

## ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ ТИПУ-2 В СИСТЕМАХ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В УМОВАХ НЕДОВИЗНАЧЕНОСТІ ВХІДНИХ ДАНИХ

Вінницький національний технічний університет

Запропоновано систему нечіткої логіки з використанням математичного апарату інтервальних нечітких множин другого типу. В роботі представлено задачу розвитку процесу оцінювання інтервального виходу нечіткої системи з використанням інтервальних функцій належності. На відміну від систем на основі нечітких множин типу -1, результатом роботи яких є ступінь належності в формі єдиного числа, нечіткі множини типу -2 дозволяють отримати на виході інтервал можливих значень вихідної лінгвістичної змінної. Цей інтервал виникає як наслідок невизначеностей, присутніх у вхідних даних, а також невизначеностей, пов'язаних із характером подання експертних знань. Ці особливості дають змогу системі на основі інтервальних нечітких множин працювати в умовах малоінформативних вхідних даних та наявності пропусків у вхідних даних. В таких умовах робота нечітких логічних систем першого типу неможлива. Тому використання нечітких систем з інтервальними функціями належності по зрівнянню зі звичайними типу-1 є доцільним. Коли інтервальний вихід моделі все ж таки не може бути придатним до рішення задачі або не задовольняє розробника, краще перейти до впровадження тривимірних функцій залежності та отримувати вихід моделі у вигляді лінгвістичної інтерпретації. Показано етапи побудови нечіткої бази знань за загальним правилом використання експериментальних даних. Запропоновано підхід до оцінювання параметрів інтервальних функцій належності типу-2 гаусового типу, шляхом знаходження припустимих діапазонів зміни параметрів функцій належності, при яких зберігається адекватність моделювання. Оскільки при використанні інтервальних функцій належності, вихідна величина нечіткої системи матиме певний інтервал при певному конкретному векторі вхідних значень, надані рекомендації, щодо оцінювання вихідного інтервалу експертом.

**Ключові слова:** система нечіткої логіки, функція належності типу-2, невизначені вхідні дані, експертні знання..

### Вступ

На даний час важливими є питання аналізу даних в системах підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності. Поширеною задачею є виявлення прихованих правил та залежностей; добування та обробка невизначених знань, що отримують за допомогою експертів або знань, що отримані в результаті обробки експериментальних даних. Такі задачі виникають при розробці систем діагностування та контролю складних об'єктів.

Відомо [1], що як правило, для розв'язання задач ідентифікації складних об'єктів, необхідна допомога експертів. Треба зауважити, що знання, які отримують за допомогою експертів, містять різні види невизначеностей. Тобто значення слів, які використовуються від експертів, можуть бути непевними, тобто слова можуть означати різні речі для різних людей. А також антецеденти та консеквенти правил можуть мати розкид значень, у випадку, коли знання отримуються від групи експертів, відповіді яких можуть бути не узгодженими. Якщо знання є результатом обробки експериментальних даних, то впевнено можливо вказати на існуючу в таких даних значну кількість шумів, а саме можлива поява малоінформативних параметрів або пропуски в експериментальних чи вхідних даних. Саме тому важливим є пошук методик, яка дає можливість подання та обробки невизначених вхідних даних. Найбільш пристосованими для обробки таких даних є методи теорії

нечітких множин та нечіткої логіки [2]. Використання апарату теорії нечітких множин для формалізації знань автоматично ставить перед дослідником задачу вибору типу нечіткої множини для побудови функцій належності та побудови нечітких систем, що є адекватними предметній області. Поширеними є труднощі, що виникають у розробників експертних систем, що працюють з апаратом нечітких множин, з вибором типу нечіткої множини для подання знань, або проблеми, що пов'язані з визначенням ступеня участі експерта та міри використання експериментальних даних [3,4].

### Постановка задачі

**Постановка задачі.** У роботі ставиться задача оцінювання інтервального виходу нечіткої системи, який отримують при впровадженні систем нечіткої логіки з функціями належності типу-2. А також надання рекомендацій, щодо використання інтервальних функцій належності типу-2 для побудови нечітких логічних систем з інтервальним виходом для розв'язання прикладних задач в умовах недовизначеності вхідних даних.

### Математична модель та методика досліджень

Для розв'язання задачі розглянемо основні ознаки функцій належності типу-2. Відомо, що їх поділяють на інтервальні типу-2, які мають інтервальну шкалу ступенів належності та загальні функції належності типу-2. Методику досліджень спрямуємо на інтервальні функції належності типу-2. Зауважимо, що на відміну від звичайних функцій належності, які будуються на нечітких множинах типу-1, дані функції належності будуються на нечітких множинах на порядок вище.

Представимо основні етапи оцінювання інтервального виходу нечіткої системи, які отримують при впровадженні в систему нечіткої логіки інтервальних функцій належності типу-2.

Для подальших досліджень будемо враховувати такі передумови.

1. Система нечіткої логіки апроксимує невідому залежність:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

де  $f$  – певна апріорно невідома функція, яка пов'язує вхідні і вихідні змінні.

Позначимо:  $y$  – певний вихідний параметр, значення якого визначає стан складного об'єкта;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – вхідні змінні, які характеризують стан об'єкта.

2. Вхідні і вихідні параметри можуть бути як кількісними, так і якісними. Кількісні параметри задаються діапазонами змінні, а якісні множинами можливих значень.

3. Використовуємо підхід до побудови нечітких систем, коли система будується на основі експериментальних даних, що визначають центри нечітких множин антецедентів та консеквентів правил. Також відома множина відгуків системи на певні вектори вхідних значень. Нечітку логічну систему будуюмо на основі інтервальної нечіткої моделі типу-2 [2], зображено на рисунку 1.

Розглянемо основні етапи побудови нечіткої логічної системи з застосуванням функцій належності типу-2. Перший етап пов'язаний з побудовою нечіткої бази знань, проведемо його за загальним правилом для побудови бази знань з експериментальних даних, тобто можемо отримати в нечіткій базі знань стільки правил, скільки прикладів у навчальній вибірці [5]. В результаті будемо мати надлишкову базу правил. Тому спочатку будуюмо систему на базі всієї навчальної вибірки, а потім послідовно вилучаємо правила з нечіткої системи при умові, що їх вилучення не збільшує помилку системи на певну величину, достатньо малу. Також, такого результату можливо досягти, якщо провести збереження адекватності нечіткої системи за допомогою настроювання параметрів. Таким чином, визначається мінімально необхідна кількість правил, для нечіткої системи, що необхідна для збереження адекватності відображення предметної області.

Другий етап стосується побудови функцій належності. Пропонується використовувати інтервальне оцінювання параметрів функцій належності, тобто знаходження припустимих діапазонів зміни параметрів при яких зберігається адекватність моделювання. В цьому випадку вихідна величина матиме не точне точкове значення, а певний інтервал вихідних значень. Це означає, що певному конкретному вектору вхідних значень відповідає певний конкретний інтервал.

Послідовність кроків для знаходження інтервалів значень параметрів пропонується такою.

Перший крок. Експериментальна вибірка розбивається на дві частини. Перша частина є базовою для побудови нечіткої системи з фіксованими значеннями. На другій частині перевіряється адекватність моделювання.

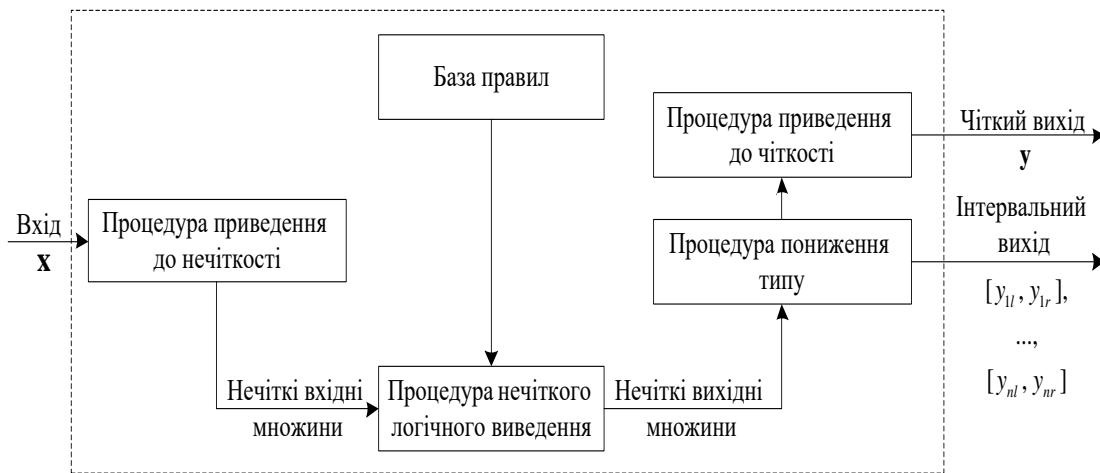


Рисунок 1. Структура інтервальної нечіткої моделі

Другий крок. Після розбиття експериментальної вибірки і побудови початкової системи визначаємо максимальні діапазони змін параметрів функцій належності, при яких зберігається адекватність моделювання на вибірці, яка не використовувалась при побудові системи.

Для опису інтервальних функцій належності вибираємо модифіковану гаусову форму. Загальний вигляд такої інтервальної функції належності:

$$\mu(x) = e^{-\left(\frac{x-b}{[\min(c), \max(c)]}\right)^2},$$

де  $[\min(c), \max(c)]$  – діапазон зміни параметру  $c$  гаусової функції належності,  $b$  – зміщення; приклад такої функції зображено на рис. 2.

Для визначення діапазону зміни параметру  $c$  при побудові нечіткої системи на основі експериментальних даних пропонується використовувати процедури, що мають дві частини – побудова звичайної нечіткої системи по зменшеній вибірці (подано вище), і знаходження діапазонів зміни параметру  $c$  функцій належності [6].

Проведемо оцінювання можливостей інтервальних функцій належності, які будуються за експериментальними даними в двох аспектах: перший – про адекватність відображення інтервальними функціями належності невизначеностей, що існують у вихідних даних і другий – про те, коли доцільно використовувати інтервальні функції належності, а коли завдяки їх впровадженню можливо отримати занадто широкий вихідний інтервал нечіткої системи.

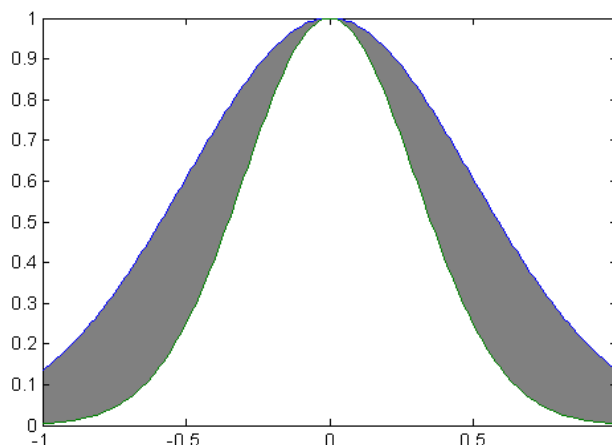


Рисунок 2. Інтервальна функція належності типу-2 (гаусова форма).

Розглянемо перший аспект. Вибрана для опису інтервальних функцій належності гаусова форма функції належності (зображено на рисунку 2) дає можливість побачити зону невизначеності, яку зображено темним фарбуванням. За рахунок появи цієї зони системи нечіткої логіки отримують можливість відображати невизначеності, що існують в вихідних даних, на вихід моделі. Останнє є безумовною перевагою використання інтервальних функцій належності в системах нечіткої логіки в умовах недовизначених вхідних даних, тому що дає можливість побудувати інтервальну нечітку систему, яка буде адекватно відображати предметну область [7]. Другий аспект полягає в тому, що є випадки, де використання інтервальних функцій належності може привести до розширення інтервального виходу моделі. В такому випадку доцільно використання загальних функцій належності типу-2, тоді в якості вихідної величини можливо отримати розподіл значень вихідної величини, якому дати лінгвістичну інтерпретацію.

Наведемо фрагмент обробки даних в задачі діагностування складного об'єкту [8], (таблиця 1).

Таблиця 1. Результати роботи нечіткої системи на тестових прикладах

№	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	..	x <sub>37</sub>	Стан об'єкта, діагностики	Вихід системи	Кінцевий стан
1	1	4	1	0	0	3	1	..	118	2	[2.1353, 2.2361]	2
2	1	5	3	0	1	1	0	..	3.4	1	[0.9780, 1.1041]	1
3	1	5	6	0	0	2	0	..	130	3	[0.6729, 3.1877]	1...3

Розглянемо отримані результати.

Приклад 1. В результаті роботи нечіткої системи отримаємо таку оцінку вихідної величини:

$u = [2.1353; 2.2361]$ . Обґрунтування результатів діагностування експертом таке: значення верхньої і нижньої межі інтервалу відповідають одному і тому стану – другому.

Приклад 2. В результаті роботи нечіткої системи отримаємо таку оцінку вихідної величини:

$u = [0.9780; 1.1041]$ . Обґрунтування результатів діагностування експертом таке: значення верхньої і нижньої межі інтервалу відповідають одному і тому стану – першому.

Приклад 3. В результаті роботи нечіткої системи отримаємо таку оцінку вихідної величини:

$y = [0.6729; 3.1877]$ . Обґрунтування результатів діагностування експертом таке: значення верхньої і нижньої межі вихідного інтервалу відповідають різним станам. Висновок: кінцевим результатом будуть всі стани, що потрапляють у вихідний діапазон. Остаточний висновок експерта такий: стан об'єкта треба досліджувати додатково.

Запропонуємо рекомендації до застосування функцій належності типу 2 в системах нечіткої логіки в умовах недовизначеності вхідних даних. Основні кроки такі.

1. Вважаємо, що є експериментальна вибірка  $X$ , яка задана в умовах наявності невизначеності. Розробнику нечіткої моделі дамо право самостійно приймати рішення про вид функції належності в тому числі використовувати інтервальні функції належності.

2. У випадку отримання значного інтервалу на виході моделі, який не є придатним для даної задачі, розробнику треба або повторити експериментальні дослідження, або перейти до впровадження тривимірних функцій залежності та отримувати вихід системи у вигляді лінгвістичної інтерпретації.

3. Для підвищення якості прийняття рішень експерту необхідно або самостійно оцінювати ширину інтервалу на виході нечіткої системи, або звертатися до групи незалежних експертів для встановлення певних меж, в яких отримані результати в умовах невизначеності є задовільними та приймати кінцеве рішення.

## Висновки

Запропоновано систему нечіткої логіки з використанням математичного апарату інтервальних нечітких множин другого типу. Показано переваги використання інтервальних функцій належності в системах нечіткої логіки. Подано етапи побудови нечіткої бази знань за загальним правилом використання експериментальних даних. Надано рекомендації, щодо застосування функцій належності типу 2 в системах нечіткої логіки в умовах недовизначеності вхідних даних.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Зайченко, Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах [Текст] / Ю. П. Зайченко – К.: Издат. Дом “Слово”. – 2008. – 344 с.
- [2] Liang, Q. Interval Type-2 fuzzy logic systems: theory and design [Text] / Q. Liang, J. M. Mendel // IEEE Trans. on Fuzzy Syst. – 2000. –V. 8. – P. 535–550.
- [3] Maribel Guerrero, Fevrier Valdez and Oscar Castillo. Comparative Study between Type-1 and Interval Type-2 Fuzzy Systems in Parameter Adaptation for the Cuckoo Search Algorithm [Text] / Maribel Guerrero, Fevrier Valdez // Symmetry 2022, 14, 2289, <https://doi.org/10.3390/sym14112289>.
- [4] Кондратенко, Н. Р. Дослідження адекватності інтервальних нечітких моделей типу-2 в задачах ідентифікації складних об'єктів [Текст] / Н. Р. Кондратенко, О. О. Снігур // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2019. – № 4. – С. 94–104.
- [5] Кондратенко Н.Р. Використання нечітких баз знань з функціями належності типу-2 у медичній діагностиці / Н.Р. Кондратенко// Матеріали статей Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні задачі медичної, біологічної фізики та інформатики». -2022р.-Вінниця: <https://meet.google.com/pap-cszd-zpi>
- [6] Кондратенко, Н.Р. Нечіткі логічні системи з врахуванням пропусків в експериментальних даних [Текст] / Н.Р. Кондратенко, Н.Б. Зелінська, С.М. Куземко // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2004. – № 5. – С. 37–41
- [7] Кондратенко, Н. Р. Підвищення адекватності нечітких моделей за рахунок використання нечітких множин типу 2 [Текст] / Н. Р. Кондратенко // Наукові вісті національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. – 2014. – № 6. – С. 56–61.
- [8] Kondratenko, N. Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty [Text] / N. Kondratenko, O. Snihur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 4/4 (82). – P. 20–28.

## REFERENCES

- [1] Zaychenko Y.P. Fuzzy models and methods in intelligent systems. Kiev Slovo (2008). (in Russian)
- [2] Liang, Q. Interval Type-2 fuzzy logic systems: theory and design [Text] / Q. Liang, J. M. Mendel // IEEE Trans. on Fuzzy Syst. – 2000. –V. 8. – P. 535–550.
- [3] Maribel Guerrero, Fevrier Valdez and Oscar Castillo. Comparative Study between Type-1 and Interval Type-2 Fuzzy Systems in Parameter Adaptation for the Cuckoo Search Algorithm [Text] / Maribel Guerrero, Fevrier Valdez // Symmetry 2022, 14, 2289, <https://doi.org/10.3390/sym14112289>.

- [4] Kondratenko, N. R. Investigating adequacy of interval type-2 fuzzy models in complex objects identification problems [Text] / N. R. Kondratenko, O. O. Snihur // System Research And Information Technologies. – 2019. – NO 4. – P. 94–104.
- [5] Kondratenko N.R. Vykorystannya nechitkykh baz znanj z funktsiyamy nalezhnosti typu-2 u medychniy diahnostytsi / N.R. Kondratenko // Materialy mizhnar. nauk.-prakt. konf., «Aktual'ni zadachi medychnoyi biolohichnoyi fizyky ta informatyky»: - 2022p.: - Vinnytsya, rezhym dostupu: : <https://meet.google/com/pap-cszd-zpi>
- [6] Kondratenko, N. R. Fuzzy Logic Systems with Allowance for the Blank in Experimental Data Taken [Text] / N. R. Kondratenko, N. B. Zelinsjka, S.M. Kuzemko // Naukovi visti NTUU KPI.- 2004.- No. 5. P. 37–41.
- [7] Kondratenko, N. R. Improving Adequacy of Type-2 Fuzzy Models by Using Type-2 Fuzzy Sets [Text] / N. Kondratenko // Naukovi visti NTUU KPI. – 2014. – No. 6. – P. 56–61.
- [8] Kondratenko, N. Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty [Text] / N. Kondratenko, O. Snihur // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 4/4 (82). – P. 20–28.

**Кондратенко Наталія Романівна** — кандидат техн. наук, професор, професор кафедри захисту інформації, e-mail:kondrn2014@gmail.com ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4450-1603>

**N. R. Kondratenko**

## **Applications Type-2 Membership Functions in Fuzzy Logic Systems Under Conditions of Uncertainty Input Data**

Vinnitsia National Technical University

*This work proposes fuzzy logics system with use of math apparatus of type-2 interval fuzzy sets. The present paper formulates the task of developing a formal approach, which would enable analyzing fuzzy systems in terms of their capability to describe uncertainties of input information using interval membership functions. In contrast with the type-1 fuzzy sets-based systems, which result in membership value in the form of a single digit, the type-2 fuzzy sets allow to obtain an interval of values of the final linguistic variable. This interval is the result of the uncertainties, which are present in the incoming data, as well as of the uncertainties, related to the nature of presentation of expertise. These peculiarities allow the interval fuzzy sets-based system to function operating with less informative incoming data as well as in case of data omission. These conditions make function of the type-1 fuzzy logical systems impossible. That is why use of the fuzzy logics systems with interval functions is seen expedient compared to the usual type-1 systems. However, such models may result in wide interval output. In case the resulting output of the model may not be used to solve a task or is not satisfactory for the developer, it is better to get to use of the three-dimension membership functions while obtaining the outcome as a linguistic interpretation. This work also describes the stages of building fuzzy knowledge base using the common rule of use of experimental data. This work also proposes an approach to evaluate the parameters of gauss type-2 membership interval functions by defining the membership functions permissible measuring ranges which allow for adequate modelling. As long as use of the interval membership function provides for the fuzzy system output value with certain interval, taking into account certain vector of input values, this work provides expert recommendations on how to evaluate the interval output.*

**Keywords:** fuzzy logic system, type-2 membership function, uncertainty input data, expert knowledge.

**Kondratenko Nataliia R.** — PhD, Professor, Professor Department of information security, e-mail: kondrn2014@gmail.com ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4450-1603>