

УДК 303.064:624.02

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.205364

## АДАПТАЦІЯ СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ВИВЕДЕННЯ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА

Картавих С. М., Командиров О. В., Куліков П. М., Плоский В. О., Полтораченко Н. І., Теренчук С. А.

Основним завданням, на вирішення якого орієнтована робота, є автоматизація системи нечіткого виведення, яка являє собою одну з підсистем системи оцінки технічного стану об'єктів будівництва. Запропонована система оцінки призначається для служб, які спеціалізуються на проведенні будівельно-технічних експертиз. Процес проведення експертиз у цій галузі супроводжується невизначеністю різного характеру, а продукційна діяльність фахівців часто ґрунтується на евристичних. Саме тому, об'єктом дослідження є моделі та засоби, що здатні функціонувати нечітких умовах. Для автоматизації експертної діяльності в сфері оцінки впливу зовнішніх факторів на технічний стан об'єктів ущільненої міської забудови спроектовано спеціалізовану систему оцінки, засновану на знаннях і штучній нейро-нечіткій мережі категорії Takagi-Sugeno-Kang. Застосування нейро-нечітких моделей для нечіткого виведення надає змогу автоматизувати процес одержання логічних висновків із вхідних даних за заданими експертами нечіткими правилами. При цьому налаштування функцій приналежності може здійснюватись за допомогою штучних нейронних мереж. Нечітка нейронна мережа Takagi-Sugeno-Kang призначається для вирішення цієї задачі. Доцільність використання цієї моделі до вирішення задачі оцінки технічного стану об'єктів будівництва з пошкодженнями обґрунтована її здатністю до розв'язання задачі нечіткої класифікації. Другим основним критерієм вибору цієї моделі стала можливість задавати правила функцією входів, оскільки в умовах ущільненої міської забудови фактори впливу зовнішнього середовища на технічний стан об'єктів носять складний нелінійний характер. Принцип адаптації системи нечіткого виведення показано на прикладі фазифікації впливів зовнішнього середовища, що спричиняються вібраціями різного характеру. Проведені в роботі дослідження, на відміну від попередніх, розширюють базу знань системи за рахунок представлення інформації про реальний стан середовища, в якому функціонують об'єкти будівництва. Очікується, що застосування штучної нейронної мережі Такаґи-Сугено-Канґа надасть можливість суттєво знизити вплив людського фактору на виконання будівельно-технічних експертиз, які виконуються в умовах композиційної невизначеності. Практична значимість роботи полягає в скороченні термінів проведення та підвищенні надійності оцінки технічного стану об'єктів будівництва з пошкодженнями різного характеру.

**Ключові слова:** система нечіткого виведення, спеціалізована інтелектуальна система, ущільнена міська забудова, штучна нейронна мережа.

## 1. Вступ

Сучасна практика будівництва в умовах ущільненої міської забудови виявила зростання кількості задач, які пов'язані зі зміною комплексу навантажень і впливів на об'єкти будівництва (об'єкти). Вчасне проведення ефективних заходів з адаптації цих об'єктів до зовнішніх умов, що не враховувались при проектуванні та зведенні потребує оцінки їх технічного стану. Рекомендації щодо подальшої експлуатації таких об'єктів передбачають прогнозування характеру розвитку та ступеня небезпеки виявлених дефектів.

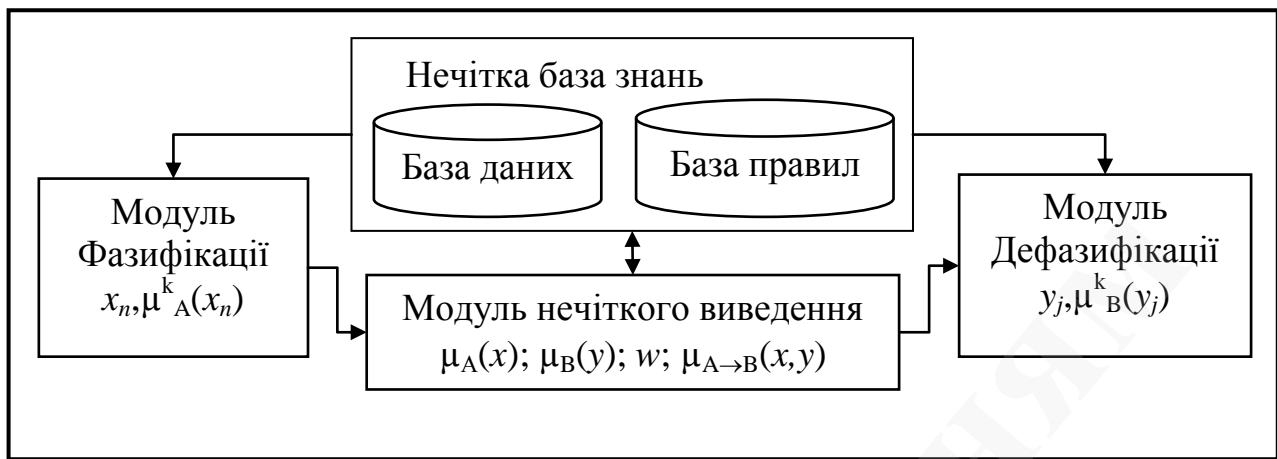
Таке прогнозування обґрунтовується системою правил, які визначаються в кожному конкретному випадку. Фахівці знають, яку систему правил необхідно використовувати в конкретному випадку для урахування можливих впливів зовнішнього середовища та здатні надавати рекомендації щодо подальшої експлуатації об'єктів навіть в умовах невизначеності. Проте, такі рекомендації базуються на спеціальних знаннях і евристичних.

Використання не достатньо формалізованих спеціальних знань в комп'ютеризованих комплексах потребує розробки та впровадження в експертну діяльність застосунків, які здатні відтворювати продукційне мислення експертів. Це означає, що адаптація системи нечіткого виведення до вирішення задачі оцінки технічного стану об'єктів будівництва лишається актуальним і своєчасним завданням [1, 2]. Але, одним із суттєвих недоліків систем нечіткого виведення є те, що вони не здатні автоматично здобувати знання, що використовуються в механізмах виведення. Подолання вищезазначених проблем вбачається в розробці системи оцінки технічного стану об'єктів з нейро-нечіткою системою виведення, в якій виведення виконується методами нечіткої логіки, а функції приналежності налаштовуються за допомогою штучної нейромережі [3]. Саме тому, *об'єктом дослідження* є моделі та засоби, що здатні до вирішення задачі нечіткої класифікації. *А мета роботи* полягає в концептуальному моделюванні спеціалізованої інтелектуальної системи з нейро-нечіткою системою виведення та її адаптації до вирішення задачі оцінки технічного стану об'єктів будівництва в умовах ущільненої міської забудови.

## 2. Методика проведення дослідження

Методика адаптації системи нечіткого виведення до задачі оцінки технічного стану об'єктів будівництва базується на застосуванні нечітких правил в нечіткому логічному базисі. Це надає можливість формалізувати процес оцінки технічного стану об'єктів і побудувати систему нечітких моделей, що відтворюють нечіткі логічні міркування експертів. В подальшому ці моделі формують онтологію системи [3].

На рис. 1 показано модель системи нечіткого виведення, яка являє собою систему управління, що базується на нечіткій логіці [4].



**Рис. 1.** Модель системи нечіткого виведення

Структура системи та принцип налаштування параметрів і правил із застосуванням універсальних програмних комплексів описані в [4, 5].

В роботах [6] показано можливість застосування систем нечіткого виведення до розв'язання різних прикладних задач, але використання подібних систем потребує адаптації нечіткої бази знань до вирішення таких задач предметної області, як [7, 8]:

- інтерпретація знань;
- фазифікація та дефазифікація даних;
- формалізація правил для формування можливих висновків.

Для фазифікації та дефазифікації даних в базі даних системи (рис. 1) мають зберігатись функції приналежності для всіх вхідних і вихідних змінних ( $\mu_A = \{\mu_A(x_1); \dots; \mu_A(x_n); \dots; \mu_A(x_N)\}$  і  $\mu_B = \{\mu_B(x_1); \dots; \mu_B(x_k); \dots; \mu_B(x_K)\}$ ) та вагові коефіцієнти правил ( $w$ ), які використовуються для одержання висновків ( $A \rightarrow B$ ).

Для формалізації нечітких правил, згідно з якими будуються висновки та визначаються їх міри приналежності ( $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ ), в системах нечіткого виведення використовуються нечіткі імплікації або продукційні моделі [4].

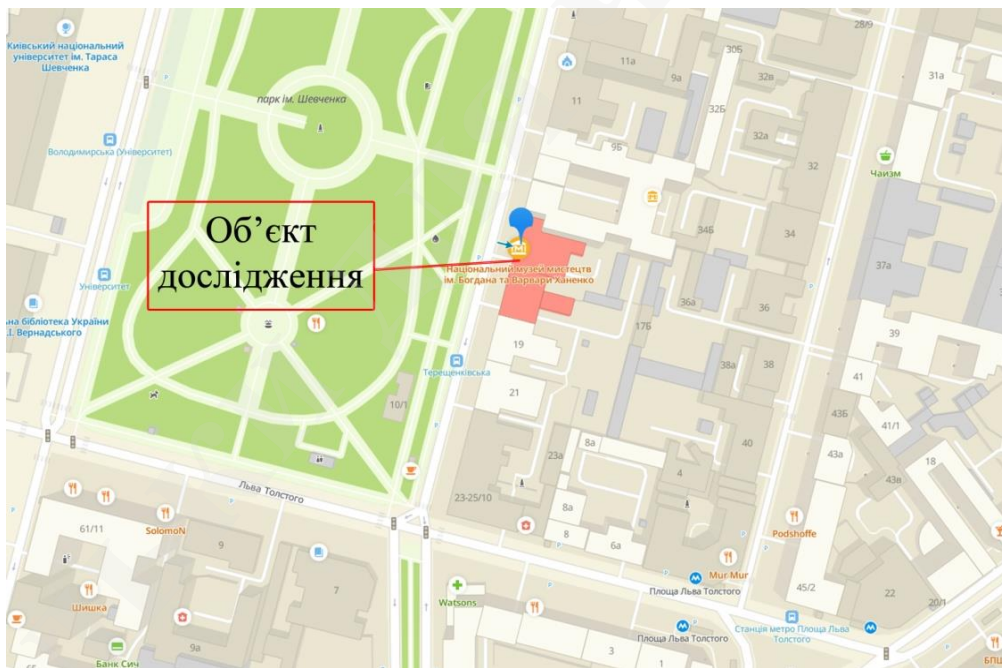
Принцип формування бази правил, що відтворюють нечіткі логічні міркування експертів при вирішенні завдань забезпечення надійності та експлуатаційної придатності об'єкта на етапі експлуатації показано в [5, 7]. Проте, в цих роботах основна увага приділяється питанням фазифікації геометричних параметрів пошкоджень конструктивних елементів об'єктів і нечіткому виведенню логічних висновків за цими вхідними даними. До того ж, оцінка технічного стану об'єкта в цілому потребує застосування іншої системи правил, які визначаються ступенем зниження несучої здатності конструкцій з урахуванням впливу різних факторів зовнішнього середовища в кожному окремому випадку.

У [8] формалізовано процес нечіткого виведення для задачі оцінки міри впливу ремонтно-будівельних робіт на погіршення технічного стану об'єктів, що опинились поряд. Але задача оцінки впливу факторів антропогенного та природнього характеру на технічний стан об'єктів не обмежується ремонтно-будівельними роботами.

В [9] досліджуються питання впливу зовнішнього середовища на швидкість процесів деградації будівельних матеріалів і запропоновано інформаційну технологію діагностики залізобетонних конструкцій з використанням інтегрованої системи автоматизації проектувальних робіт. Запропонована система здатна функціонувати в режимі реального часу, але її розробка та впровадження потребує наповнення бази знань реальними даними.

Системний аналіз інформації, що містяться в звітах про результати обстеження технічного стану існуючих об'єктів надає можливість експертним методом встановити міри приналежності вхідних даних і наповнити базу даних системи нечіткого виведення реальними даними. Систематизовані висновки експертів про ймовірні причини погіршення технічного стану різних об'єктів, що експлуатуються в різних умовах узагальнюються і формалізуються у вигляді нечітких моделей, які формують базу правил для оцінки об'єктів-аналогів.

На рис. 2 показано розміщення одного з об'єктів дослідження на прикладі будівлі Національного музею мистецтв імені Богдана та Варвари Ханенків (м. Київ, Україна).



**Рис. 2.** Розміщення об'єкту дослідження на фрагменті карти Києва (Україна)

Технічний стан будівлі (Україна, м. Київ, вул. Терещенківська, 15–17) досліджувався у зв'язку з реконструкцією.

Фрагмент результатів обробки вхідних змінних показано в табл. 1.

Оскільки в цій роботі основна увага приділяється задачам оцінки технічного стану об'єктів, які експлуатуються в умовах ущільненої міської забудови, то в першу чергу, досліджувались загальні властивості та характерні особливості суттєвих факторів впливу середовища на технічний стан об'єкта.

До таких факторів, в перше чергу, слід віднести вібрації різного характеру.

Таблиця 1

Фрагмент фазифікації факторів впливу середовища на технічний стан об'єкта

№	Джерело вібрацій	Характеристики впливу ( $X=\{x_1; \dots; x_l\}$ )	Міра $n$ -го впливу на $k$ -те пошкодження ( $\mu_A^k(w_n)$ )
1	рух транспорту по вулиці Терещенківська	частота ( $x_1$ )	не суттєвий ( $n=1$ )
2	функціонування метрополітену	амплітуда ( $x_2$ )	помірний ( $n=2$ )
		відстань до джерела ( $x_3$ )	середній ( $n=3$ )
3	ремонтно-будівельні роботи, що проводяться у зв'язку з реконструкцією	умови поширення ( $x_4$ )	значний ( $n=4$ )
		терм загальний ( $w_n$ )	критичний ( $n=5$ )
			перевищує критичний ( $n=6$ )

Джерелами вібрацій можуть бути різні природні явища, транспортні мережі, будівельна діяльність та інші явища техногенного характеру.

Ці фактори впливу можуть спричинити розвиток негативних процесів, оцінка міри впливу яких на технічний стан об'єктів ускладнюється тим, що [7]:

- не існує чіткої границі між мірами впливу на об'єкт вібрацій різного походження;
- зростає ймовірність ситуації, коли окремі фактори середовища слабо впливають на вихідну ознаку, а їх спільний вплив є значним і носять складний нелінійний характер.

Таким чином, урахування характерних особливостей зовнішніх факторів впливу на технічний стан об'єктів міської забудови показали доцільність вибору для інтеграції в систему оцінки такої штучної нейромережі, яка:

- розроблялась для вирішення задачі нечіткої класифікації;
- здатна до обробки функцій, що носять складний нелінійний характер.

Раніше в [7], на основі аналізу здатності штучних нейромереж різної архітектури до вирішення різних задач, було запропоновано використовувати для оцінки технічного стану будівельних конструкцій з пошкодженнями штучну нечітку нейромережу Takagi-Sugeno-Kang. Ця модель розраховує вихідний результат за допомогою функції входів Такаґи-Сугено-Канґа [10].

Окрім того, штучна нейромережа Takagi-Sugeno-Kang інтегрується з системою нечіткого логічного виведення Сугено [2, 10], яка є більш раціональною для побудови правил виведення при діагностуванні технічного стану об'єктів, якщо в результаті обстежень вхідні дані задані чіткими величинами.

Такий вибір моделі надає можливість [7, 10]:

- задавати правила, що відображають вплив середовища на технічний стан об'єкта, функцією входів;
- урахувати нелінійний характер динаміки розвитку пошкоджень за рахунок використання нелінійного вхідного шару.

В роботі [7] також:

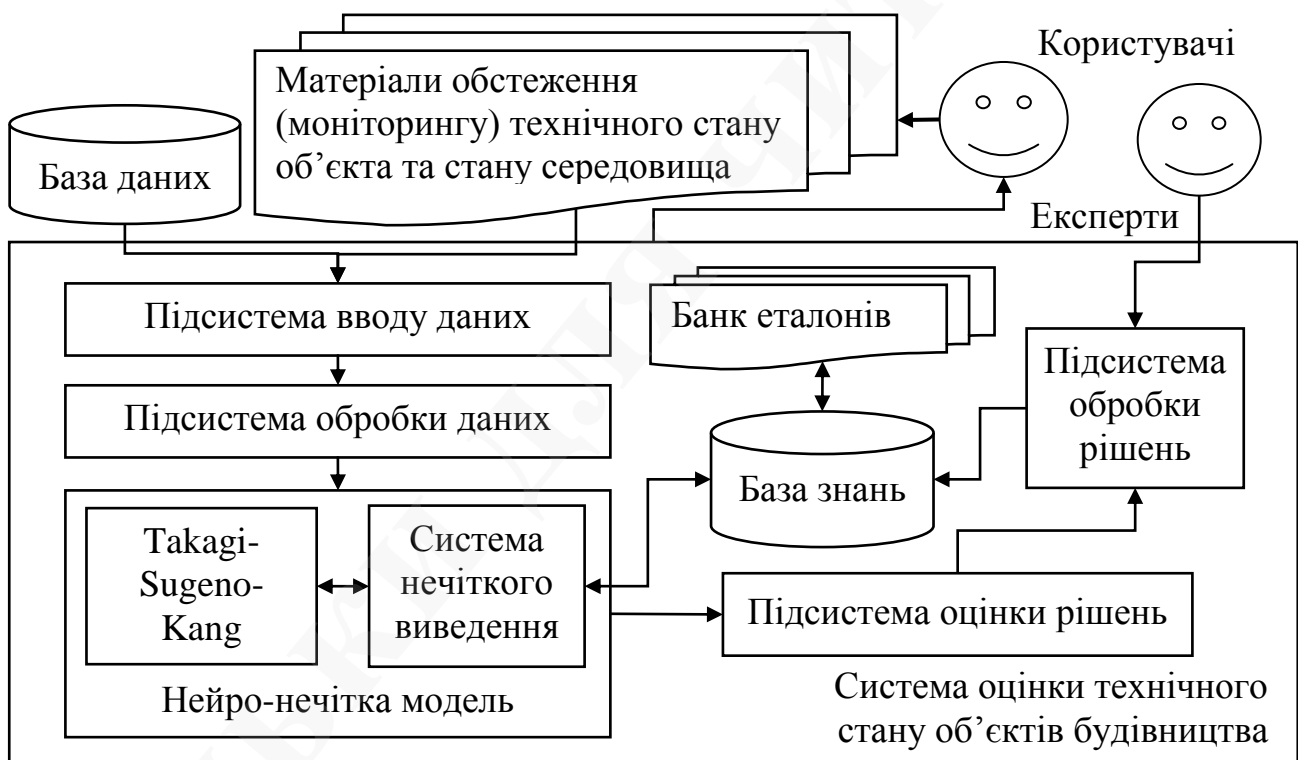
- визначено архітектуру мережі;

- надано правило, згідно з яким визначається кількість нейронів вхідного та вихідного шарів;
- описано структуру зв'язків і призначення нейронів кожного з шарів;
- обґрунтовано вибір методу навчання мережі.

Таким чином, в [7] показано, що навчену нечітку нейронну мережу Takagi-Sugeno-Kang доцільно використовувати в інтелектуальних системах оцінки технічного стану об'єктів з пошкодженнями, що експлуатуються в умовах ущільненої міської забудови.

### 3. Результати дослідження та обговорення

Модель структури системи оцінки технічного стану об'єктів будівництва з інтегрованою штучною нейро мережею Takagi-Sugeno-Kang показано на рис. 3.



**Рис. 3.** Схема інтеграції штучної нейронної мережі Takagi-Sugeno-Kang в систему оцінки технічного стану об'єктів будівництва

Користувачами системи оцінки є експерти, що здійснюють оцінку технічного стану об'єкта будівництва.

Експертами на рис. 3 зображені фахівці, які забезпечують надійну роботу системи, а саме:

- наповнюють базу знань системи спеціальними знаннями на етапі розробки,
- контролюють адекватність налаштування функцій приналежності на етапі навчання;
- врегульовують конфліктні питання (у разі їх виникнення) на етапі експлуатації.

Вхідні дані надходять в систему оцінки через підсистему вводу вхідних даних з бази даних та від служб, що забезпечують обстеження технічного стану об'єктів. При цьому передбачається, що зовнішня база даних містить необхідну

інформацію для наповнення бази знань системи оцінки технічного стану об'єктів будівництва у відповідності до задачі, що вирішується.

Банк еталонів містить шаблони, що адекватно відображають технічний стан об'єктів та потоки даних, які можуть бути використані для прогнозування динаміки поведінки вхідних параметрів за допомогою штучної нейромережі.

На підсистему обробки вхідних даних покладаються процедури формування вектора вхідних змінних, які подаються до модуля фазифікації системи нечіткого виведення (рис. 1).

Слід зазначити, що виправданість розробки інтелектуальних систем для оцінки технічного стану об'єктів окремих об'єктів будівництва лишається під питанням. Проте, існує велика кількість типових проектів, які зводились одночасно та тривалий час експлуатується в однакових зовнішніх умовах. Якщо урахувати кількість об'єктів, що потребують обстеження технічного стану, то зникають сумніви щодо виправданості розробки та впровадження нових методів і засобів забезпечення надійності та безпечності їх експлуатації.

При цьому, стрімкий розвиток гібридних технологій надає можливість використовувати нечіткі системи для відображення узагальнених експертних знань на архітектуру штучних нейронних мереж з їх подальшим навчанням на реальних даних [11, 12]. Таким чином, застосування нейро-нечітких моделей до нечіткого виведення надає змогу автоматизувати процес одержання логічних висновків із вхідних даних за заданими експертами нечіткими правилами.

#### **4. Висновки**

Запропонована в роботі спеціалізована інтелектуальна система оцінки технічного стану об'єктів будівництва з нейро-нечіткою системою виведення призначається для служб, які спеціалізуються на проведенні будівельно-технічних експертиз. Експертна діяльність в цій галузі супроводжується невизначеністю різного характеру, а продукційна діяльність експертів часто ґрунтується на евристичних. Адаптація системи нечіткого виведення шляхом використання евристик прив'язки дозволить суттєво зменшити обсяг вибірки для навчання штучної нейромережі, та прискорити процес навчання системи.

Використання в спроектованій системі оцінки штучної нейро-нечіткої мережі Такаґи-Сугено-Канґа передбачає наявність чітких даних, які необхідні для генерації функції Такаґи-Сугено-Канґа. Тому подальші роботи планується спрямувати на дослідження об'єктів, які функціонують в областях суттєвого та критичного впливу вібрацій на їх технічний стан.

#### **Подяка**

Робота ґрунтується на аналізі науково-технічних звітів і експертних оцінок технічного стану будівель Національного музею мистецтв імені Богдана та Варвари Ханенків. Оцінки виконувались під керівництвом завідувача кафедри основ і фундаментів Київського національного університету будівництва та архітектури, доктора технічних наук, професора Бойка І. П. на замовлення приватного підприємства «АВС – архітектурно-будівельний центр» (м. Київ, Україна). Автори висловлюють подяку керівництву підприємства за інформаційну підтримку

досліджень, що спрямовані на впровадження новітніх, науково-обґрунтованих технологій та систем в процеси збереження та забезпечення надійної та безпечної експлуатації об'єктів архітектурної спадщини.

### Література

1. Driankov, D., Hellendorn, H., Reich Frank, M. (1996). *An Introduction to Fuzzy Control*. Berlin: Springer. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-662-03284-8>
2. Tanaka, K., Wang, H. O. (Eds.) (2001). *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: a Linear Matrix Inequality Approach*. New York: Wiley, 320.
3. Subbotin, S. A. (2006). Sintez raspoznaiuschikh neuro-nechetkikh modelei s uchetom informativnosti priznakov. *Neirokompiutery: razrabotka, primenenie*, 10, 50–56.
4. Osowski, S. (2000). *Siecin euronowe do przetwarzania informacji*. Warszawa, 342.
5. Terenchuk, S., Yeremenko, B., Sorotuyk, T. (2016). Implementation of intelligent information technology for the assessment of technical condition of building structures in the process of diagnosis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (3 (83)), 30–39. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80782>
6. Shastri, A., Stitt, G., Riccio, E. (2015). A scheduling and binding heuristic for high-level synthesis of fault-tolerant FPGA applications. *2015 IEEE 26th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*. doi: <http://doi.org/10.1109/asap.2015.7245735>
7. Terenchuk, S., Pashko, A., Yeremenko, B., Kartavykh, S., Ershova, N. (2018). Modeling an intelligent system for the estimation of technical state of construction structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (93)), 47–53. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132587>
8. Pasko, R., Terenchuk, S. (2020). The Use of Neuro-Fuzzy Models in Expert Support Systems for Forensic Building Technical Expertise. *ScienceRise*, 2, 10–18. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001278>
9. Eremenko, B. M. (2015). Design of intelligent system for diagnostics of technical state of building objects. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (2 (21)), 44–48. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37506>
10. Tanaka, K., Yoshida, H., Ohtake, H., Wang, H. O. (2009). A Sum-of-Squares Approach to Modeling and Control of Nonlinear Dynamical Systems With Polynomial Fuzzy Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17 (4), 911–922. doi: <http://doi.org/10.1109/tfuzz.2008.924341>
11. Mendel, J. M. (2017). *Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems: Introduction and New Directions*. Springer. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-51370-6>
12. Wu, D., Lin, C.-T., Huang, J., Zeng, Z. (2019). On the Functional Equivalence of TSK Fuzzy Systems to Neural Networks, Mixture of Experts, CART, and Stacking Ensemble Regression. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1. doi: <http://doi.org/10.1109/tfuzz.2019.2941697>