УДК 004.032.26:574.5

К.В. Романовський
В.І. Перепелиця
С.В. Перепелиця

НЕЙРО-НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СТАНУ ЗАМКНЕНОЇ ВОДНОЇ ЕКОСИСТЕМИ З ВИДОВОЮ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У даній роботі досліджується запропонована модель оцінювання біобалансу домашнього акваріума як замкненої водної екосистеми у вигляді мобільної системи підтримки прийняття рішень. Також обґрунтовано перехід до нейро-нечіткої мережі на базі ANFIS, яка декомпозує вхідний простір показників на три підмоделі: токсичного навантаження, органічного навантаження та фізико-хімічного комфорту. Обґрунтовано запровадження видової нормалізації вхідних параметрів відносно перетину діапазонів толерантності гідробіонтів дає можливість використовувати навчену модель для акваріумів із численним видовим складом, а комбінований оператор агрегації унеможливлює маскування критичного стану виділеної групи параметрів.

Ключові слова: нейро-нечітка модель, ANFIS, система підтримки прийняття рішень, замкнена екосистема, видова нормалізація, якість води.

Abstract

This paper investigates the proposed model for assessing the biological balance of a home aquarium as a closed aquatic ecosystem within the framework of a mobile decision support system. Additionally, the transition to a neuro-fuzzy network based on ANFIS is justified, which decomposes the input parameter space into three submodels: toxic load, organic load, and physicochemical comfort. It is substantiated that the introduction of species-based normalization of input parameters relative to the intersection of hydrobiont tolerance ranges makes it possible to use the trained model for aquariums with a diverse species composition, whereas the combined aggregation operator prevents the masking of a critical state in a designated group of parameters.

Keywords: *neuro-fuzzy model, ANFIS, decision support system, closed ecosystem, species normalization, water quality.*

Вступ

Можливість виживання замкненої водної екосистеми є комплексом взаємозалежних гідрохімічних чинників. Зокрема, гостра токсичність амонійних сполук стрімко зростає при підвищенні водневого показника pH і температури, через що одна й та сама концентрація загального амонійного азоту може залишатися безпечною у слабокислій воді, але викликати летальне отруєння у лужній. Натомість наявні на ринку мобільні застосунки для акваріумістів працюють переважно як електронні записники, що лише фіксують виміри та звіряють кожен параметр окремо з певними нормами [1].

Відомі у сфері промислової аквакультури інтелектуальні системи моніторингу якості води використовують апарат нечіткого виведення. Але у розглянутих працях параметри функцій належності та продукційні правила задаються експертом вручну під один конкретний вид риб і залишаються незмінними. До того ж при одночасному аналізі восьми показників із трьома лінгвістичними термами однорівнева база знань налічувала б дуже багато правил, що робить надскладним як її експертну верифікацію, так і навчання на вибірці прийнятного обсягу [2, 3].

Метою дослідження є розробка нейро-нечіткої математичної моделі оцінки стану замкненої водної екосистеми, яка враховує нелінійну взаємодію параметрів і видовий склад гідробіонтів, підтримує навчання на даних та зберігає інтерпретованість правил.

Загалом, розробка спеціалізованих математичних моделей для непрямого оцінювання прихованих станів доводить свою високу ефективність під час проєктування сучасних програмних систем [4].

Результати дослідження

Вхідний вектор моделі складають виміряні користувачем певні параметри, а саме водневий показник pH, температура t, карбонатна (KH) і загальна (GH) жорсткість, концентрації загального амонійного азоту (TAN), нітритів і нітратів, а також біологічне навантаження B, розраховане за кількістю й розмірами гідробіонтів на одиницю чистого об'єму води. На етапі попередньої обробки частка високотоксичного неіонізованого аміаку обчислюється за рівнянням хімічної рівноваги Емерсона [5]:

$$pK_a = 0{,}09018 + \frac{2729{,}92}{T}; \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{(10\text{^}(pK_a - pH) + 1)}, NH_3 = f * TAN; \quad (2)$$

де T = t + 273,15 – абсолютна температура води, K; f – масова частка неіонізованої форми аміаку.

Щоб усунути залежність структури моделі від конкретного набору мешканців, вхідні показники проходять видову нормалізацію відносно діапазонів толерантності присутніх в акваріумі видів. Спільний допустимий коридор кожного двобічного параметра x визначається як перетин діапазонів усіх наявних видів s із множини мешканців S (тобто за найвимогливішим видом):

$$x_{\min} = \max_{s \in S} x_{\min}(s), \quad x_{\max} = \min_{s \in S} x_{\max}(s), \; x' = \frac{x - x_{opt}}{x_{max} - x_{opt}}, \text{при } x \geq x_{opt}; \quad (3)$$

де $x_{\text{opt}} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$ – середина спільного діапазону (при $x < x_{opt}$ у знаменнику використовується різниця $x_{opt} - x_{min}$). Безрозмірне значення $x' = 0$ відповідає оптимуму, а $|x'| = 1$– межі допустимого інтервалу. Завдяки цьому персоналізація забезпечується масштабуванням вхідної шкали без перенавчання ваг мережі.

Для подолання комбінаторного росту кількості правил модель побудовано за ієрархічним принципом (рис. 1).

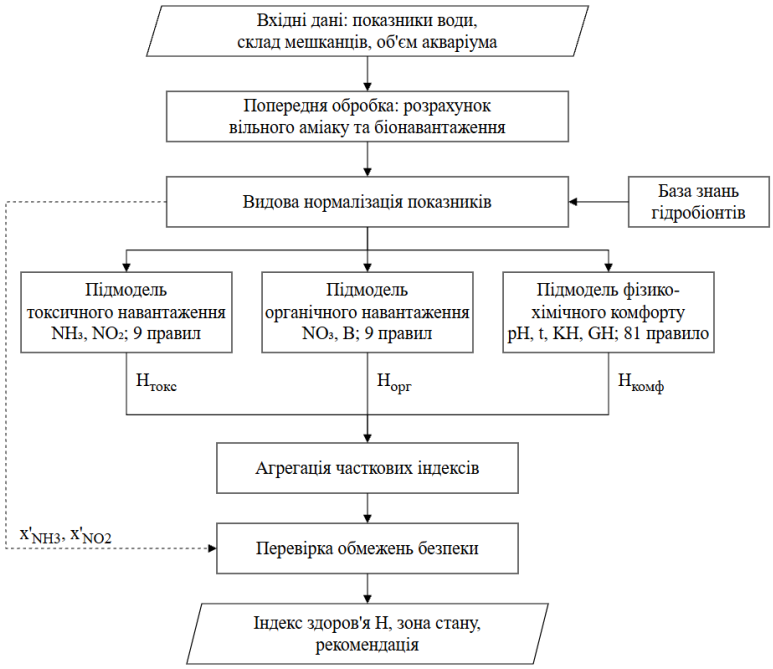

Рисунок 1 – Структура нейро-нечіткої моделі оцінки стану екосистеми

Підмодель токсичного навантаження аналізує вільний аміак NH_3 та нітрити NO_2^- (9 правил), підмодель органічного навантаження – нітрати NO_3^- та біонавантаження B (9 правил), а підмодель фізико-хімічного комфорту – pH, температуру, KH і GH (81 правило). Це скорочує базу знань із 6561 до 99 правил і дає змогу локалізувати групу причин погіршення стану для формування адресних порад.

Кожна з трьох підмоделей реалізована як система нечіткого виведення Такагі – Сугено першого порядку [6] з диференційовними гаусовими функціями належності. Висновки правил мають лінійний вигляд $f_i = p_{i1}x'_1 + \cdots + p_{im}x'_m + r_i$, а проміжний індекс k-ї підмоделі обчислюється як зважене середнє:

$$H_k = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}; \tag{4}$$

де w_i – ступінь активації і-го правила, розрахований через алгебраїчний добуток ступенів належності передумов. Параметри підмоделей (40 параметрів гаусіан і 459 коефіцієнтів висновків) оптимізуються гібридним алгоритмом навчання ANFIS [7]: лінійні параметри висновків знаходяться методом найменших квадратів із гребеневою регуляризацією у бік експертних оцінок, а центри й ширини функцій належності уточнюються градієнтним спуском на синтетичній вибірці з 12 000 сценаріїв із накладанням випадкового шуму крапельних тестів.

Для розрахунку інтегрального індексу здоров'я екосистеми H звичайне середнє арифметичне непридатне через ефект «затінення» [8], за якого небезпечний провал одного показника приховується високими оцінками інших груп. Тому застосовано комбінований оператор, що поєднує мінімум і зважене середнє:

$$\mathrm{H} = \alpha \min_k H_k + (1-\alpha)\sum_k v_k H_k; \tag{5}$$

де α = 0,6 – коефіцієнт песимізму агрегації; v_k – ваги підмоделей ($v_{\text{токс}}$ = 0,5; $v_{\text{орг}}$ = 0,3; $v_{\text{комф}}$ = 0,2).

Поверх моделі діє жорсткий запобіжник безпеки: при перевищенні граничної концентрації вільного аміаку або нітритів підсумковий індекс обмежується рівнем H ≤ 20. Встановлення жорстких граничних параметрів є класичним підходом при моделюванні впливу зовнішніх чинників на загальні характеристики системи для уникнення її критичних збоїв [9]. Залежно від значення H стан класифікується як зелена (75–100), жовта (40–74) або червона (0–39) зона. Порівняння роботи стандартного усереднення та оператора (5) на тестових сценаріях наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння операторів агрегації проміжних індексів на типових сценаріях

Експлуатаційний сценарій	$H_{\text{токс}}$	$H_{\text{орг}}$	$H_{\text{комф}}$	Середнє арифметичне	Комбінований оператор
Гостре отруєння аміаком	10	100	100	70,0 (жовта зона)	28,0 (червона зона)
Хронічне накопичення нітратів	95	50	100	81,7 (зелена зона)	63,0 (жовта зона)
Стабільний біобаланс	90	85	95	90,0 (зелена зона)	86,8 (зелена зона)

Результати таблиці 1 підтверджують, що у кризових сценаріях звичайне середнє помилково завищує оцінку на одну колірну зону, приховуючи загрозу для гідробіонтів, тоді як оператор (5) безпомилково переводить систему у відповідну зону тривоги і водночас не занижує бал у сприятливих умовах.

Висновки

Розроблено нейро-нечітку модель оцінювання стану замкненої водної екосистеми, яка враховує нелінійний вплив pH і температури на токсичність аміаку та автоматично адаптує пороги оцінки під видовий склад мешканців акваріума. Декомпозиція простору змінних на три підмоделі дозволила скоротити обсяг бази правил із 6561 до 99 продукцій і забезпечила адресне формування рекомендацій за групами чинників. Застосування комбінованого оператора агрегації разом із позамодельним обмеженням безпеки усуває ефект «затінення» критичних параметрів, а гібридне навчання з гребеневою регуляризацією зберігає фізичну інтерпретованість термів. Подальшою перспективою роботи є програмна імплементація моделі в кросплатформному мобільному застосунку на базі C#, Unity та SQLite і її доповнення модулем короткострокового прогнозування трендів. При розширенні функціоналу та інтеграції з хмарними сервісами також доцільним є перехід до розподіленої архітектури, яка доводить свою ефективність при проєктуванні сучасних цифрових застосунків [10].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Романовський, К. В., Перепелиця, В. І. Перспективи розробки чат-боту для догляду за домашнім акваріумом // Матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 березня 2025 р. Електрон. текст. дані. 2025. URI: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/24045.
2. Mastelini V., Queiroz T. R., Gabriel Filho L. R. A., Mollo Neto M. Control and management of water quality for Nile tilapia fish in net tanks based on fuzzy modeling. Brazilian Journal of Biosystems Engineering. 2023. Vol. 17. Art. 1197. DOI: https://doi.org/10.18011/bioeng.2023.v17.1197.
3. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Розробка та дослідження системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми апаратом fuzzy-logic. Сучасні інформаційні системи. 2021. Т. 5, № 4. С. 49–54. DOI: 10.20998/2522-9052.2021.4.07.
4. Рибачук І. О., Перепелиця В. І., Пашкевич А. О. Математична модель адаптивного тестування латентного рівня знань абітурієнтів у сучасному web-застосунку // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», м. Вінниця, 22-26 червня 2026 р. Електрон. текст. дані. 2026. URI: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/view/29824.
5. Emerson K., Russo R. C., Lund R. E., Thurston R. V. Aqueous ammonia equilibrium calculations: effect of pH and temperature. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1975. Vol. 32, No. 12. P. 2379–2383.
6. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. 15, No. 1. P. 116–132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.
7. Jang J.-S. R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1993. Vol. 23, No. 3. P. 665–685. DOI: https://doi.org/10.1109/21.256541.
8. Swamee P. K., Tyagi A. Describing water quality with aggregate index. Journal of Environmental Engineering. 2000. Vol. 126, No. 5. P. 451–455. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:5(451).
9. Козлов Л. Г. Вплив параметрів автоматизованого пристрою для формування цегли на його динамічні характеристики [Електронний ресурс] / Л. Г. Козлов, В. І. Перепелиця // Матеріали LI науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 31 травня 2022 р. – Електрон. текст. дані. – 2022. – Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2022/paper/view/15724
10. Обертинський А. М., Перепелиця В. І., Пашкевич А. О. Переваги мікросервісного підходу при проєктуванні сучасних цифрових онлайн-бібліотек // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», м. Вінниця, 22-26 червня 2026 р. Електрон. текст. дані. 2026. URI: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/view/29601

Романовський Кирило Володимирович – студент групи 2КН-25м, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: romanovskyi917@gmail.com.

Перепелиця В'ячеслав Ігорович – старший викладач кафедри Комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: perepelytsia@vntu.edu.ua.

Перепелиця Сніжана Вікторівна – викладач кафедри Іноземних мов, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Romanovsky Kyrylo Volodymyrovych – student of group 2KN-25m, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: romanovskyi917@gmail.com.

Perepelytsia Viacheslav Ihorovych – Senior Lecturer at the Department of Computer Science, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: perepelytsia@vntu.edu.ua.

Perepelytsia Snizhana Viktorivna – Lecturer at the Department of Foreign Languages, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.