

НЕЧІТКІ НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглядаються сучасні підходи до побудови та застосування нечітких нейронних мереж як гібридних моделей штучного інтелекту, що поєднують апарат нечіткої логіки та механізми навчання штучних нейронних мереж. Проаналізовано основні архітектури нейро-нечітких систем, зокрема моделі типу ANFIS, гібридні нейро-нечіткі системи, логічно-орієнтовані та глибокі нечіткі мережі. Розглянуто напрями практичного застосування нечітких нейронних мереж у задачах класифікації, регресії, прогнозування, прийняття рішень та інтелектуального керування. Показано, що використання нейро-нечітких моделей дозволяє досягти балансу між точністю, адаптивністю та інтерпретованістю результатів, що є важливим для сучасних інтелектуальних систем.

Ключові слова: нечітка логіка, нейронні мережі, нейро-нечіткі системи, ANFIS, оптимізація, штучний інтелект, інтерпретованість.

Abstract

The paper considers modern approaches to the design and application of fuzzy neural networks as hybrid artificial intelligence models that combine fuzzy logic theory and learning mechanisms of artificial neural networks. The main architectures of neuro-fuzzy systems are analyzed, including ANFIS models, hybrid neuro-fuzzy systems, logic-oriented fuzzy neural networks, and deep fuzzy networks. The main application areas of fuzzy neural networks in classification, regression, forecasting, decision making, and intelligent control are discussed. It is shown that neuro-fuzzy models provide a balance between accuracy, adaptability, and interpretability, which is essential for modern intelligent systems.

Keywords: fuzzy logic, neural networks, neuro-fuzzy systems, ANFIS, optimization, artificial intelligence, interpretability.

Вступ

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту обумовлює зростання вимог до моделей обробки даних, які повинні забезпечувати високу точність, адаптивність до змін середовища та можливість пояснення отриманих результатів. Класичні нейронні мережі демонструють значні успіхи у задачах класифікації, прогнозування та розпізнавання образів, проте їх застосування обмежується недостатньою інтерпретованістю та складністю формального аналізу.

Нечітка логіка, у свою чергу, дозволяє ефективно працювати з невизначеними та лінгвістично описаними даними, формалізуючи експертні знання у вигляді нечітких правил. Однак нечіткі системи зазвичай не мають механізмів самонавчання та адаптації.

Поєднання цих підходів привело до появи нечітких нейронних мереж – гібридних моделей, які поєднують здатність до навчання з можливістю інтерпретації результатів. Такі моделі набули широкого застосування у складних прикладних задачах, де важливими є як точність, так і пояснюваність [1].

Метою даної роботи є аналіз сучасних архітектур нечітких нейронних мереж, методів їх навчання та основних напрямів практичного застосування в системах штучного інтелекту.

Результати дослідження

Серед найбільш поширених архітектур виділяють ANFIS, гібридні нейро-нечіткі системи, логічно-орієнтовані нечіткі мережі та глибокі нечіткі моделі.

ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) є класичною архітектурою, яка реалізує систему нечіткого виводу типу Сугено у вигляді багатoshарової нейронної мережі з адаптивними параметрами. Вхідні змінні проходять етап фазифікації, де визначаються ступені належності до нечітких множин, після чого формується набір правил, що активуються з певною інтенсивністю. Подальша нормалізація дозволяє зважити внесок кожного правила у формування вихідного сигналу, а кінцевий результат обчислюється як зважена сума наслідкових функцій. Навчання ANFIS зазвичай здійснюється гібридним методом, який поєднує градієнтний спуск для налаштування параметрів

функцій належності та метод найменших квадратів для оптимізації лінійних коефіцієнтів у правилах. Така архітектура забезпечує високу точність апроксимації та відносно добру інтерпретованість, однак має обмежену масштабованість, оскільки кількість правил зростає експоненційно зі збільшенням кількості вхідних змінних [2].

Гібридні нейро-нечіткі системи є більш узагальненим класом моделей, у яких нечіткі логічні модулі та нейронні мережі можуть поєднуватися різними способами – у вигляді каскадних, паралельних або інтегрованих структур. У таких системах нейронна мережа може виконувати функції автоматичного налаштування параметрів нечіткої системи, генерації правил або оптимізації структури моделі, тоді як нечітка логіка забезпечує формалізацію експертних знань та пояснюваність рішень. Для навчання застосовуються як класичні градієнтні методи, так і еволюційні алгоритми, рої частинок або комбіновані підходи. Гібридні системи відзначаються високою гнучкістю та стійкістю до невизначеності, проте складність їх проектування та оптимізації може зростати зі збільшенням розмірності задачі.

Логічно-орієнтовані нечіткі нейронні мережі спрямовані на збереження чіткої семантичної інтерпретації внутрішніх компонентів моделі. У таких мережах нейрони, ваги та зв'язки безпосередньо відповідають нечітким логічним операціям, правилам або лінгвістичним змінним. Це дозволяє здійснювати аналіз прийнятих рішень, відновлювати структуру знань та формувати пояснення для користувача. Навчання таких мереж включає не лише оптимізацію числових параметрів, але й структурну перебудову правил і логічних зв'язків. Основною перевагою логічно-орієнтованих моделей є висока інтерпретованість і можливість інтеграції експертних знань, однак вони можуть поступатися за точністю та масштабованістю сучасним глибоким моделям [3].

Глибокі нечіткі нейронні мережі є сучасним напрямом розвитку нейро-нечітких технологій і поєднують принципи глибинного навчання з нечітким поданням інформації. У таких моделях нечіткі операції інтегруються в багатошарові архітектури, що дозволяє формувати ієрархічні представлення ознак та враховувати невизначеність на різних рівнях обробки даних. Нечіткі компоненти можуть бути вбудовані у згорткові, рекурентні або автоенкодерні мережі, забезпечуючи підвищену стійкість до шумів і неповноти даних. Навчання здійснюється за допомогою модифікованих алгоритмів зворотного поширення похибки у поєднанні з еволюційними або гібридними методами оптимізації. Основною перевагою глибоких нечітких мереж є висока точність і здатність працювати з великими масивами даних, однак складність їх інтерпретації та значні обчислювальні витрати залишаються актуальними проблемами [4].

Архітектурний вибір нечіткої нейронної мережі значною мірою визначається характером прикладної задачі, обсягом даних, вимогами до інтерпретованості та обчислювальних ресурсів.

Архітектура ANFIS найбільш ефективна для задач регресії, моделювання та адаптивного керування, де необхідна висока точність апроксимації та можливість інтерпретації отриманих правил. Завдяки фіксованій структурі та гібридним алгоритмам навчання ANFIS широко використовується у технічних системах, енергетиці, прогнозуванні параметрів технологічних процесів.

Гібридні нейро-нечіткі системи, що поєднують нейронні мережі з еволюційними та метаевристичними алгоритмами, застосовуються у складних оптимізаційних задачах, де просте градієнтне навчання є недостатньо ефективним. Вони особливо корисні для автоматичного налаштування структури мережі, кількості правил та параметрів функцій належності. Такі архітектури активно використовуються у задачах інтелектуального аналізу даних, фінансового прогнозування та складних виробничих систем.

Логічно-орієнтовані нечіткі нейронні мережі орієнтовані на збереження семантичної інтерпретованості моделей та можливість пояснення прийнятих рішень. Це робить їх придатними для експертних систем, медичної діагностики, правових та управлінських рішень, де прозорість алгоритмів є критично важливою.

Глибокі нечіткі мережі призначені для обробки великих обсягів складних, високорозмірних даних. Вони поєднують переваги глибинного навчання з механізмами нечіткої інтерпретації, що дозволяє застосовувати їх у комп'ютерному зорі, робототехніці, інтернеті речей та інтелектуальних інформаційних системах.

Висновки

Нечіткі нейронні мережі є перспективним напрямом розвитку штучного інтелекту, який забезпечує поєднання адаптивності, точності та інтерпретованості. Аналіз сучасних архітектур і

методів навчання підтверджує доцільність подальших досліджень у сфері гібридних нейро-нечітких моделей для створення ефективних інтелектуальних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fuzzy neural networks and neuro-fuzzy networks: A review the main techniques and applications used in the literature / A. K. S. Ahmed, M. A. Hossain, M. F. Hossain та ін. // *Applied Soft Computing*. – 2020. – Vol. 95. – Article 106507. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1568494620302155>
2. Стародуб О. В., Олійник В. В. Гібридний алгоритм навчання ANFIS-подібних нейромереж у задачах управління // *Адаптивні системи автоматичного керування*. – 2018. – № 2(33). – С. 45–54. – Режим доступу: <https://asac.kpi.ua/article/view/117715>
3. Logic-oriented fuzzy neural networks: A survey / X. Zhang, Y. Wang, H. Liu та ін. // *Expert Systems with Applications*. – 2024. – Vol. 238. – Article 122058. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417424019870>
4. Kumar R., Kumar A., Bansal J. Deep neuro-fuzzy system: application trends, challenges and future prospects // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 34. – P. 1–25. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9005344/>

Хмелівський Юрій Сергійович — аспірант кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: yuriikhmelivskiy@gmail.com

Іванчук Ярослав Володимирович — доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Khmelivskiy Yuriy Serhiyovych — postgraduate student of the Department of Computer Science, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: yuriikhmelivskiy@gmail.com

Ivanchuk Yaroslav V. – Dr. of Technical Science, Professor of Department for Computer Science, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.