УДК 004.825 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.10

О. Г. ЗІНОВ'ЄВА
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного
ORCID: 0000-0003-3760-8952

# ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СИСТЕМАХ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

*У сучасних умовах швидкого розвитку інформаційних технологій та зростаючої складності процесів прийняття рішень все більшої актуальності набувають методи, що дозволяють враховувати невизначеність та неповноту інформації. Одним із таких методів є використання нечіткої логіки, яка забезпечує можливість формалізації та аналізу складних систем, де класичні підходи виявляються малоефективними. Дана стаття присвячена розробці методологічних засад та практичних рекомендацій щодо впровадження систем підтримки прийняття рішень на основі нечіткої логіки*

*Досліджено ключові переваги нечітко-логічного підходу перед традиційними методами, зокрема здатність моделювати невизначеність, оперувати якісними лінгвістичними змінними та враховувати експертні знання в процесі прийняття рішень. Аргументовано, що нечітка логіка забезпечує більш природний опис реальних систем з притаманною їм неточністю і невизначеністю, що особливо актуально для СППР, які функціонують у динамічних середовищах з неповною інформацією.*

*Окрему увагу приділено методологічним аспектам інтеграції нечіткої логіки з іншими інтелектуальними технологіями, включаючи нейронні мережі, генетичні алгоритми та методи машинного навчання, що дозволяє створювати гібридні системи з підвищеною адаптивністю та ефективністю. Проаналізовано архітектурні рішення для побудови СППР на основі нечіткої логіки з детальним розглядом етапів фазифікації, нечіткого виведення та дефазифікації.*

*У статті представлено результати практичної імплементації запропонованих підходів у різних предметних областях, включаючи фінансовий менеджмент, медичну діагностику, управління технічними системами та екологічний моніторинг. Наведено порівняльний аналіз ефективності СППР на основі нечіткої логіки з традиційними системами за критеріями точності, швидкодії та інтерпретаціїї результатів.*

*Практична значущість дослідження полягає в розробці конкретних методик проектування та впровадження нечітких СППР, які можуть бути застосовані фахівцями різних галузей для підвищення ефективності процесів прийняття рішень в умовах невизначеності та неповноти вхідних даних*

***Ключові слова:*** *нечітка логіка, системи підтримки прийняття рішень, невизначеність, лінгвістичні змінні, нечітке виведення.*

O. G. ZINOVIEVA
Senior Lecturer at the Department of Computer Sciences
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
ORCID: 0000-0003-3760-8952

## USING FUZZY LOGIC IN DECISION-MAKING SYSTEMS

*In today's conditions of rapid development of information technologies and increasing complexity of decision-making processes, methods that allow taking into account uncertainty and incompleteness of information are becoming increasingly relevant. One of such methods is the use of fuzzy logic, which provides the possibility of formalization and analysis of complex systems, where classical approaches are ineffective. This article is devoted to the development of methodological principles and practical recommendations for the implementation of decision-making support systems based on fuzzy logic*

*The key advantages of the fuzzy logic approach over traditional methods are investigated, in particular the ability to model uncertainty, operate with qualitative linguistic variables and take into account expert knowledge in the decision-making process. It is argued that fuzzy logic provides a more natural description of real systems with their inherent imprecision and uncertainty, which is especially relevant for DSSs that operate in dynamic environments with incomplete information.*

*Special attention is paid to the methodological aspects of integrating fuzzy logic with other intelligent technologies, including neural networks, genetic algorithms and machine learning methods, which allows creating hybrid systems with increased adaptability and efficiency. Architectural solutions for building DSSs based on fuzzy logic are analyzed with a detailed consideration of the stages of fuzzification, fuzzy inference and defuzzification.*

*The article presents the results of practical implementation of the proposed approaches in various subject areas, including financial management, medical diagnostics, technical systems management and environmental monitoring. A comparative analysis of the effectiveness of DSS based on fuzzy logic with traditional systems is presented according to the criteria of accuracy, speed and interpretation of results.*

*The practical significance of the study lies in the development of specific methods for designing and implementing fuzzy DSS, which can be used by specialists in various industries to improve the efficiency of decision-making processes in conditions of uncertainty and incompleteness of input data*

***Key words:*** *fuzzy logic, decision support systems, uncertainty, linguistic variables, fuzzy inference.*

**Постановка проблеми**

В умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій та зростаючої складності управлінських завдань особливої актуальності набуває проблема розробки ефективних систем підтримки прийняття рішень. Традиційні методи, засновані на класичній булевій логіці, часто виявляються недостатньо гнучкими для роботи з неточними даними та невизначеністю, властивою реальним управлінським ситуаціям. У цьому контексті актуалізується питання розробки та впровадження систем підтримки прийняття рішень (СППР), здатних ефективно працювати з неструктурованими та нечіткими вхідними даними, моделювати процеси думок експертів та надавати обґрунтовані рекомендації в умовах багатокритеріальності та невизначеності.

Використання теорії нечіткої логіки та нечітких множин як методологічної основи для побудови СППР дозволяє формалізувати якісну інформацію та лінгвістичні оцінки експертів, забезпечуючи гнучкий математичний апарат для моделювання складних слабоструктурованих систем та процесів прийняття рішень в умовах неповної визначеності. Однак, попри значний теоретичний доробок у галузі нечіткої логіки, існує низка проблем, пов'язаних з ефективним впровадженням нечітко-логічних підходів у практичні СППР, зокрема: оптимізація параметрів функцій належності, балансування між точністю та інтерпретабельністю нечітких моделей, інтеграція з іншими інтелектуальними технологіями, обробка динамічних даних та забезпечення масштабованості нечітких систем

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У галузі нечіткої логіки та її застосування в системах підтримки прийняття рішень (СППР) за останні роки було проведено низку ґрунтовних досліджень, які значно розширили як теоретичну базу, так і практичні можливості використання даних технологій.

Фундаментальні роботи Л. Заде [1], який вважається засновником теорії нечітких множин, продовжують залишатися теоретичною основою для сучасних досліджень. Однак останнім часом спостерігається суттєвий прогрес у розвитку та впровадженні методів нечіткої логіки в СППР. В роботі Кравця П. та Киркало Р. [2] була досліджена проблема прийняття рішень в умовах невизначеності на основі застосування продукційних правил нечіткої логіки. Важливий внесок у розвиток практичного застосування нечіткої логіки в СППР зробив Кравченко В. М. [3], який запропонував методу підтримки та прийняття рішень в управлінні економічними об'єктами в умовах невизначеності на підставі комбінування методів обробки експертних суджень

У міжнародному контексті варто виділити роботу Zhang et al. [4], де пропонується структура навчання з підкріпленням на основі нечіткості для автономних систем, демонструючи її ефективність у динамічних середовищах.. Особливу увагу привертає робота Dhingra et al. [5], в якій представлено інтегровану систему підтримки прийняття рішень, що поєднує нечітку логіку та Інтернет речей для управління «розумними містами». Ця система демонструє ефективність використання нечіткої логіки для обробки даних від різнорідних сенсорів у режимі реального часу.

Таким чином, аналіз останніх досліджень свідчить про активний розвиток теорії та практики застосування нечіткої логіки в СППР з тенденцією до інтеграції з іншими інтелектуальними технологіями та розширення сфер застосування.

**Формулювання мети дослідження**

Метою даного дослідження є розробка методологічних основ та практичних підходів до ефективного використання нечіткої логіки в системах підтримки прийняття рішень для підвищення їх адаптивності, точності та інтерпретабельності в умовах невизначеності та багатокритеріальності

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Актуальність дослідження використання нечіткої логіки в системах підтримки прийняття рішень обумовлена низкою факторів, що характеризують сучасний стан розвитку інформаційних технологій та потреб різних галузей людської діяльності.

По-перше, зростаюча складність та динамічність соціально-економічних, технічних та екологічних систем вимагає розробки більш гнучких та адаптивних інструментів аналізу та моделювання, здатних враховувати неповноту та невизначеність вхідних даних. Нечітка логіка, на відміну від класичної булевої логіки, пропонує концептуальний апарат, який дозволяє формалізувати якісні характеристики об'єктів та процесів, використовуючи поняття ступеня належності та лінгвістичних змінних.

Крім того, збільшення обсягів даних, що генеруються різноманітними системами моніторингу, сенсорними мережами та соціальними медіа, актуалізує проблему їх ефективної обробки та інтерпретації для підтримки

прийняття рішень. Методи нечіткої логіки дозволяють агрегувати дані з різнорідних джерел, оперуючи не лише їх кількісними значеннями, але й смисловими зв'язками та експертними знаннями про предметну область.

Нарешті, активний розвиток міждисциплінарних досліджень та практичних застосувань, що поєднують методи нечіткої логіки з нейронними мережами, генетичними алгоритмами, Байєсівськими методами та іншими підходами штучного інтелекту, відкриває нові перспективи для створення гібридних СППР з підвищеною адаптивністю, точністю та обчислювальною ефективністю

Нечітка логіка, запропонована Лотфі Заде у 1965 році, надає математичний апарат для роботи з неточними та якісними параметрами, що особливо важливо при моделюванні складних соціально-економічних, технічних та організаційних систем. На відміну від традиційної логіки, яка оперує лише двома станами істинності, нечітка логіка дозволяє працювати з проміжними значеннями, що краще відповідає природі людського мислення та реальним процесам прийняття рішень.

Формально нечітка множина $A$ у просторі $X$ визначається як сукупність упорядкованих пар:

$$A = \{(x, \mu A(x)) \mid x \in X \},$$

де $\mu A(x)$ – функція належності, яка відображає кожен елемент $x$ з $X$ у ступінь його належності до множини $A$.

Ключовим поняттям нечіткої логіки є лінгвістична змінна – змінна, значеннями якої є слова або вирази природної мови. Наприклад, лінгвістична змінна «температура» може мати значення «низька», «середня», «висока», кожне з яких представляється відповідною нечіткою множиною з функцією належності, що відображає ступінь відповідності числового значення температури даному лінгвістичному терму.

Системи підтримки прийняття рішень на основі нечіткої логіки (нечіткі СППР) використовують апарат нечітких множин та нечіткого логічного виведення для моделювання процесів міркувань експертів та прийняття рішень в умовах невизначеності.

Типова архітектура нечіткої СППР включає такі компоненти:

– база даних, що містить кількісну та якісну інформацію про предметну область;
– база знань, яка включає лінгвістичні та нечіткі правила виведення типу «ЯКЩО-ТО»;
– механізм нечіткого виведення, який забезпечує фаззифікацію вхідних даних (перетворення чітких значень у нечіткі), агрегацію підумов аккумуляцію висновків правил та дефаззифікацію результатів (перетворення нечітких значень у чіткі);
– інтерфейс користувача, який забезпечує взаємодію з особою, що приймає рішення, представлення результатів та пояснення логіки прийняття рішень.

Концептуальна модель СППР (рис. 1) на основі нечіткої логіки представляє собою узагальнений підхід до організації та функціонування таких систем, що відображає взаємозв'язки між основними компонентами та процесами.

Розглянемо детально компоненти розробленої концептуальної моделі СППР на основі нечіткої логіки:

1) Модуль обробки даних:
– база знань містить формалізовані експертні оцінки, лінгвістичні змінні та їх функції належності;
– база правил зберігає набір нечітких правил виду «ЯКЩО-ТО» для логічного виведення.
2) Модуль обробки нечітких даних:
– блок фазифікації перетворює чіткі вхідні значення в нечіткі множини;
– машина нечіткого логічного виведення реалізує алгоритми нечіткого виведення (наприклад, Мамдані або Сугено);
– блок дефазифікації перетворює результати нечіткого виведення в чіткі значення.
3) Модуль взаємодії:
– інтерфейс користувача забезпечує введення даних та параметрів;
– відображає результати роботи системи;
– дозволяє експертам налаштовувати базу знань та правил.
4) Модуль адаптації:
– здійснює навчання системи на основі накопиченого досвіду;
– коригує параметри функцій належності;
– оптимізує базу правил.

Вхідні дані отримуються через інтерфейс користувача, проходять попередню обробку та валідацію. Після цього виконується процес нечіткого логічного виведення. Механізм нечіткого виведення є центральним компонентом нечітких СППР, який забезпечує трансформацію вхідних даних у рекомендації або рішення на основі бази нечітких правил. Найбільш поширеним алгоритмом нечіткого виведення є алгоритм Мамдані, який включає етапи фаззифікації вхідних змінних, обчислення рівнів «відсіювання» для лівих частин кожного правила, знаходження «усічених» функцій належності висновків правил, об'єднання усічених функцій належності для отриманні результуючої нечіткої множини та дефаззифікацію результуючої нечіткої множини. Також в якості

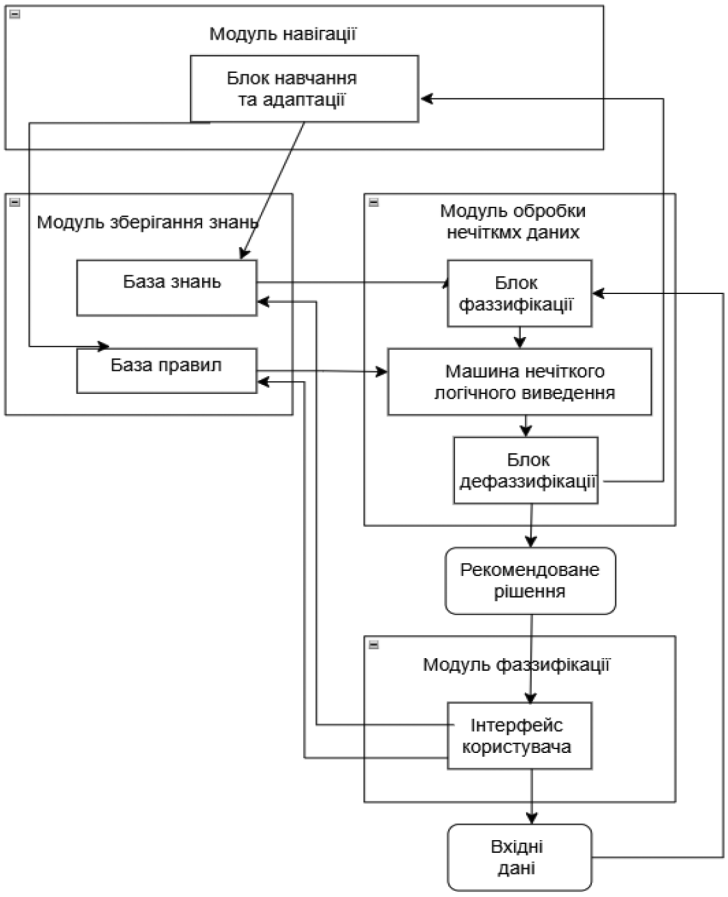


**Рис. 1. Концептуальна модель СППР на основі нечіткої логіки**

механізму нечіткого виведення можна використати алгоритм Сугено, який відрізняється від алгоритму Мамдані тим, що висновки правил представляються не нечіткими множинами, а функціями від вхідних змінних, та алгорит Цукамото, де висновки правил представляються монотонними функціями належності, а чітке вихідне значення обчислюється як зважене середнє індивідуальних чітких виходів, отриманих шляхом зворотного перетворення. Вибір алгоритму нечіткого виведення та методу дефазифікації залежить від специфіки задачі, вимог до обчислювальної ефективності та інтерпретабельності результатів

Особливості запропонованої моделі:

1) модульність – дозволяє легко модифікувати та розширювати систему;
2) адаптивність – система здатна навчатися та покращувати свою роботу;
3) інтерпретованість – можливість пояснити процес прийняття рішеня;
4) гнучкість – здатність працювати з різними типами даних та задач;
5) масштабованість – можливість додавання нових правил та знань.

Таким чином, запропонована концептуальна модель СППР на основі нечіткої логіки надає комплексне представлення про архітектуру, компоненти та процеси таких систем, а також методологічну основу для їх проектування, впровадження та оцінки ефективності в різних предметних областях.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку нечітких СППР, залишається низка проблем, які потребують подальших досліджень:

– проблема масштабованості: зі збільшенням кількості вхідних змінних експоненційно зростає кількість можливих правил (прокляття розмірності), що ускладнює розробку та налаштування системи;

– проблеми навчання: ефективне навчання нечітких систем на великих та зашумлених даних залишається складною задачею, особливо для систем з високою розмірністю вхідних змінних;

– проблеми валідації: оцінка якості та надійності нечітких СППР вимагає розробки спеціальних методів та критеріїв, що враховують специфіку нечіткого моделювання;

– проблема динамічної адаптації: більшість нечітких СППР розробляються для статичних умов і мають обмежені можливості адаптації до змін у предметній області.

**Висновки**

Проведене дослідження використання нечіткої логіки в системах підтримки прийняття рішень дозволяє зробити такі висновки:

1. Нечітка логіка надає потужний методологічний апарат для формалізації експертних знань та моделювання процесів прийняття рішень в умовах невизначеності, неповноти інформації та багатокритеріальності, що робить її ефективним інструментом для побудови СППР у різних предметних областях.
2. Ключовими перевагами нечітких СППР є їх здатність працювати з якісними (лінгвістичними) описами та кількісними даними, висока інтерпретабельність результатів, гнучкість та адаптивність до специфіки предметної області.
3. Розробка ефективної нечіткої СППР вимагає вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань, включаючи обґрунтований вибір архітектури системи, розробку лінгвістичних змінних та функцій належності, формування бази нечітких правил, вибір алгоритмів нечіткого виведення та дефазифікації.
4. Для подолання обмежень традиційних нечітких систем, пов'язаних з проблемами масштабованості, навчання та динамічної адаптації, перспективним є розвиток гібридних підходів, що інтегрують нечітку логіку з іншими методами штучного інтелекту, такими як нейронні мережі, генетичні алгоритми та когнітивне моделювання.
5. Практичний досвід впровадження нечітких СППР у різних галузях (медицина, фінанси, екологія, технічні системи) демонструє їх ефективність у вирішенні складних слабоструктурованих задач, які важко формалізуються традиційними математичними методами.
6. Подальший розвиток нечітких СППР пов'язаний з удосконаленням методів автоматичної генерації та оптимізації нечітких правил, створенням ієрархічних та модульних архітектур, інтеграцією з технологіями великих даних та глибокого навчання, а також з розробкою методів пояснюваного штучного інтелекту на основі нечіткої логіки.
7. Особливо перспективним напрямом є створення нечітких когнітивних СППР, здатних не лише аналізувати дані та генерувати рекомендації, але й моделювати когнітивні процеси експертів, забезпечуючи прозорість та обґрунтованість прийнятих рішень.

Таким чином, нечітка логіка залишається одним з найбільш ефективних підходів до моделювання та автоматизації процесів прийняття рішень в умовах невизначеності, а її інтеграція з сучасними методами штучного інтелекту відкриває нові перспективи для створення інтелектуальних СППР нового покоління

**Список використаної літератури**

1. Zadeh L.A. Fuzzy logic – a personal perspective // Fuzzy Sets and Systems. 2015. Vol. 281. P. 4–20.
2. Кравець П., Киркало Р. Системи прийняття рішень з нечіткою логікою. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. 2009. № 650. С. 115–123.
3. Кравченко В.М. Гібридний метод підтримки та прийняття управлінських рішень на основі обробки експертних суджень і нечіткої логіки. *Формування ринкової економіки в Україні*, 2012. Вип. 27. С.165–168.
4. Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. Fuzzy Reinforcement Learning for Autonomous Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2023. 31(4). P. 789–801.
5. Dhingra, Mani, Sur, Sourav and Chattopadhyay, Subrata A fuzzy-logic-based decision support system for resilient smart city planning. In: 5th Urban Economy Forum + 59th ISOCARP World Planning Congress, 10–13 October 2023, Toronto, Canada.

**References**

1. Zadeh L.A. (2015) Fuzzy logic – a personal perspective. Fuzzy Sets and Systems. Vol. 281.
2. Kravets P., & Kyrkalo R. (2009) Systemy pryiniattia rishen z nechitkoiu lohikoiu [Decision-making systems with fuzzy logic]. *Visnyk natsionalnoho universytetu* "*Lvivska politekhnika*". no. 650, pp. 115–123.
3. Kravchenko V.M. (2012) Hibrydnyi metod pidtrymky ta pryiniattia upravlinskykh rishen na osnovi obrobky ekspertnykh sudzhen i nechitkoi lohiky [A hybrid method of supporting and making managerial decisions based on the processing of expert judgments and fuzzy logic]. Formuvannia rynkovoi ekonomiky v Ukraini. Vol. 27, pp. 165–168.
4. Zhang, Y., Li, X., & Wang, (2023) J. Fuzzy Reinforcement Learning for Autonomous Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. Vol. 31(4). pp. 789–801.
5. Dhingra, Mani, Sur, Sourav & Chattopadhyay, Subrata. (2023) A fuzzy-logic-based decision support system for resilient smart city planning. *In: 5th Urban Economy Forum + 59th ISOCARP World Planning Congress*, 10–13 October 2023, Toronto, Canada.