

DOI: 10.32347/2412-9933.2020.42.107-112

УДК 303.064: 624.02: 004.89

**Командиров Олексій Вікторович**

Завідувач відділу досліджень проектної документації та вартості будівельних робіт,  
*orcid.org/0000-0002-3655-780X*

*Київський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, Київ*

**Куліков Петро Мусійович**

Доктор економічних наук, професор, ректор, *orcid.org/0000-0002-7379-7968*

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

**Плоский Віталій Олексійович**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри архітектурних конструкцій, *orcid.org/0000-0002-2632-8085*

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

**Єременко Богдан Михайлович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектуванні та прикладної математики,  
*orcid.org/0000-0002-3734-0813*

*Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ*

## ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОЇ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МЕРЕЖІ ТАКАГИ – СУГЕНО – КАНГА ДО ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА

**Анотація.** Роботу присвячено питанням автоматизації процесів підтримки рішень щодо оцінки технічного стану об'єктів будівництва, які експлуатуються в умовах ущільненої міської забудови. Досліджено особливості процесу автоматизації експертної діяльності. Запропоновано концептуальну модель системи оцінки, що заснована на знаннях і програмах штучного інтелекту. Обґрунтовано доцільність використання в системі штучної нейро-нечіткої мережі Такаги-Сугено-Канга. Показано здатність нейро-нечіткої моделі до розв'язання задачі оцінки технічного стану об'єктів з пошкодженнями, які експлуатуються в умовах ущільненої міської забудови. Основними критеріями вибору моделі Такаги-Сугено-Канга стали її здатність до розв'язання задачі нечіткої класифікації та можливість задавати правила функцією входів. Застосування моделей і методів нечіткої математики при обробці вхідних даних забезпечує системі здатність функціонувати в умовах невизначеності, що пов'язана діяльністю різних інфраструктур ущільненої міської забудови. При цьому особливу увагу приділено формалізації узагальнених характеристик тих факторів впливу зовнішнього середовища, що супроводжуються вібраціями різного походження. Результати обробки вхідних даних показані на прикладах інтерпретації впливу вібрацій різного характеру на технічний стан об'єктів будівництва. Наукова новизна роботи полягає в розширенні бази знань системи за рахунок представлення інформації про реальний стан об'єктів будівництва та оточуючого зовнішнього середовища. Очікувана практична значущість роботи полягає в скороченні термінів проведення і підвищенні надійності оцінки технічного стану об'єктів будівництва з пошкодженнями різного характеру.

**Ключові слова:** вібрації; спеціалізована інтелектуальна система; ущільнена міська забудова

### Вступ

Основна увага в статті приділяється задачі оцінки технічного стану (ТС) об'єктів будівництва (ОБ), які експлуатуються в умовах ущільненої міської забудови (УМЗ). Одним із основних факторів впливу на ТС об'єктів, які експлуатуються в умовах УМЗ, є вібрації, що супроводжують функціонування транспортних мереж і новобудов, різні види будівельної діяльності та іншу діяльність різних інфраструктур міста.

Оцінка міри впливу вібрацій різного характеру на ТС об'єктів, які експлуатуються в умовах УМЗ, ускладнюється [1; 2]:

– відсутністю чіткої границі між мірами впливу на ТС об'єктів вібрацій природного і техногенного характеру;

– залежністю чутливості ОБ, які мають різний фізичний знос, від їхньої здатності певний час накопичувати пошкодження;

– залежністю тривалості накопичення пошкоджень від наявності прихованих дефектів;

– складністю оцінки спільного впливу різних факторів зовнішнього середовища, які кожний окремо слабо впливає на ТС об'єкта.

Досвідчені фахівці здатні приймати правильні рішення щодо оцінки технічного стану ОБ в умовах невизначеності різного характеру. Проте зростання навантаження на транспортні мережі та зростання обсягів будівельної діяльності в сучасних містах потребує автоматизації процесу оцінки ТС об'єктів оточуючої забудови шляхом автоматизації експертної діяльності у сфері будівельно-технічних експертиз.

Впровадження спеціалізованих інтелектуальних систем, що здатні відтворювати знання експертів, в процес оцінки ТС об'єктів, які експлуатуються в умовах УМЗ, є актуальною та своєчасною задачею, оскільки надасть можливість підвищити надійність і скоротити терміни будівельно-технічних експертиз (БТЕ).

### Мета статті

Метою роботи є моделювання спеціалізованої інтелектуальної системи оцінки технічного стану об'єктів будівництва (СОТСОБ).

Для досягнення мети сформовані такі задачі:

- дослідити особливості процесу автоматизації експертної діяльності з оцінки технічного стану ОБ;
- запропонувати концептуальну модель СІС для оцінки технічного стану ОБ, що експлуатуються в умовах УМЗ;
- обґрунтувати доцільність використання в системі штучної нейромережі Такаґи-Сугено-Канґа.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

*Поняття 1.* Спеціалізована інтелектуальна система – система, заснована на знаннях і програмах штучного інтелекту, що вирішує фіксований набір задач [3].

*Поняття 2.* Система нечіткого виведення (СНВ) – система управління, що базується на нечіткій логіці [4].

*Поняття 3.* Нечітке виведення (НВ) – процес одержання логічних висновків із вхідних даних за заданими нечіткими правилами [5].

Нечіткі правила, що відтворюють нечіткі логічні міркування експертів при проведенні БТЕ, можуть бути формалізовані у вигляді нечітких імплікацій (1) або продукційних моделей (2).

Нечіткі імплікації являють собою вираз [2; 5]:

$$\text{«якщо } x \in A, \text{ то } y \in B\text{»}, \quad (1)$$

де  $x$  та  $y$  – вхідна та вихідна змінні, що задані на області визначення нечіткого правила  $X$  та області визначення виведення  $Y$ ;  $A$  та  $B$  – висловлювання

експертів, що визначені на  $X$  та  $Y$  з мірами приналежності  $\mu_A(x) \in [0,1]$  та  $\mu_B(y) \in [0,1]$ .

Продукційні моделі мають вигляд [1; 6]:

$$(i); Q: P; A_1, \dots, A_n, \dots, A_N \rightarrow B_1, \dots, B_k, \dots, B_K; N, \quad (2)$$

де  $i$  – ім'я продукції;  $A_1, \dots, A_n, \dots, A_N \rightarrow B_1, \dots, B_k, \dots, B_K$  – ядро продукції;  $A_n$  – умова правила  $n$ -та ( $n=1, \dots, N$ );  $B_k$  –  $k$ -й висновок правила ( $k=1, \dots, K$ );  $Q$  – елемент, який характеризує сферу застосування продукції;  $P$  та  $N$  – умова застосовності ядра та постумови продукції.

Застосування моделей (1), (2) надає можливість формалізувати продукційну діяльність експертів, будувати систему правил для обґрунтування експертних висновків, формувати базу правил для СНВ.

Структура та принципи роботи СНВ описані в [4; 6].

Систематизований виклад математичних основ і методів представлення та обробки нечітких знань в СНВ міститься в [7].

Формування бази правил, що відтворюють нечіткі логічні умовиводи експертів при формуванні висновків при проведенні БТЕ на всіх етапах життєвого циклу ОБ, представлено в статтях [2; 8].

В роботах [2; 9] основна увага приділяється питанням фазифікації вхідних змінних, що являють множину геометричних параметрів будівельних конструкцій, і НВ логічних висновків за цими вхідними даними. Але, оцінка ТС об'єкта в цілому потребує застосування іншої системи правил, які визначаються ступенем зниження несучої здатності конструкцій з урахуванням впливу різних факторів середовища в кожному окремому випадку.

В [1; 8] описано характерні особливості процесу отримання вхідних даних при обстеженні ТС об'єктів і формалізовано процес НВ в задачах оцінки міри впливу ремонтно-будівельних робіт на погіршення ТС об'єктів, що опинились поряд. Проте множина факторів впливу природного та антропогенного характеру на технічний стан ОБ не обмежується ремонтно-будівельними роботами.

В роботах [1; 9]:

- обґрунтовано застосування нечітких правил при формалізації асоціативного мислення експертів при виконанні БТЕ [1];

- досліджено і формалізовано низку факторів впливу середовища, що впливають на швидкість деградації залізобетонних конструкцій [9].

Отже, існує достатньо робіт, які спрямовані на формалізацію нечітких логічних міркувань експертів і формування бази правил для пояснення логіки СНВ, що розробляються для автоматизованих СОТСОБ. Але в усіх цих роботах відзначається, що одним із суттєвих недоліків СНВ є те, що вони не здатні автоматично здобувати знання для використання в механізмах виведення.

Для вирішення цієї проблеми існують штучні нейронні мережі, які здатні автоматично здобувати знання. Проте навчена штучна нейромережа є «чорною скринькою» для користувача, якого не влаштовує такий підхід, оскільки прийняття рішень щодо оцінки ТС об'єктів будівництва передбачає особисту відповідальність експерта. Це означає, що використання автоматизованих систем підтримки рішень у сфері БТЕ потребує розуміння логіки СНВ.

Нейро-нечіткі моделі являють собою системи, в яких НВ виконується на основі апарату нечіткої логіки, а налаштування функцій приналежності здійснюється за допомогою штучних нейромереж. Такий підхід дає змогу враховувати апріорну інформацію про вибірку навчання в не ітеративному режимі та суттєво скорочує етап навчання моделі, але потребує додаткової обробки вхідної інформації [2].

### Виклад основного матеріалу

На основі проведених досліджень особливостей процесу оцінки ТС об'єктів будівництва в умовах УМЗ процес БТЕ запропоновано автоматизувати шляхом створення та впровадження системи оцінки технічного стану об'єктів будівництва (рис. 1).

Користувачами системи, що розробляється, є фахівці, що виконують БТЕ.

Експертами на рис. 1 називаємо фахівців, які забезпечують надійну роботу СОТСОБ, а саме:

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

Вхідні дані надходять в СОТСОБ через підсистему вводу вхідних даних з бази даних та від служб, що забезпечують обстеження ТС об'єктів.

При цьому передбачається, що зовнішня база даних містить необхідну інформацію для наповнення бази знань відповідно до задачі, що розв'язується.

Банк еталонів містить шаблони, що адекватно відображають ТС об'єктів та даних, які можуть використовуватись для прогнозування динаміки розвитку пошкоджень об'єкта за допомогою штучної нейромережі [2; 10].

Підсистемою обробки вхідних даних виконується процедура формування вектора чітких вхідних змінних, що подаються до СНВ.

У роботі [2] для оцінки ТС будівельних конструкцій з пошкодженнями було запропоновано використовувати штучну нечітку нейронну мережу Такаґи – Сугено – Канґа.

Ця модель розроблялась для розв'язання задач нечіткої класифікації і здатна до інтерпретації нечітких вхідних параметрів дефектів і пошкоджень реальних ОБ з пошкодженнями [2; 11].

Іншими критеріями вибору цієї моделі для оцінки ТС об'єктів, що експлуатуються в умовах УМЗ, стали [2; 12]:

- можливість задавати правила функцією входів;
- здатність до апроксимації нелінійних вхідних даних однією функцією забезпечується третім шаром (рис. 2).

В [2] також топологія і алгоритм навчання моделі Такаґи-Сугено-Канґа адаптовані до задачі оцінки ТС реальних будівельних конструкцій, а саме:

- 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.

Окрім того, в [2]:

- обґрунтовано вибір методу навчання мережі.

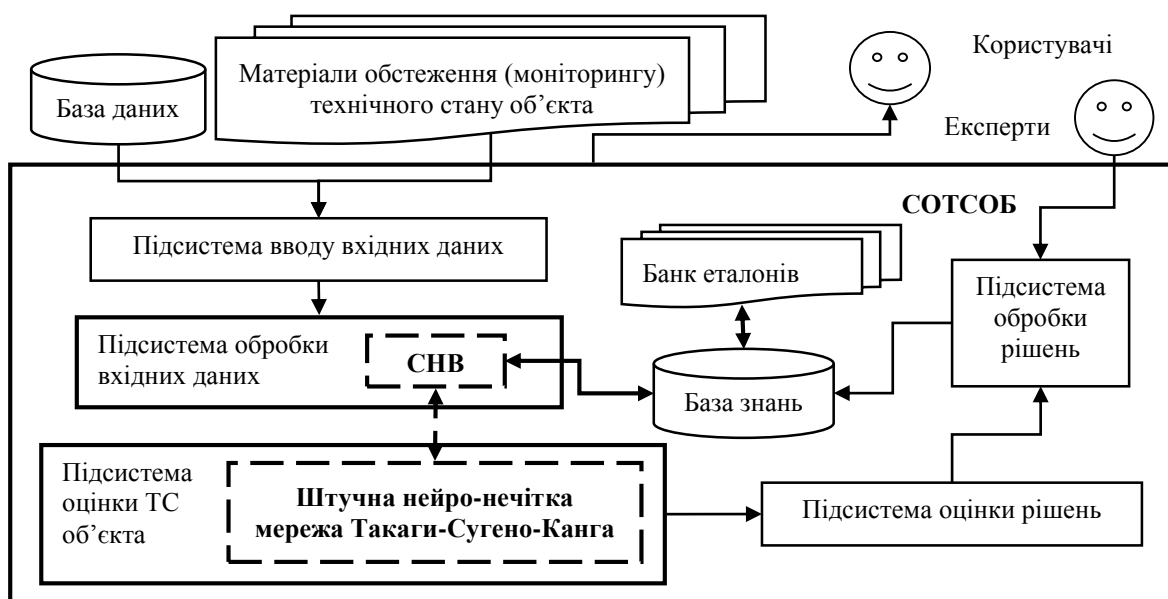


Рисунок 1 – Схема підтримки рішень щодо оцінки технічного стану об'єктів будівництва

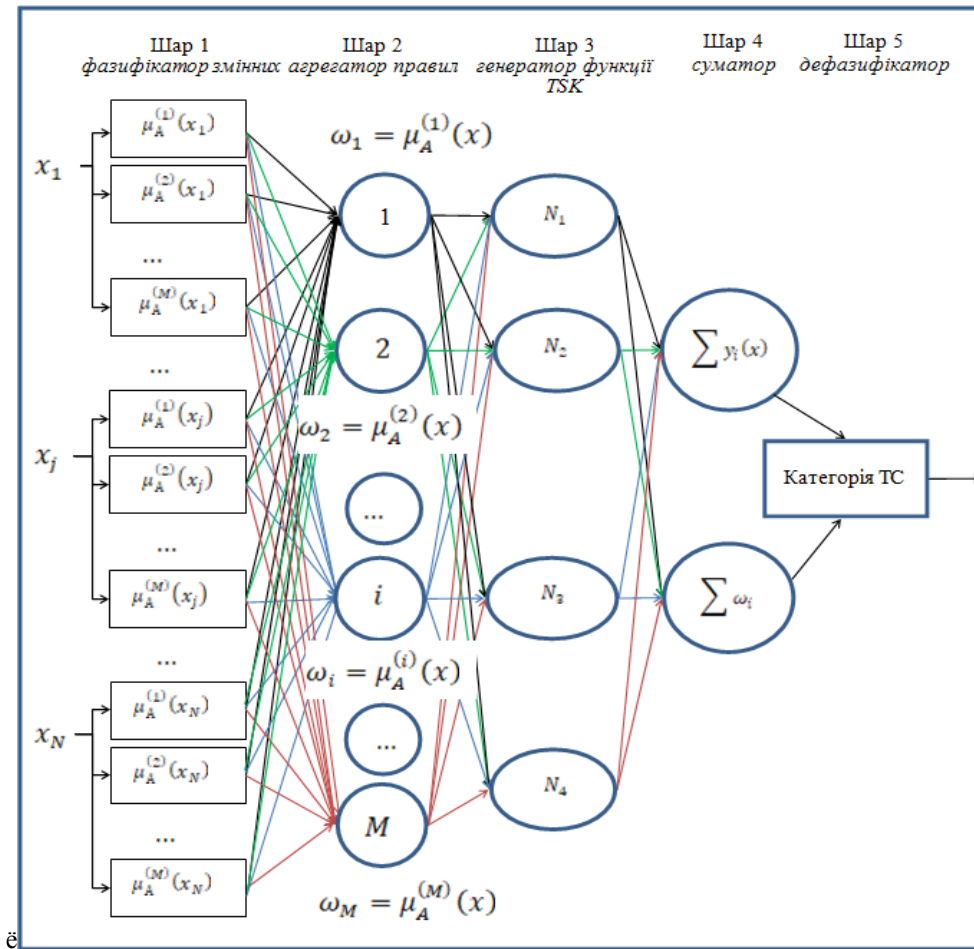


Рисунок 2 – Модель структури нечіткої нейронної мережі Такаґи-Сугено-Канґа

Отже, з'ясовано, що навчена штучна нечітка нейронна мережа Такаґи – Сугено – Канґа здатна не тільки порівнювати контрольовані параметри ТС об'єкта з еталонними значеннями, а і приймати обґрунтовані рішення щодо ідентифікації категорії ТС об'єкта в цілому.

До того ж, в [2; 11] основна увага приділяється задачам оцінки ТС об'єктів, які експлуатуються в умовах УМЗ. Це означає, що при відповідній обробці вхідних даних спроектована в [2] модель може бути використана для подальшого розвитку концепції автоматизації процесів підтримки рішень щодо

оцінки ТС об'єктів будівництва в умовах накладання коливань і вібрацій різного характеру.

На цьому етапі досліджень експертами виконується попередня обробка вхідних даних, що полягає в (таблиця):

- інтерпретації, формалізації та фазифікації параметрів пошкоджень реальних об'єктів;
- визначенні чітких характеристик вібрацій середовища;
- дослідженні міри впливу різних вібрацій на розвиток негативних змін пошкоджень ОБ.

Таблиця – Фрагмент попередньої обробки вхідних даних

№	Характеристики вібрацій ( $Z = \{z_1; \dots; z_l\}$ )		
	Вид пошкодження	Чіткі характеристики вібрацій	Нечіткий загальний вплив вібрацій на $k$ -те пошкодження Терм ( $w_p$ )
1	Руйнування стикових з'єднань ( $k=1$ )	частота ( $z_1$ ) амплітуда ( $z_2$ ) відстань до джерела ( $z_3$ ) фізико-механічні властивості середовища ( $z_4, \dots, z_l$ )	не суттєвий ( $p=1$ )
			помірний ( $p=2$ )
			середній ( $p=3$ )
2	Тріщина ( $k=2$ )	фізико-механічні властивості середовища ( $z_4, \dots, z_l$ )	значний ( $p=4$ )
			критичний ( $p=5$ )
...	...	...	перевищує критичний ( $p=6$ )
...	...	...	...

## Висновки

1. Створення і впровадження запропонованої системи надасть змогу суттєво знизити вплив людського фактору на виконання будівельно-технічних експертиз за рахунок підвищення надійності оцінок технічного стану об'єктів з пошкодженнями різного характеру. Окрім того, подібні експертні системи можуть використовуватись як інтелектуальні бази даних при експертній оцінці технічного стану об'єктів будівництва.

2. Доцільність застосування штучної нечіткої нейромережі Такаґи-Сугено-Канґа обґрунтована здатністю до:

- кластеризації нечітких даних;
- апроксимації нелінійних вхідних даних однією функцією.

3. Запропонований підхід до фазифікації вхідних змінних базується на реальних дослідженнях, що забезпечує адекватність інтерпретації вхідних даних нейро-нечіткою моделлю.

## Список літератури

1. Pasko R., Terenchuk S. *The Use of Neuro-Fuzzy Models in Expert Support Systems for Forensic Building Technical Expertise*. ScienceRise. ISSN: 2313-8416, 2(67), 2000. P. 10 – 18. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001278>.
2. Terenchuk S., Pashko A., Yeremenko B., Kartavykh S., Ershova N. *Modelling Intelligent System for the Estimation of Technical State of Construction Structures*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(2 (93)). 2018. P.47–53. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132587>.
3. Mettrey W. *An Assessment of Tools for Building Large Knowledge Based Systems*. AI Magazine, vol. 8(4). 1987. P.81-89.
4. Mudi R.K., Pal N.R. *A Self-Tuning Fuzzy PI Controller* Int. Jo. Fuzzy sets and systems. № 115. 2000. P.327-378.
5. Osowski, S. (2000) *Siecin europowe do przetwarzania informacji*. Warszawa, 342 p. (польською).
6. Субботин С. А. (2006) *Синтез распознающих нейро-нечетких моделей с учетом информативности признаков. Нейрокомпьютеры: разработка, применение, № 10. – С. 50-56.*
7. Hguen H., Sugeno M., Tong R., Yager R. *Theoretical Aspects of Fuzzy Control*. New York, John Wiley & Sons. 1995. 359 p.
8. Kulikov P., Pasko R., Terenchuk S., Ploskyi V., Yeremenko B. *Using of Artificial Neural Networks in Support System of Forensic Building-Technical Expertise*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). ISSN: 2278-3075. Vol. 9. Issue 4. 2019. P. 3162–3168.
9. Єременко Б.М. *Модельовання інтелектуальної системи для діагностики технічного стану об'єктів будівництва. Технологічний аудит та резерви виробництва. №1/2(21). 2015. С. 44-48.*
10. Terenchuk S., Yeremenko B., Sorotuyk T. *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. Vol. 5/3(83). 2016. P. 30-39.
11. Terenchuk S., Yeremenko B., Kartavykh S., Nasikovskiy O. *Application of Fuzzy Mathematics Methods to Processing Geometric Parameters of Degradation of Building Structures*. EUREKA: Physics and Engineering. №1. 2018. С.56-62.
12. 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.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2020

### **Komandyrov Oleksii**

Head of Department of research of project documentation and the cost of construction work, [orcid.org/0000-0002-3655-780X](https://orcid.org/0000-0002-3655-780X)  
Kyiv research institute of forensic expertise Ministry of Justice of Ukraine

### **Kulikov Petro**

DSc (Economic), Rector, Professor, [orcid.org/0000-0002-7379-7968](https://orcid.org/0000-0002-7379-7968)  
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

### **Ploskyi Vitaliy**

DSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Architectural Structures,  
[orcid.org/0000-0002-2632-8085](https://orcid.org/0000-0002-2632-8085)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

### **Yeremenko Bohdan**

PhD (Eng.), Associate Professor of Department of Information Technology Design and Applied Mathematics, [orcid.org/0000-0002-3734-0813](https://orcid.org/0000-0002-3734-0813)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

**USE OF ARTIFICIAL NEURO-FUZZY NETWORK TAKAGI-SUGENO-KANG  
TO THE ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF CONSTRUCTION OBJECTS**

**Abstract.** The work is devoted to the issues of automation of the processes of support of decisions on the assessment of the technical condition of construction objects, which are operated in the conditions of compacted urban development. The peculiarities of the process of automation of expert activity are investigated. A conceptual model of the evaluation system based on knowledge and programs of artificial intelligence is proposed. The expediency of using Takagi-Sugeno-Kanga artificial neural network in the system is substantiated. The ability of the neuro-fuzzy model to solve the problem of assessing the technical condition of objects with damage, which are operated in a dense urban development, is shown. The main criteria for choosing the Takagi-Sugeno-Kanga model were its ability to solve the problem of fuzzy classification and the ability to set rules by the input function. The use of fuzzy mathematics models and methods in the processing of input data provides the system with the ability to function in conditions of uncertainty associated with the activities of various infrastructures of dense urban development. At the same time, special attention is paid to the formalization of the generalized characteristics of those factors of environmental influence that are accompanied by vibrations of different nature. The results of input data processing are shown on the examples of interpretation of the influence of vibrations of different origin on the technical condition of construction objects. The scientific novelty of the work lies in the expanded knowledge base of the system by presenting information about the real state of construction objects and the environment. The expected practical significance of the work is to reduce the time and increase the reliability of the assessment of the technical condition of construction objects with damage of various kinds.

**Key words:** vibrations; specialized intelligent system; compacted urban development

**References**

1. Pasko, R., & Terenchuk, S., (2020). *The Use of Neuro-Fuzzy Models in Expert Support Systems for Forensic Building Technical Expertise*. *ScienceRise*, 2(67), 10 – 18, doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2020.001278/>
2. Terenchuk, S., Pashko, A., Yeremenko, B., Kartavykh, S., & Ershova, N., (2018) *Modelling 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>.
3. Mettrey, W., (1987). *An Assessment of Tools for Building Large Knowledge Based Systems*. *AI Magazine*, 8, 4, 81 – 89.
4. Mudi, R., & Pal, N., (2000). *A Self-Tuning Fuzzy PI Controller* *Int. Jo. Fuzzy sets and systems*, 115, 327 – 378.
5. Osowski, S., (2000). *Neural networks for information processing*. Warsaw, 342.
6. Subbotin, S.A., (2006). *Synthesis recognizing neuro-fuzzy models with regard to information content attributes*. *Neurocomputers: development, application*, 10, 50 – 56.
7. Nguen, H., Sugeno, M., Tong, R., & Yager, R., (1995). *Theoretical Aspects of Fuzzy Control*. New York, John Wiley & Sons, 359.
8. Kulikov, P., Pasko, R., Terenchuk, S., Ploskyi, V., & Yeremenko, B., (2019). *Using of Artificial Neural Networks in Support System of Forensic Building-Technical Expertise*. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9, 4, 3162 – 3168.
9. Yeremenko, B.M., (2016). *Modeling of intelligent system for diagnostics of technical condition of construction objects*. *Technological audit and production reserves*, 1/2, 21, 44 – 48.
10. 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.
11. Terenchuk, S., Yeremenko, B., Kartavykh, S., & Nasikovskiy, O. (2018). *Application of Fuzzy Mathematics Methods to Processing Geometric Parameters of Degradation of Building Structures*. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 5 – 62.
12. Tanaka, K., Yoshida, H., Ohtake, H. & Wang, H.O., (2009). *A Sum-of-Squares Approach to Modelling and Control of Nonlinear Dynamical Systems with Polynomial Fuzzy Systems*. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 17(4), 911 – 922.

**Посилання на публікацію**

- APA Komandirov, O., Kulikov, P., Ploskyi, V., & Yeremenko, B., (2020). *Use of Artificial Neuro-Fuzzy Network Takagi-Sugeno-Kang to the Assessment of Technical Condition of Construction Objects*. *Management of Development of Complex Systems*, 42, 107 – 112, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.107-112.
- ДСТУ Командиров, О.В. Застосування штучної нейро-нечіткої мережі Такагі – Сугено – Канга до оцінки технічного стану об'єктів будівництва [Текст] / О.В. Командиров, П.М. Куліков, В.О. Плоский, Б.М. Єременко // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 42. – С. 107 – 112, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.107-112.