

```
## Warning in grepl(db, input): input string 43 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 44 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 45 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 48 is invalid in this locale
## Warning in grepl(db, input): input string 53 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\bibliography.", input, value = TRUE): input
string 43 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\bibliography.", input, value = TRUE): input
string 44 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\bibliography.", input, value = TRUE): input
string 45 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\bibliography.", input, value = TRUE): input
string 48 is invalid in this locale
## Warning in grep("^\\\\bibliography.", input, value = TRUE): input
string 53 is invalid in this locale
```

## ВСТУП

Кінець XX століття характеризується помітним сплеском досліджень в області штучних нейронних мереж завдяки тому, що, з одного боку, у другій половині 1980-их років був відкритий алгоритм зворотного поширення похибки, внаслідок чого вдалося подолати критичні зауваження Мінського і Пайперту [13], а з іншого – через те, що з року у рік справджувався закон Муру, дозволяючи персональним комп'ютерам проводити дедалі складніші обчислення. У 1990-ті роки теорія штучних нейронних мереж стрімко розвивається, а отримані результати успішно застосовуються для вирішення широкого кола завдань ідентифікації, прогнозування, управління, кластерування та класифікування. Однак, в той же час, стають чітко зрозумілими недоліки традиційних нейромережових архітектур: велика обчислювальна складність, абсолютна неінтерпретіруемість результатів, емпіричний характер вибору архітектури мережі для вирішення будь-якої задачі. У зв'язку з цим застосування нейронних мереж в певному ряді випадків неефективно. З середини 1990-их років по справжній момент у світі активно ведуться дослідження з розробки методів, що дозволяють подолати зазначені недоліки. Останнім часом все більшої популярності набувають так звані гібридні нейро-фаззі мережі, що об'єднують в собі переваги нейромережового підходу і систем нечіткого висновування.

**Актуальність теми.** Традиційно під гібридними нейро-фаззі мережами розуміють штучні нейронні мережі з можливістю той чи інший спосіб отримувати знання про те, за якими правилами проводиться генерація вихідного сигналу. Таким чином вирішується проблема неінтерпретіруемості результатів, однак, слід зазначити, що гібридні нейро-фаззі системи не здатні працювати в реальному режимі часу, а крім того часто є адаптивними лише з тієї точки зору, що можуть налаштовувати свої синаптичні вагові коефіцієнти

в процесі навчання, не маючи при цьому механізмів структурної адаптації. Метою даної роботи є розробка гібридних еволюційних нейро-фаззі архітектур, а також методів їх налаштування і навчання, що дозволяють подолати обмеження як традиційних, так і існуючих гібридних нейро-фаззі мереж.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетних тем «Еволюційні гібридні системи обчислювального інтелекту зі змінною структурою для інтелектуального аналізу даних» (№ ДР 0110U000458) та «Нейро-фаззі системи для поточної кластеризації та класифікації послідовностей даних за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями» (№ ДР 0113U000361), які виконувалися згідно указу Міністерства освіти і науки України за результатами конкурсного відбору проектів наукових досліджень. В рамках зазначених НДР здобувачкою в якості виконавця розроблено модифікації гібридних архітектур та адаптивні методи їх навчання для вирішення задач прогнозування, емуляції та кластерування в on-line режимі.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка гібридних еволюційних штучних нейро-фаззі мереж і методів їх навчання з підвищеною швидкодією і можливостями інтерпретації вихідного сигналу, а також параметричної та структурної адаптації в режимі послідовної обробки інформації. Поставлені цілі досягаються шляхом вирішення таких основних завдань:

- аналіз існуючих методів структурної адаптації нейронних мереж;
- розробка гібридних штучних нейронів з підвищеною швидкодією, а також методів їх навчання;
- імітаційне моделювання розроблених архітектур і методів їх навчання, розв'язання практичних завдань.

*Об'єктом дослідження* є процес динамічного інтелектуального аналізу даних.

*Предметом дослідження* є гібридні нейромережі та нейро-фаззі систе-

ми, що призначені для вирішення задач динамічної інтелектуальної обробки нестационарних нелінійних сигналів, зокрема багатовимірних, за умов невідомості, та методи їх навчання.

*Методи дослідження.* Теорія штучних нейронних мереж, що дозволила синтезувати нові еволюційні архітектури нейронних мереж, нечітка логіка, що дала можливість реалізувати нечіткий висновок на основі розроблених архітектур, теорія оптимізації, що забезпечила розробку методів настройки синаптичних ваг з підвищеною швидкістю і стійкістю до зашумленими даними для пропонувані в рамках дисертаційної роботи зростаючих нейронних мереж, а також апарат математичної статистики, спираючись на який, була проведена систематизація та використання отриманих в результаті роботи даних для наукових і практичних висновків.

**Наукова новизна отриманих результатів.** До нових, одержаних особисто авторкою, належать такі результати:

- вперше запропонована архітектура багатовимірного нео-фаззі нейрона та метод його навчання, що забезпечують підвищену швидкість налаштування синаптичних ваг та додаткові згладжуючі властивості;
- запропоновані архітектура та методи навчання гібридної каскадної нейронної мережі з оптимізацією пулу нейронів (як одновимірних так і багатовимірних) у кожному каскаді, що реалізують оптимальний за точністю прогноз нелінійних стохастичних і хаотичних сигналів у онлайн режимі;
- вперше запропонований розширений нео-фаззі нейрон, який дозволяє реалізовувати нечітке висновуння за Такагі-Сугено довільного порядку, що має покращенні апроксимуючі властивості;
- запропонована архітектура і метод самонавчання еволюційної каскадної нейро-фаззі системи для послідовного кластерування потоків даних з автоматичним визначенням поточно оптимальної кількості кластерів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропоновані в роботі архітектури та адаптивні методи навчання еволюційних мереж і нейро-фаззі мереж, що забезпечують оптимальну точність вихідного сигналу в умовах апріорної та поточної невизначеності і можуть бути використані в різних областях, де дані представлені в числовій формі у вигляді таблиць «об’єкт-властивість» або часових послідовностей в режимі послідовної або пакетної обробки. Використання комплексу запропонованих адаптивних методів навчання та архітектур дозволяє підвищити ефективність застосування еволюційних штучних нейронних мереж та нейро-фаззі систем для вирішення задач прогнозування та ідентифікації даних різної фізичної природи та кластерування у послідовному режимі. Отримані теоретичні результати були досліджені експериментально на тестових і реальних даних, де показали свою перевагу над відомими у світовій практиці методами. Запропоновані гібридні нейромережеві архітектури, а також методи їх самонастроювання і навчання реалізовані у вигляді програмних засобів.

Синтезовані в роботі методи підтвердили свою ефективність в задачі прогнозування витрат нормогодин на ремонті роботи візків вагонів 61-425, 61-181, 47Д та 47К. Результати досліджень впроваджені у ТОВ «Харківський вагонобудівний завод», м. Харків, що підтверджено відповідним актом (акт від 11.10.2015). Також пропонується самонавчана гібридна нейро-фаззі система, що еволюціонує, використовується для вирішення задачі розпізнання зображень та впроваджена у ТОВ «Факторіал Комплексіті», м. Харків, що підтверджено актом впровадження від 01.09.2015.

**Особистий вклад здобувача.** Усі положення, що виносяться на захист, основні результати теоретичних та експериментальних досліджень отримані здобувачем особисто. Їх основний зміст викладено у роботах [1–12, 14]. Внесок авторки в публікаціях, написаних у співавторстві такий: У [12] запропонована архітектура LS-FSVM-NFN системи, що ґрунтується на нео-фаззі нейронах, і дозволяє використовувати методи оптимізації другого порядку, у [14] запропонована структура адаптивного нео-фаззі-предиктора та багато-

вимірного нео-фаззі-нейрона, у [1] удосконалені методи навчання гібридної каскадної системи, що дозволяють обробляти потоки даних у послідовному режимі, у [2] запропонована архітектура багатовимірної нейро-фаззі системи з оптимізованим пулом нейронів, у [3] запропоновані методи навчання гібридної каскадної нейронної мережі, що забезпечують обчислювальну простоту та характеризуються як слідкуючими, так і фільтруючими властивостями, у [4] удосконалені методи навчання гібридної нейро-фаззі системи для оброблення нестационарних стохастичних та хаотичних сигналів нелінійних об'єктів з необхідною точністю, у [5] запропонована модифікація нео-фаззі нейрону ENFN з поліпшеними апроксимуючими властивостями, що реалізовує нечітке висновуння за Такагі-Сугено довільного порядку, у [6] запропонована архітектура нейро-фаззі системи, що еволюціонує, для вирішення задачі нечіткого кластерування потоків даних, у [7] вдосконалені методи навчання гібридної нейронної мережі для вирішення задачі адаптивного оброблення нелінійних часових рядів, що поєднують у собі високу швидкодію та фільтруючі властивості, у [8] вдосконала архітектура системи зі змінною кількістю вузлів у каскадах, у [9] запропонована архітектура каскадної нейро-фаззі мережі, що ґрунтується на розширених нео-фаззі нейронах, у [10] запропонований метод самонавчання гібридної нейро-фаззі системи для кластерування даних високої розмірності у послідовному режимі, у [11] запропонована архітектура нейро-фаззі системи, що еволюціонує, для вирішення задачі нечіткого кластерування потоків даних.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на VII міжнародній школі-семінарі «Теорія прийняття рішень»: (Ужгород 2014), міжнародній науковій конференції Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта ISDMCI'2015 (Херсон 2015), міжнародній конференції Advances in Data Science. International Workshop and Networking Event (Holny Mejera, Poland, 2015), та міжнародній конференції «on "Computer Science & Information Technologies-CSIT'2015» (Львів 2015).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових роботах: 1 розділ монографії, 7 статей у періодичних виданнях з технічних наук, включених до переліків МОН України, у тому числі 6 статей у в журналах, що входить до міжнародних наукометричних баз, 5 публікації у працях конференцій.

Оскільки сучасні обчислювальні технології дозволяють накопичувати і обробляти досить великі масиви інформації, то на перший план виходить швидкість обробки даних, а також можливість роботи з ними в послідовному режимі. Крім того варто зазначити, що інформація, яка обробляється, може характеризуватися нелінійним і нестационарним характером даних. У таких випадках доцільно використання штучних нейронних мереж, які володіють універсальними апроксимуючими властивостями. Застосування апарату нечіткої логіки дозволяє розширити функціональні можливості штучних нейронних мереж і коло вирішуваних завдань. Завдання дослідження полягає в розробці архітектур нейро-фаззі мереж і методів їх навчання, що володіють високою гнучкістю налаштування параметрів для інтелектуального аналізу даних в умовах невизначеності. Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути наступні питання:

1. Аналіз існуючих нейро-фаззі архітектур і методів їх навчання.
2. Розробка спеціалізованих штучних нейронів, які мають підвищену (порівняно з традиційними нейронами) швидкістю навчання, швидкодії, а також здатних ефективно вирішувати завдання прогнозування, ідентифікації і класифікації в умовах апіорної і поточної невизначеності.
3. Розробка на основі цих нейронів штучних нейронних мереж зі зростаючою архітектурою та методів їх навчання.
4. Дослідження методів і способів, що дозволяють виконати гібридизацію (перехід від нейро до нейро-нечіткої системи).
5. Розробка методів навчання, що дозволяють гібридній нейро нечіткої зростаючої архітектурі функціонувати в режимі послідовної обробки

інформації.

6. Проведення імітаційного моделювання розроблених методів і архітектур та рішення з їх допомогою практичних завдань.

## **Висновки до розділу ??**

1. Розглянуто гібридні нейро-фаззі системи для вирішення завдань обробки інформації за умови апіорної і поточної невизначеності. У якості головного недоліку таких систем виділено відсутність ефективних способів настройки архітектури з можливістю функціонувати в режимі послідовної обробки інформації.
2. Проаналізовано стан проблеми кластерування даних і розглянуті існуючі підходи до її вирішення. Розглянуто основні принципи нечіткої логіки та систем нечіткого висновування. Проаналізовані існуючі архітектури штучних нейронних мереж і методи їх самонавчання, що використовуються для вирішення завдань кластерування даних
3. Проведено аналіз існуючих конструктивних і деструктивних методів структурної адаптації нейронних мереж. Виділено їх сильні і слабкі сторони. Обґрунтовано доцільність використання конструктивних алгоритмів для синтезу систем, що мають функціонувати в режимі послідовного оброблення даних.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [2] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [3] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [4] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [5] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [6] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [7] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [8] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [9] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [10] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [11] Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. Recursive fuzzy clustering algorithms // Proc. 10th East West Fuzzy Colloquium. — 2002. — P. 276–283.
- [12] Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Kopaliani D. The least squares support vector machine based on a neo-fuzzy neuron. — Cambridge, Mass. : Computational Models for Business and Engineering Domains. Ed. G. Setlak, K. Markov., 2014. — P. 44–51.

- [13] Minsky M. Perceptron. — Cambridge, Mass. : M.I.T. Press, 1971.
- [14] Є.В Бодянський, Тищенко О.К., Копаліані Д.С. Прогнозування багатовимірних нестационарних часових рядів на основі адаптивної нео-фаззі-моделі // Вісник НУ «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». — 2012. — РЇ. 312–318.