



О. Г. Зінов'єва, ст. викл.

ORCID: 0000-0003-760-8952

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: olha.zinovieva@tsatu.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЗРОШЕННЯ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Анотація. Сучасне сільське господарство стикається із численними викликами, серед яких – зміна клімату, дефіцит води та потреба в підвищенні врожайності. У зв'язку із цим системи зрошення стають ключовим фактором для забезпечення стійкого агровиробництва. У статті досліджується застосування алгоритму нечіткого логічного висновку Мамдані для оптимізації систем автоматизованого зрошення сільськогосподарських культур. Запропоновано нечітку модель керування процесом поливу з використанням експертних знань агрономів. Наведено приклади побудови функцій належності для основних лінгвістичних змінних, продемонстровано процес фазифікації та формування правил типу «ЯКІЩО – ТО». Модель дає змогу визначати оптимальний обсяг поливу з урахуванням вологості ґрунту, температури повітря та ймовірності опадів. Розглянуто приклад практичного обчислення інтенсивності зрошення й описано переваги використання алгоритму Мамдані порівняно з традиційними методами. Використання цього алгоритму дає змогу поліпшити управління водними ресурсами, скоротити затрати й підвищити ефективність руйнування.

Ключові слова: нечітка логіка, оптимізація зрошення, алгоритм Мамдані, автоматизація сільського господарства, інтелектуальні системи.

Постановка проблеми. Раціональне використання водних ресурсів у сільському господарстві є однією з ключових проблем сучасного землеробства. В Україні, де площі зрошуваних земель становлять понад 500 тисяч гектарів, проблема ефективного водокористування набуває особливої актуальності, особливо в контексті кліматичних змін та підвищення посушливості південних регіонів. Традиційні системи зрошення базуються на фіксованих графіках подачі води або простих порогових значеннях вологості ґрунту, що не враховують комплексний вплив метеорологічних умов, стадії розвитку рослин та інші фактори.

Процес прийняття рішень щодо зрошення характеризується високим рівнем невизначеності та нечіткості вхідних даних. Показники вологості ґрунту можуть варіюватися в межах поля, метеорологічні прогнози мають імовірнісний характер, а потреби рослин змінюються залежно від фази вегетації. Класичні детерміновані підходи не завжди здатні ефективно обробляти таку інформацію та приймати оптимальні рішення в реальному часі.

Виникає потреба в розробці інтелектуальних систем управління зрошенням, здатних імітувати експертні знання агрономів, обробляти нечіткі та неповні дані, а також адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища. Саме такі можливості надає апарат нечіткої логіки, зокрема алгоритм Мамдані, завдяки якому можна формалізувати експертні знання у вигляді лінгвістичних правил і приймати рішення в умовах невизначеності.

Аналіз останніх досліджень. Нечітка логіка як математичний апарат для опису невизначеності була вперше представлена Л. А. Заде в 1965 р. У своїй фундаментальній роботі він показав, що багато природних понять не можна описати чіткими межами, а ступінь належності може бути виражений у діапазоні $[0; 1]$. Ця концепція стала підґрунтям для побудови сучасних систем нечіткого керування.

У багатьох роботах доведено ефективність нечіткої логіки в керуванні поливом сільськогосподарських культур. Зокрема, в дослідженнях Souza Gilberto et al. [8] та Neugebauer Maciej et al. [9] показано, що використання нечіткої системи керування дозволяє знизити споживання води на 20–35 % порівняно з традиційними методами. Аналогічні результати отримано й у роботах з інтеграції нечітких систем з IoT-платформами.

В українських дослідженнях також активно розвивається напрям застосування нечіткої логіки у сфері аграрної автоматизації. Так, Леві Л. І. [4] розробив концепцію автоматизованої системи управління зрошенням на основі алгоритму Мамдані, де як вхідні змінні використовуються вологість ґрунту, температура повітря та прогноз опадів. Роботи вітчизняних авторів щодо моніторингу й керування мікрокліматом теплиць (Лактіонов І. С., Вовна О. В., Бережний М. О. та ін.) демонструють перенесення підходів із регулювання мікроклімату до задач поливу, зокрема щодо архітектури системи та практичних аспектів налаштування функцій належності [5].

У публікаціях Домаскіної М. А. [1] та Мартинової О. В. [6] розглянуто теоретичні основи застосування теорії нечітких множин у прийнятті рішень у сільському господарстві й економіці природокористування. Дослідження Чепіля Г. В. [7] та Кузьменко О. І. [3] зосереджені на впровадженні технологій 4.0 в агропромисловому комплексі, де нечітка логіка розглядається як складова «розумного сільського господарства».

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що алгоритм Мамдані є ефективним засобом адаптивного керування процесами зрошення, який поєднує експертні знання агронома з автоматизованою обробкою сенсорних даних. Проте в більшості робіт зазначається необхідність подальшої стандартизації методів валідації та адаптації функцій належності до конкретних ґрунтово-кліматичних умов.

Формулювання мети статті. Метою цієї статті є теоретичне обґрунтування та розробка концептуальної моделі інтелектуальної системи керування зрошенням на основі алгоритму нечіткого логічного виводу Мамдані, спрямованої на оптимізацію водоспоживання та забезпечення оптимальних умов зволоження ґрунту для сільськогосподарських культур.

Основна частина. Останнім часом активного розвитку набули методи штучного інтелекту для управління сільськогосподарськими процесами, зокрема зрошенням. Серед них особливе місце посідає нечітка логіка (Fuzzy Logic), яка ефективно моделює невизначеність та нечіткі людські знання й експертні оцінки. Численні дослідження підтверджують ефективність застосування нечітких систем виводу для оптимізації зрошення. Зокрема, алгоритм нечіткого логічного виводу Мамдані (Mamdani Fuzzy Inference System – MFIS) часто використовується завдяки його інтуїтивно зрозумілій структурі та здатності оперувати лінгвістичними правилами типу «ЯКЩО – ТО».

Алгоритм Мамдані – це метод нечіткої логіки, запропонований у 1975 році. Його основне призначення полягає в обробці нечітких множин і нечітких правил, що дає можливість моделювати системи, де традиційні методи не працюють ефективно. Алгоритм заснований на правилах використання, які представляють логічне підтвердження про стан системи. Застосування алгоритму Мамдані в системах зрошення потребує розробки правил, які будуть враховувати кілька факторів, як-от рівень вологості ґрунту, температура, вид культури та кліматичні умови. На основі цих правил робиться висновок про необхідний об'єм води для зрошення. Застосування алгоритму Мамдані дає змогу адаптувати системи зрошення до поточних умов. Одним із прикладів є використання датчиків для виміру рівня вологості в ґрунті. На основі зібраних даних алгоритм автоматично обчислює необхідну кількість води, виходячи з правил, заданих спеціалістами. Крім того, алгоритм дає можливість інтегрувати знання та досвід агрономів у систему управління зрошенням, що підвищує її ефективність. Також використання алгоритму Мамдані сприяє більш широкому розумінню всіх факторів, що впливають на ефективність зниження, завдяки можливості моделювання різних сценаріїв.



Застосування нечіткої логіки в системах управління зрошенням може бути організовано в декілька етапів, включно зі створенням моделі, формулюванням правил, процесом логічного виведення та дефазифікацією.

Фазифікатор перетворює чіткі значення вхідних параметрів у нечіткі множини з відповідними ступенями належності. Для системи управління зрошенням було вибрано вхідні змінні: вологість ґрунту (W), температура повітря (T), вологість повітря (H) та прогноз опадів (P) – очікувана кількість опадів протягом наступних 24 годин. Вихідною змінною є інтенсивність опадів (I), що визначає тривалість роботи системи зрошення й вимірюється у відсотках від максимальної продуктивності (табл. 1).

Таблиця 1

Вхідні та вихідні змінні для керування зрошенням

Тип змінної	Лінгвістична змінна	Фізичний діапазон
Вхідна	Вологість ґрунту (W),	[0,100] %
Вхідна	Температура повітря (T)	[0,45] °C
Вхідна	Вологість повітря (H)	[0,100] %
Вхідна	Прогноз опадів (P)	[0,50] мм
Вихідна	Інтенсивність зрошення (I)	[0,100] %

Для кожної вхідної змінної було визначено лінгвістичні терми з відповідними функціями належності. Використовувалися трикутні та трапецієподібні функції належності через їхню простоту й обчислювальну ефективність (рис. 1):

$$T(W) = \{\text{дуже низька, низька, нормальна, висока, дуже висока}\};$$

$$T(T) = \{\text{низька, помірна, висока, дуже висока}\};$$

$$T(H) = \{\text{низька, помірна, висока}\};$$

$$T(P) = \{\text{відсутні, слабкі, помірні, сильні}\};$$

$$T(I) = \{\text{відсутнє, мінімальне, помірне, інтенсивне, максимальне}\}.$$

Параметри функцій належності були визначені на основі агротехнічних нормативів для основних сільськогосподарських культур і скориговані з урахуванням експертних оцінок спеціалістів.

Ядром системи Мамдані є база правил «ЯКЩО – ТО» (IF-THEN), які кодують знання агронома або експерта. Ці правила пов'язують нечіткі вхідні терміни з нечіткими вихідними термінами. База правил системи містить 48 нечітких правил типу «ЯКЩО – ТО», що описують стратегії прийняття рішень щодо зрошення. Правила формулюються в лінгвістичній формі та відображають експертні знання про оптимальні режими зрошення.

Приклади основних правил бази знань:

Правило 1. ЯКЩО ($W = \text{ДН}$) І ($T = \text{В}$) І ($H = \text{Н}$) І ($P = \text{Від}$) ТО ($I = \text{Макс}$): за критично низької вологості ґрунту, високої температури, низької вологості повітря та відсутності прогнозу опадів потрібне максимальне зрошення.

Правило 2. ЯКЩО ($W = \text{Н}$) І ($T = \text{ДВ}$) І ($H = \text{Н}$) І ($P = \text{Від} \vee P = \text{Сл}$) ТО ($I = \text{Інт}$): за низької вологості ґрунту, дуже високої температури та низької вологості повітря потрібне інтенсивне зрошення, навіть якщо очікуються слабкі опади.

Правило 3. ЯКЩО ($W = \text{Норм}$) І ($T = \text{П}$) І ($H = \text{П}$) І ($P = \text{Від}$) ТО ($I = \text{Мін}$): за нормальної вологості ґрунту та помірних температури й вологості повітря достатньо мінімального підтримувального зрошення.

Правило 4. ЯКЩО ($W = \text{В} \vee W = \text{ДВ}$) І ($P = \text{Пом} \vee P = \text{Сил}$) ТО ($I = \text{Від}$): за високої вологості ґрунту та прогнозу значних опадів зрошення не потрібне.

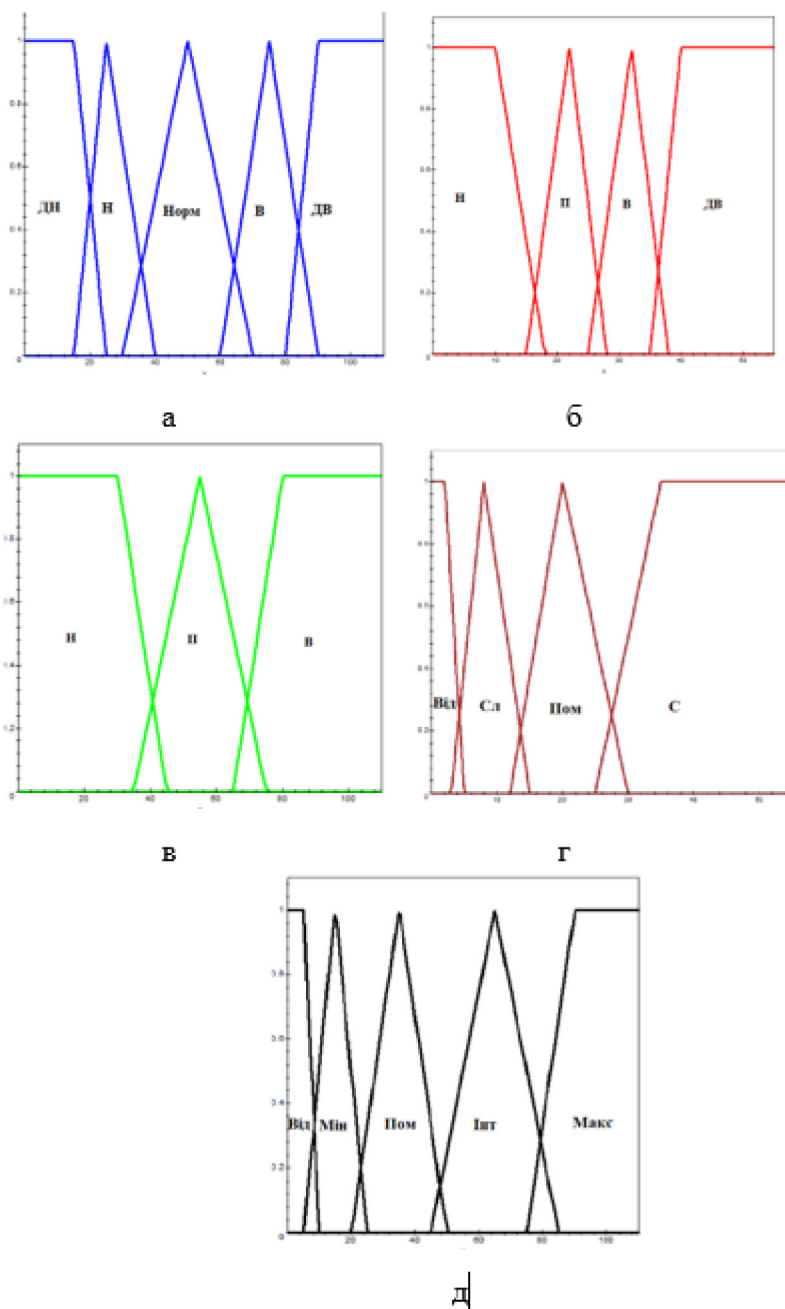


Рис. 1. Функції належності лінгвістичних змінних:

а – вологість ґрунту; б – температура повітря; в – вологість повітря; г – прогноз опадів; д – інтенсивність поливу

Правило 5. ЯКЩО ($W = \text{Норм}$) І ($T = \text{В}$) І ($H = \text{Н}$) І ($P = \text{Від}$) ТО ($I = \text{Пом}$): за нормальної вологості ґрунту, високої температури та низької вологості повітря потрібне помірне зрошення.

Повна база правил охоплює всі значущі комбінації вхідних параметрів і враховує їхній взаємний вплив на потребу в зрошенні. Правила організовані ієрархічно, де вологість ґрунту має найвищий пріоритет, оскільки є найбільш прямим індикатором потреби рослин у воді.

Застосування нечіткої логіки вимагає застосування процесів логічного висновку, щоб обробляти дані, що виконуються від датчиків. Логічний висновок у нечіткій логіці дає можливість зробити висновок про те, яку дію необхідно передбачити, на основі встановлених правил.



Алгоритм Мамдані використовує мінімакс-композицію для агрегації нечітких правил.

Крок 1. Агрегація анцедентів. Для кожного правила обчислюється ступінь істинності його умовної частини шляхом застосування операції мінімуму до ступенів належності всіх вхідних змінних.

Крок 2. Імплікація. Для кожного активованого правила виконується операція мінімуму. Між ступенем активації правила та функцією належного висновку.

Крок 3. Акумуляція. Результати всіх активованих правил об'єднуються в єдину нечітку вихідну множину шляхом знаходження максимуму об'єднаних функцій належності.

Крок 4. Дефазифікація перетворює об'єднану вихідну множину назад у чітке значення вихідної змінної – Інтенсивність поливу (І). Найпоширенішим методом дефазифікації для алгоритму Мамдані є метод центроїда, який обчислює центр площі під інтегрованою функцією належності.

Отримане чітке значення І (наприклад, 75 %) безпосередньо використовується системою керування для встановлення режиму поливу (відкриття клапана на 75 % або тривалість поливу).

Практичні дослідження підтверджують, що використання алгоритму Мамдані в системах зрошення дає змогу скоротити витрати водних ресурсів на 20–30 % без зниження рівня врожайності. Перевагою підходу є простота інтеграції у вже існуючі агротехнологічні системи, а також можливість адаптації до регіональних особливостей.

Інтеграція алгоритму Мамдані із сенсорними мережами та IoT-платформами забезпечує формування повністю автоматизованих систем управління зрошенням, здатних працювати в реальному часі. Це відкриває перспективи впровадження «розумних» фермерських господарств, орієнтованих на концепцію точного землеробства.

Висновки. Алгоритм Мамдані дає можливість ефективно керувати системою зрошення на основі нечітких правил, що враховують експертні знання агрономів. Запропонована концептуальна модель, що має вхідні параметри (вологість ґрунту, температура повітря, вологість повітря, прогноз опадів випаровування) та вихідну змінну (інтенсивність поливу), забезпечує гнучке й адаптивне керування процесом зрошення. Практична реалізація моделі показує її високу гнучкість, стабільність та економічну ефективність. Використання алгоритму Мамдані сприяє раціональному використанню водних ресурсів і зниженню енергоспоживання завдяки уникненню надмірного поливу.

Список використаних джерел

1. Домаскіна М. А. Теоретичні аспекти застосування теорії нечітких множин в економіці. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. № 2. С. 29–34.
2. Зінов'єва О. Г. Використання нечіткої логіки в системах прийняття рішень. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. № 1 (92). Ч. 2. С. 71–75.
3. Кузьменко О., Віткін, Л. Розроблення системи нечіткого логічного висновку прийняття управлінських рішень у випробувальних лабораторіях. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 2 (78). С. 275–285.
4. Леві Л. І. Використання нечіткої логіки для автоматизації функціонування зрошувальних систем. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 2. С. 153–157.
5. Лактіонов І. С., Вовна О. В., Бережний М. О., Лебедев В. А. Комп'ютеризована система комплексного моніторингу й керування мікрокліматом промислових теплиць на базі нечіткої логіки. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. № 3. С. 120–129.
6. Мартинова О. В. Використання теорії нечітких множин та багатокритерійного вибору альтернатив для опису діяльності підприємства в умовах невизначеності. *Інфраструктура ринку*. 2022. № 64. С. 89–94.
7. Чепіль Г. В., Панченко А. В. Класифікація та тренди застосування технології 4.0 аграрними підприємствами. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2024. № 1 (11). С. 153–163.



8. Souza Gilberto, Aquino Junior Plinio, Maia Rodrigo, Kamienski Carlos, Soininen Juha-Pekka. A fuzzy irrigation control system. GHTC. 2020.
9. Neugebauer Maciej, Akdeniz Cengiz, Demir Vedat & Yurdem Huseyin. Fuzzy logic control for watering system. *Scientific Reports*. 2023. No. 13.
10. González-Briones A., Castellanos-Garzón J.A., Mezquita Martín Y., Prieto J., Corchado J.M. A framework for knowledge discovery from wireless sensor networks in rural environments: A crop irrigation systems case study. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018.
11. Lavanya G., Rani C., Ganeshkumar P. An automated low cost IoT based Fertilizer Intimation System for smart agriculture. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2020. Vol. 28.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2025

Стаття прийнята 01.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



O. Zinovieva

Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

APPLICATION OF FUZZY LOGIC APPARATUS FOR OPTIMIZATION OF IRRIGATION SYSTEMS IN AGRICULTURE

Summary

This paper investigates the application of the Mamdani fuzzy inference algorithm for optimizing automated irrigation systems in agricultural crop production. The study addresses the critical problem of inefficient water resource utilization and the necessity for adaptive irrigation management that accounts for multiple variable factors. Modern agriculture faces unprecedented water scarcity challenges, with irrigation consuming approximately 70% of global freshwater resources, much of which is wasted due to inadequate control systems.

The study presents a conceptual model of an irrigation management system based on Mamdani-type fuzzy inference. The system uses linguistic input variables – soil moisture (very low, low, medium, high, very high), air temperature (low, moderate, high, very high), air humidity (low, moderate, high), and precipitation forecast (none, weak, moderate, strong) – to determine the output variable, irrigation intensity (none, minimum, moderate, heavy, maximum). Triangular and trapezoidal membership functions are defined for fuzzification, while the centroid method is used for defuzzification. A practical example of rule formation and inference is given to illustrate the adaptive nature of the approach

Simulation and field-level studies referenced in this paper demonstrate that fuzzy-based irrigation control can reduce water consumption by up to 30 % without compromising crop yield. The Mamdani model's main advantage lies in its interpretability: rules are easily constructed using expert agronomic knowledge, allowing transparent system behavior and easier calibration for local conditions.

The proposed methodology contributes to the broader field of precision agriculture and smart farming, supporting efficient use of water resources and environmental sustainability. Future work should focus on integrating fuzzy logic with machine learning algorithms for automatic tuning of membership functions and rules, and on validating such systems under diverse agro-climatic conditions in Ukraine and beyond.

Keywords: fuzzy logic, irrigation optimization, Mamdani algorithm, agricultural automation, intelligent systems.