакції (можуть бути повільними у реакції на зміни в системі, особливо коли інтегральний (I) та диференціальний (D) компоненти недостатньо налаштовані); чутливість до збурень та шуму в системі; непрактичність у складних системах або велику кількість невідомих параметрів.

**Адаптивні алгоритми** - це методи управління, які можуть автоматично змінювати свої параметри та структуру з метою адаптації до змін у середовищі або об'єкті керування. До переваг адаптивних алгоритмів відноситься: автоматична адаптація (гнучкість до умов), стійкість до змін, широкий спектр застосувань; можливість врахування невизначеності та забезпечення стійкості до неї; швидка реакція на зміни. Ці алгоритми попри досить високу ефективність також мають свої недоліки: складність налаштування через складну систему або велику кількість параметрів; деякі алгоритми вимагають значних обчислювальних ресурсів; потреба у великій кількості даних для ефективного навчання; нестійкість до шуму; складність інтерпретування результатів, які базуються на складних математичних моделях.

**Системи на основі штучних нейронних мереж** (ШНМ) моделюють структуру та функції нервової системи людини за допомогою комп'ютерного програмування [7]. До переваг цих систем відноситься: ШНМ моделюють біологічні нейронні мережі із взаємопов'язаних штучних нейронів, які обробляють інформацію за аналогією з реальними нейронами мережі

людини; ШНМ можуть навчатися з вчителем (коли є наявні вхідні та вихідні дані для навчання) або без вчителя (коли навчання відбувається без прямого використання вхідно-вихідних пар даних), ШНМ можуть бути використані для різних завдань, включаючи розпізнавання образів, прогнозування, класифікацію, оптимізацію та управління системами; ШНМ виявляють високу стійкість до шуму в даних та здатність адаптуватися до змін у вхідних параметрах. Однак є і недоліки: іноді складно інтерпретувати рішення, прийняті нейронною мережею, через її складну структуру та процеси внутрішньої обробки інформації; деякі типи нейронних мереж можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів та часу для навчання; ШНМ можуть вимагати великої кількості даних для навчання, особливо для складних завдань, а недостатність даних може призвести до недооцінки або неправильного навчання моделі; мережі можуть страждати від перенавчання, коли модель надмірно адаптується до конкретних тренувальних даних і втрачає здатність узагальнення до нових даних.

**Нечіткі множини другого типу (НМТ2)** (які є вдосконаленням традиційних нечітких множин типу 1) – дозволяють моделювати та обробляти невизначеності більш ефективно завдяки двошаровій структурі, яка включає як первинні, так і вторинні функції належності. Це розширення дозволяє враховувати не лише основні невизначеності, але й варіативність цих невизначеностей. Нечіткі множини другого типу є розширенням звичайних нечітких множин, які дозволяють враховувати більшу невизначеність та неоднорідність у даних. Вони включають в себе не тільки нечіткість в межах значень, але й нечіткість в самій формі функцій належності. Нечіткі множини другого типу можуть бути корисним інструментом у проектуванні регуляторів швидкості, оскільки вони дозволяють враховувати та управляти складністю та невизначеністю в системах керування. Вони можуть забезпечити більш точне та стабільне керування, особливо в умовах зміни середовища або об'єктів керування. Використання нечітких множин другого типу може покращити якість регулювання, зменшити вплив збурень та невизначеностей, а також забезпечити більш гнучке та адаптивне керування в різних умовах роботи систем. Хоча нечіткі множини використовуються для опису та обробки нечітких даних, нечіткі множини типу 1 (НМТ1) мають функції належності (ФН), які є чіткими числами. Недоцільно використовувати чіткі функції для опису невизначеності та ненадійності даних [8]. У 1975 році Заде представив нечіткі множини другого типу як розширення звичайних ФН, які зараз відомі як функції належності нечітких множин типу 1 [9].

### Невизначеності в нечітких системах другого типу

Інтраневизначеність та інтерневизначеність, як поняття невизначеностей різного типу при побудові функцій належності в нечітких системах розглядаються у роботі [10]. Інтраневизначеність виникає у суб'єкта або експерта через брак інформації про об'єкт дослідження чи неоднозначну інтерпретацію певного слова (лінгвістичної змінної). Виникає інтерневизна-

ченість в результаті різних оцінок від різних експертів термів лінгвістичної змінної. Описана інтраневизначеність може бути як інтервальні нечіткі множини другого типу (ІНМТ2), тоді як інтерневизначеність – через об'єднання різних ІНМТ2. При розробці систем нечіткого регулювання невизначеності можуть виникати не лише під час опису лінгвістичних змінних, але й у процесі функціонування комп'ютерної системи та об'єкта керування. Підстави, при яких можуть виникнути невизначеності різного типу наведено на рис. 1.



Рис. 1. Невизначеності при створенні систем нечіткого логічного виведення другого типу

Перш ніж розробляти системи нечіткого виводу другого типу, рекомендується перевірити на наявність статистичних невизначеностей вхідні дані. Це має значення для врахування нестандартних ситуацій, що стосуються ефективності компонентів комп'ютерної системи. При наявності набору даних, без статистичних невизначеностей або якщо відомі причини їх виникнення, можна створювати нечіткі множини другого типу. На рис. 1 показано як, при оцінці термів лінгвістичної змінної експертами, виникають невизначеності. Коли визначена модель однією оцінкою ( $n = 1$ ), це спричиняє виникнення інтраневизначеності, і для її вирішення ми користуємось ІНМТ2. У цьому дослідженні оцінка однієї групи експертів ( $k = 1$ ) також вважається інтраневизначеністю, оскільки рішення їхні повинні узгоджуватись. Крім того, ця оцінка може бути представлена як інтерневизначеність завдяки об'єднанню кожної окремої оцінки. Виконується, як правило, при  $k = n = 1$  умова:

$$FOU(k) \geq FOU(n), \quad (1)$$

де  $FOU(k)$  (footprint of uncertainty) – площа невизначеності для оцінки групою експертів,  $FOU(n)$  – площа невизначеності для оцінки одного експерта.

Оцінки експертів щодо конкретного терміну, незалежно від причин виникнення невизначеностей, можуть змінюватися після ряду досліджень. Ці зміни можуть охоплювати збільшення кількості експериментів, коригування технічних параметрів об'єкта керування, уточнення впливу зовнішнього середовища і перевірку надійності компонентів комп'ютерної системи. Після збору оновлених даних внаслідок експериментів, варто

перевірити параметри та види функції належності другого типу, а також кількість термів для кожної лінгвістичної змінної. Для поліпшення системи нечіткого виводу корисним може бути моделювання нових лінгвістичних змінних, особливо при визначенні нових факторів зовнішнього середовища. Не слід проектувати нечіткі системи другого типу, якщо вхідні дані містять взаємозалежні параметри різних компонентів комп'ютерної системи, особливо коли цей зв'язок не досліджений і залежить від зовнішніх факторів. Це може збільшити похибку при перетворенні типів функцій належності на виході нечіткої системи.

### Інтервальні нечіткі множини другого типу

У роботі [10] визначенні нечіткі множини другого типу, основні операції над ними та зазначено, що при проектуванні нечітких систем другого типу може бути використано математичний апарат нечітких множин типу-1. Нечітка множина другого типу ( $\tilde{A}$ ) на універсальній множині  $X$  визначена функцією належності другого типу –  $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ , де  $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$  [11]:

$$\tilde{A} = \{(x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1]\}, \quad (2)$$

де  $J_x$  – первинна належність  $x$ . Об'єднання значень належностей для всіх допустимих значень  $x$  і  $u$  може бути іншим способом до визначення нечітких множин другого типу:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u), \quad J_x \subseteq [0,1]. \quad (3)$$

Через високу обчислювальну складність роботи з нечіткими множинами, при розробці систем нечіткого регулювання застосовуються інтервальні нечіткі множини другого типу.

ІНМТ2 є нечіткою множиною, де виконується умова – для всіх  $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$ . Отже ІНМТ2 є підмножиною нечітких множин другого типу та визначається наступним чином [12]:

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1 / (x, u), \quad J_x \subseteq [0,1]. \quad (4)$$

Для визначення інтервальних нечітких множин другого типу достатньо визначити область невизначеності ( $FOU$ ), що описується через дві функції належності типу-1: нижньої ( $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ ) та верхньої ( $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ ), між якими виконується нерівність:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) \leq \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x), \quad \forall x \in X. \quad (5)$$

Однією з основних задач при проектуванні систем нечіткого логічного виведення є визначення розміру області невизначеності ( $FOU$ ), адже її збільшення впливає на точність моделі та збільшує час обчислень у комп'ютерній системі. Іншою важливою задачею є вибір типів функцій належності. На сьогодні, у розробці систем нечіткого логічного виведення найбільш застосовуваними функціями належності другого типу є гаусівська (gaussmf), трикутна (trimf), трапецієподібна (trapezmf) та дзвоноподібна (gbellmf). На рис. 2 наведені приклади цих функцій належності другого типу. У [13] використані для моделювання невизначеності нестандартні функції належності другого типу.

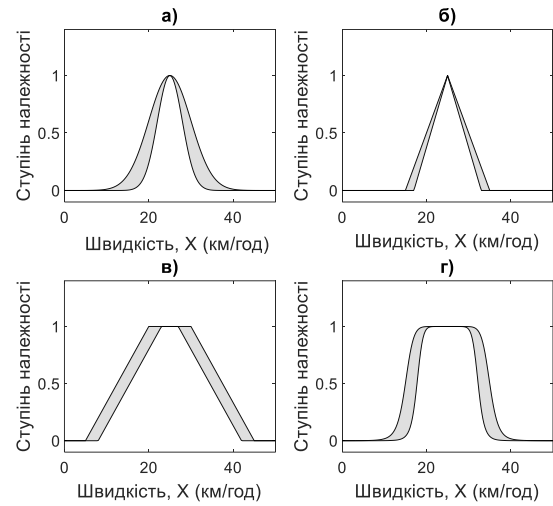


Рис. 2. Функції належності типу-2: а – гаусова (gaussmf); б – трикутна (trimf); в – трапецієподібна (trapezmf); г – дзвоноподібна (gbellmf)

Рекомендується при розробці систем нечіткого регулювання використовувати функції належності з мінімальною кількістю параметрів і тому, для побудови функцій належності другого типу використовується гаусова функція належності типу-1:

$$\mu_A(x_{m,\sigma}) = \exp\left[-0.5 \cdot \left(\frac{(x-m)}{\sigma}\right)^2\right], \quad (6)$$

де  $\mu_A(x_{m,\sigma})$  – гаусова функція належності типу-1,  $\sigma$  – параметр відхилення (крутизна функції),  $m$  – центр нечіткої множини.

Проаналізуємо методи визначення нечітких множин другого типу для моделі інтраневизначеності, де маємо одного експерта ( $n = 1$ ).

Як вже зазначалося, для побудови нечітких множин другого типу достатньо визначити дві функції належності типу-1. У випадку гаусової функції належності існують три варіанти визначення нечітких множин другого типу з використанням таких функцій належності типу-1 [13]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = f(m_1, m_2, \sigma); \quad (7)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = f(m, \sigma_1, \sigma_2); \quad (8)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = f(m_1, m_2, \sigma_1, \sigma_2). \quad (9)$$

Хоча практично варіант (9) майже не використовують. Надалі, задається умова:  $\sigma_1 < \sigma_2$  для визначення нижньої та верхньої функції належності. З урахуванням нерівності (5) значення нижньої функції належності  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  для (8) описується як [13]:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = f(x, m, \sigma_1) = \exp\left[-0.5 \cdot \left(\frac{(x-m)}{\sigma_1}\right)^2\right]. \quad (10)$$

Матимемо для верхньої функції належності:

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = f(x, m, \sigma_2) = \exp\left[-0.5 \cdot \left(\frac{(x-m)}{\sigma_2}\right)^2\right]. \quad (11)$$

Ще можуть бути визначені нижня та верхня функції належності за допомогою коефіцієнта відхилення для значень  $\sigma = k_\sigma$ . Для коефіцієнта необхідна така умова:  $0 \leq k_\sigma < 1$ . Якщо  $k_\sigma = 0$ , то  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ .

Отже ми отримаємо функцію належності типу-1. У системі нечіткого регулювання коефіцієнт  $k_\sigma$  може використовуватися у трьох різних формах: для визначення нижньої функції належності; для визначення верхньої функції належності; для визначення нижньої та верхньої функцій належності. До того ж його значення напряму визначає розмір площі невизначеності. На рис. 3 показані площі невизначеності при різних значеннях коефіцієнта  $k_\sigma$ , що визначають значення для нижньої функції належності.

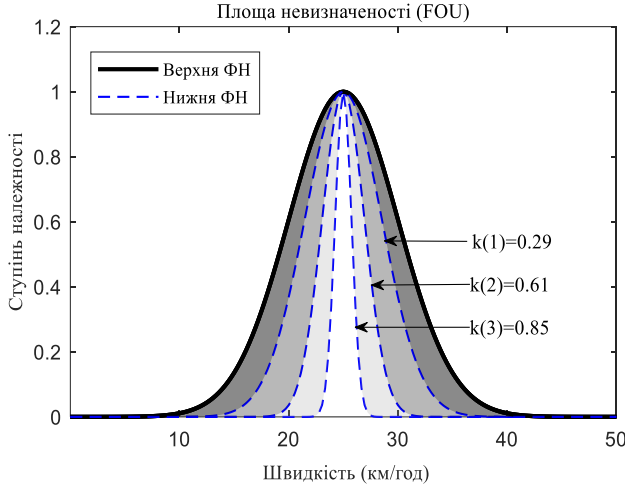


Рис. 3. Площі невизначеності для різних значень коефіцієнту відхилення  $k_\sigma$  ( $\sigma = 5$ ,  $m = 25$ )

Аналізуючи рис. 3, бачимо, що зростання значення  $k_\sigma$  спричиняє зростання розміру  $FOU$ . Враховуючи нерівність (1) для оцінки розміру  $FOU$ , матимемо таку нерівність для значень коефіцієнта  $k_\sigma$  для одного експерта ( $n = 1$ ) та 1 групи експертів ( $k = 1$ ):

$$k_\sigma(k) \geq k_\sigma(n). \quad (12)$$

Використовуючи коефіцієнт  $k_\sigma$  для визначення двох функцій належності отримаємо наступний вираз для нижньої функції належності  $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ :

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = f(x, m, \sigma, k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma - k_\sigma \cdot \sigma}\right)^2\right]. \quad (13)$$

Верхня функції належності  $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$  описується як:

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = f(x, m, \sigma, k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma + k_\sigma \cdot \sigma}\right)^2\right]. \quad (14)$$

При проектуванні системи нечіткого регулювання зміна коефіцієнту  $k_\sigma$  ймовірна після проведення експериментальних випробувань. Тобто, після повторних експериментів значення  $k_\sigma$  може зменшитися, а при врахуванні факторів зовнішнього середовища або збоїв роботи комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень, може збільшитися. Для визначення ІНМТ2 використовують декілька коефіцієнтів  $k_\sigma$  з окремою вагою з урахуванням оцінок між експертами в межах 1 групи.

## Інтерневизначеність в системах нечіткого логічного виведення

Методи, що застосовуються для визначення інтраневизначеностей при проектуванні ІНМТ2 в системах нечіткого регулювання, можуть також бути застосовані для оцінки інтерневизначеностей (кількість експертів  $n > 1$ , кількість груп експертів  $k > 1$ ). Однак існують особливості в визначенні параметрів ІНМТ2, у т.ч. функції (7-9) визначаються кількістю параметрів відповідної кількості експертів та груп. Отже отримаємо функції ( $n > 1$ ), що мають декілька параметрів для центру нечіткої множини та відхилення:

$$\mu_{\tilde{A}(n)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_n; \sigma); \quad (15)$$

$$\mu_{\tilde{A}(n)}(x) = f(m; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n); \quad (16)$$

$$\mu_{\tilde{A}(n)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_n; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n). \quad (17)$$

Для декількох груп експертів ( $k > 1$ ) матимемо:

$$\mu_{\tilde{A}(k)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_k; \sigma); \quad (18)$$

$$\mu_{\tilde{A}(k)}(x) = f(m; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k); \quad (19)$$

$$\mu_{\tilde{A}(k)}(x) = f(m_1, m_2, \dots, m_k; \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k). \quad (20)$$

Для опису нижньої  $\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x)$  та верхньої  $\bar{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x)$  функцій належності, потрібно визначити  $\sigma_{\min}$  та  $\sigma_{\max}$ , при фіксованому значенні  $m$  (19). У такому разі нижня функція належності виглядатиме так:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) = f(x, m, \sigma_{\min}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma_{\min}}\right)^2\right]. \quad (21)$$

Верхня функція належності описується з використанням максимального значення відхилення у гаусовій функції належності для випадку інтерневизначеності:

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) = f(x, m, \sigma_{\max}) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma_{\max}}\right)^2\right]. \quad (22)$$

Отримуємо множину  $\tilde{A}(n, k)$ , яка є складеною, тобто визначеною декількома функціями належності другого типу [13, 14]. У цьому випадку площа невизначеності описується двома функціями належності типу-1, які можуть підмножинами різних множин другого типу. Водночас  $FOU$  визначається незалежно від кількості експертних оцінок, які використовуються у задачі системи нечіткого логічного виведення.

$FOU$  для  $\tilde{A}(n, k)$  може виглядати таким чином:

$$FOU(\tilde{A}(n, k)) = \bigcup_{x \in X} \left[ \underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) \right]. \quad (23)$$

Проте ІНМТ2 може визначатись різними типами функцій належності, що ускладнює визначення нижньої, верхньої функцій належності, а також опис площі невизначеності. Коли немає функцій належності, де виконується умова:

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x) \leq \mu_{\tilde{A}(n,k)}(x') \leq \bar{\mu}_{\tilde{A}(n,k)}(x), \quad \forall x \in X, \quad (24)$$

де  $\mu_{\tilde{A}(n,k)}(x')$  – будь-яка функція належності, яка є підмножиною  $FOU$ , то площу невизначеності слід

описувати як об'єднання декількох *FOU*, у яких площі менші та виконується умова (24).

### Висновки

Невизначеності різних типів, які виникають при оцінюванні експертами параметрів регуляторів швидкості, мають вплив на типи і кількість функцій належності, а також на розміри *FOU*. Розглянуті характеристики функцій належності і методи визначення *FOU* для різних типів невизначеностей не є остаточними, оскільки є можливість зміни розмірів *FOU* (збільшення або зменшення) після проведення експериментів.

Необхідно використовувати коефіцієнти відхилення (регулювання) параметрів під час розробки комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень. Для інтраневизначеності коефіцієнт застосовується до параметрів функцій належності і необхідно досліджувати розміри *FOU*, оскільки збільшення площі

невизначеності погіршує точність роботи системи нечіткого регулювання. При інтерневизначеності *FOU* визначається декількома функціями належності другого типу і необхідно використовувати коефіцієнт ваги, який залежить від знань та досвіду експертів для кожної з них. Варто також дослідити побудову ІНМТ2 з різними функціями належності, оскільки це ускладнює визначення *FOU*.

ІНМТ2 дозволяють моделювати складніші невизначеності, ніж ІНМТ1. Це особливо корисно для систем, де дані можуть бути неповними або неоднозначними. Завдяки своїй структурі ІНМТ2 можуть краще справлятися з шумами та помилками в даних, що робить їх більш стійкими у порівнянні з традиційними методами. ІНМТ2 надають можливість більш гнучкого налаштування параметрів системи, що дозволяє досягати оптимальних характеристик керування в різних умовах експлуатації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Reddy, P. V. S. Fuzzy logic based on Belief and Disbelief membership functions. *Fuzzy Information and Engineering*, 2017, 9(4), pp. 405-422, doi: 10.1016/j.fiae.2017.12.001.
- Babanezhad, M., Masoumian, A., Nakhjiri, A. T. Influence of number of membership functions on prediction of membrane systems using adaptive network based fuzzy inference system. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10(1), pp. 1-20, doi: 10.1038/s41598-020-73175-0.
- Pelalak, R., Nakhjiri, A. T., Marjani, A. Influence of machine learning membership functions and degree of membership function on each input parameter for simulation of reactors. *Scientific Reports*, 2021, 11(1), pp.1-11, doi:10.1038/s41598-021-81514-y.
- Razak, T.R., Garibaldi, J.M., Wagner, C., Pourabdollah, A., Soria, D., Toward a Framework for Capturing Interpretability of Hierarchical Fuzzy Systems—A Participatory Design Approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 29(5), pp.1160-1172, doi: 10.1109/TFUZZ.2020.2969901.
- Zadeh, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. *Information sciences*, 1975, vol. 8(3), pp.199-249. doi: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
- Liang Q., Mendel J. M. Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(5), pp. 535-550, doi: 10.1109/91.873577.
- Zakovorotnyy A.Y. Neural Networks Art: Solving Problems with Multiple Solutions and New Teaching Algorithm / A.Y. Zakovorotnyy, V.D. Dmitrienko, S.Yu. Leonov, I.P. Khavina // The Open Neurology Journal. – 2014. – № 8. – P. 15 – 21.
- Mendel, J. M. Type-2 fuzzy sets: some questions and answers. *IEEE Connections, Newsletter of the IEEE Neural Networks Society*, 2003, 1, pp. 10-13.
- Deveci, M., Cali, U., Kucuksari, S. and Erdogan, N. Interval type-2 fuzzy sets based multi-criteria decision-making model for offshore wind farm development in Ireland. *Energy*, 2020, p.117317, doi:10.1016/j.energy.2020.117317.
- Biswas, R., Sil, J. An improved canny edge detection algorithm based on type-2 fuzzy sets. *Procedia Technology*, 2012, 4, pp. 820-824, doi: 10.1016/j.protcy.2012.05.134.
- Zhao, F., Chen, Y., Liu, H., Fan, J. Alternate PSO-based adaptive interval type-2 intuitionistic fuzzy C-means clustering algorithm for color image segmentation. *IEEE Access*, 2019, 7, pp. 64028-64039, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916894.
- Yatak, M. Ö., Şahin, F. Ride Comfort-Road Holding Trade-off Improvement of Full Vehicle Active Suspension System by Interval Type-2 Fuzzy Control. *Eng. Science and Techn.*, 2021, 24(1), pp. 259-270, doi: doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.006.
- Zakovorotnyy, A., Kharchenko, A. Optimal Speed Controller Design with Interval Type-2 Fuzzy Sets. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2021 pp. 363-366, doi:10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570045.
- Заковоротний О.Ю. Синтез оптимальних законів управління рухом дизель-поїзда за допомогою математичної моделі у формі Бруновського / О.Ю. Заковоротний, В.Д. Дмитрієнко, Н.В. Мезенцев // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2010. – № 5-6 (84-85). – С. 7 – 13.

Received (Надійшла) 17.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2024

### The use of fuzzy sets of the second type for the design of speed controllers

O. Zakovorotnyi, T. Orlova

**Abstract.** Interval fuzzy sets of the second type are used in the design of fuzzy systems related to speed control under conditions of uncertainty. The article considers the possibilities of using interval fuzzy sets of the second type to describe variables that can be different values of the same dynamic system or changes in technical parameters that occur under the influence of external factors. Complex interval fuzzy sets of the second type are also presented and examples of their use for reducing the number of fuzzy sets and rules in the fuzzy knowledge base are given. The necessary conditions for constructing complex interval fuzzy sets of the second type and methods for determining the lower and upper membership functions in them are also given. The uncertainty trace for a complex interval fuzzy set of the second type is represented by the upper and lower membership functions of different fuzzy sets. All the methods described in the work can be used in the design of decision support systems, to select the optimal parameters of a nonlinear system, or in the design of fuzzy speed controllers.

**Keywords:** interval fuzzy set of the second type; fuzzy systems; speed control; decision support system; unclear regulators.