

О. Д. Панкевич, канд. техн. наук., доц.;

С. Д. Штовба, д-р техн. наук, доц.

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Виконано огляд нечітких діагностичних моделей, які застосовуються у будівництві та експлуатації будинків та споруд. Застосування нечітких баз знань дозволяє за відсутності аналітичних залежностей між параметрами стану та діагностичними рішеннями побудувати адекватні математичні моделі на основі досвіду експертів та експериментальних даних.*

### Вступ та мета дослідження

Під час будівництва та експлуатації будівель досить часто постає питання діагностики об'єкта в цілому або його конструктивних елементів. Діагностика, тобто оцінка стану будівлі або визначення типу та причини появи дефектів будівельних конструкцій, здійснюється за результатами аналізу зовнішніх ознак пошкодження та архівних матеріалів з проектування, виробництва та експлуатації досліджуваного об'єкта. Для підтвердження результатів діагностування можуть бути виконані лабораторні дослідження або розрахункові роботи.

Складні нелінійні зв'язки між зовнішніми проявами пошкодження будівельної конструкції та його причинами обумовлюють відсутність точних математичних моделей прийняття діагностичних рішень. В той же час висококваліфіковані діагности в більшості випадків вірно встановлюють тип дефекту та причину його появи ще на етапі візуального обстеження пошкодженої конструкції. Під час діагностування експерти часто приймають рішення на основі природно-мовних правил типу «Якщо конструкція — цегляна несуча стіна, та тріщина вертикальна, та проходить майже через усю стіну, та розкрита догори, та ґрунти слабкі, тоді причина — нерівномірне осідання фундаменту», у яких сконцентровані теоретичні знання і особистий досвід. Одним із потужних методів обробки таких експертних знань є теорія нечітких множин та нечітка логіка [1—3].

Метою статті є класифікація ключових нечітких моделей діагностики будівельних конструкцій та аналіз їх переваг і недоліків у порівнянні з моделями на основі інших методів прийняття рішень.

### Огляд застосування нечітких моделей в будівельній діагностиці

Спроби застосування теорії нечітких множин в будівництві розпочалися в США 30 років назад з робіт із діагностики пошкоджених землетрусами будівель та споруд [4]. Українські науковці започаткували дослідження з нечіткої діагностики будівельних конструкцій в 2000 р. [5]. Найчастіше нечітка діагностика будівельних конструкцій здійснюється на основі логічного виведення по нечітких базах знань [4—10]. Менша частка робіт стосується діагностичних моделей із застосуванням інших нечітких методів, серед яких виділимо: опис вектора пошкоджень об'єкта в формі нечіткої множини, яка враховує впевненість експерта-діагноста в достовірності початкових даних [10, 11], опис результату діагностики в формі нечіткої множини [12] та застосування теорії можливості [12—15]. В кількох статтях [16—18] декларуються наміри авторів створити нечіткі діагностичні моделі для будівельних об'єктів.

Серед означених вище публікацій найопрацьованішими в інженерному плані є моделі будівельної діагностики на основі нечітких баз знань, тому проаналізуємо їх детальніше. Нами пропонується класифікувати ці моделі за шістьма ознаками (табл. 1), серед яких перші 3 стосуються будівельного об'єкта, а решта — нечітких баз знань.

З табл. 1 видно, що 2 нечіткі діагностичні моделі, [6] та [8] використовують як експертні знання, так і експериментальні дані. Спочатку за експертними знаннями сформовані нечіткі правила «Якщо—Тоді», які є грубою діагностичною моделлю. Після цього, за експериментальними даними проведено навчання діагностичної моделі шляхом налаштування функцій належності нечітких термів та вагових коефіцієнтів правил. Навчання зводиться до пошуку таких параметрів моделі,

які мінімізують розбіжність між бажаними та теоретичними результатами. Але на відміну від методів індуктивного моделювання, наприклад, нейронних мереж, необхідний обсяг навчальної вибірки є значно меншим [19]. Це досягається за рахунок того, що структура діагностичної моделі — нечітка база знань, є для кожної задачі унікальною, а не універсальною, як в нейронних мережах.

Таблиця 1

Класифікація моделей будівельної діагностики на основі нечітких баз знань

Ознака	Публікації					
	[4]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Об'єкт	пошкоджені землетрусом будівлі	цегляні конструкції будівель	залізобетонні балки	палі	мости	пошкоджені землетрусом будівлі
Результат діагностування	стан пошкодження	причина появи тріщини	стан залізобетонної балки	несуча спроможність палі	технічний стан	стан будівлі та її ремонтпридатність
Кількість входів	9 груп	42	9	8	19	4
Кількість баз знань	10	9	4	4	1	4
Кількість правил	невідомо	151	60	95	невідомо	100
Навчання моделі	ні	навчання зі збереженням прозорості	ні	навчання без збереження прозорості	ні	ні

Наявність унікальної структури нечіткої моделі дозволяє не тільки значно скоротити обсяг навчальної вибірки, але й забезпечити певну робастність, тобто нечутливість моделі до випадкових викидів початкових даних. Зауважено, що після навчання нечітка база знань в [6] залишилась прозорою за визначенням [20], тоді як в [8] наявні складнощі змістовної інтерпретації кількох функцій належності нечітких термів.

### Приклад нечіткої діагностичної моделі

Стисло розглянемо нечітку модель з [6], що дозволяє визначити причину появи тріщини цегляної конструкції на етапі візуального обстеження будівлі.

Причини появи тріщин у цегляних конструкціях класифіковано таким чином:

- статичне перевантаження ( $d_1$ );
- динамічне перевантаження ( $d_2$ );
- особливе перевантаження ( $d_3$ );
- дефекти фундаментів та деформації основи ( $d_4$ );
- температурні деформації ( $d_5$ );
- порушення технології будівельних процесів або неврахування властивостей матеріалу ( $d_6$ ).

Вихідною інформацією для визначення причини виникнення тріщини, є значення таких параметрів стану об'єкта, що діагностується:  $x_1$  — тип конструкції;  $x_2$  — умови роботи конструкції;  $x_3$  — товщина горизонтальних швів;  $x_4$  — відхилення під час заповнення швів;  $x_5$  — система перев'язки;  $x_6$  — наявність непередбачених отворів;  $x_7$  — дефекти армування;  $x_8$  — кривина конструкції;  $x_9$  — перевищення допустимого відхилення від вертикалі;  $x_{10}$  — зволоження кладки;  $x_{11}$  — лущення кладки;  $x_{12}$  — вивітрювання кладки;  $x_{13}$  — вилуговування кладки;  $x_{14}$  — викришування кладки;  $x_{15}$  — місцеположення тріщини;  $x_{16}$  — вид тріщини;  $x_{17}$  — напрямлення розкриття;  $x_{18}$  — ширина тріщини;  $x_{19}$  — довжина тріщини;  $x_{20}$  — наслідок пожежі;  $x_{21}$  — інформація про землетруси, вибухи;  $x_{22}$  — наявність динамічного навантаження;  $x_{23}$  — сколювання під перемичкою;  $x_{24}$  — глибина тріщини;  $x_{25}$  — зсув підпірної стіни, або стіни підвалу;  $x_{26}$  — аварії систем водо- та теплозабезпечення;  $x_{27}$  — наявність організованих водостоків, вертикального планування;  $x_{28}$  — наявність слабких, просадочних ґрунтів, ґрунтів;  $x_{29}$  — наявність

води у підвалі;  $x_{30}$  — наявність поблизу ємнісних споруд;  $x_{31}$  — наявність поблизу об'єктів, що будуються (вже прибудовані);  $x_{32}$  — зміщення балок, перемичок в експлуатації;  $x_{33}$  — необхідність осадового шва;  $x_{34}$  — наявність осадового шва;  $x_{35}$  — невраховані в проекті навантаження;  $x_{36}$  — наявність механічних ушкоджень, що зменшують розрахунковий переріз;  $x_{37}$  — обпирання балок та прогонів перекриття без необхідних конструктивних заходів;  $x_{38}$  — недостатня величина обпирання балок і плит;  $x_{39}$  — необхідність температурного шва;  $x_{40}$  — наявність температурного шва;  $x_{41}$  — виконання робіт в зимовий період;  $x_{42}$  — застосування різнорідних матеріалів, та матеріалу не за призначенням.

Математична модель визначення причини появи тріщини подана як система співвідношень

$$D = f_D(x_1, x_2, y_1, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}, x_{19}, y_3);$$

$$y_1 = f_{y_1}(x_3, x_4, x_5, x_6, y_2, x_7, x_8, x_9, x_{10});$$

$$y_4 = f_{y_4}(x_{25}, x_{26}, y_8, x_{27}, x_{28}, x_{29}, x_{30}, x_{31}, x_{32});$$

$$y_5 = f_{y_5}(x_{35}, x_{36}, x_{37}, x_{38});$$

$$y_6 = f_{y_6}(x_{39}, x_{40});$$

$$y_7 = f_{y_7}(x_{41}, x_{42});$$

$$y_8 = f_{y_8}(x_{33}, x_{34}),$$

де  $f(\bullet)$  — функціональний зв'язок між вхідними та вихідними змінними;  $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6\}$  — множина можливих причин появи тріщин.

Укрупнені параметри стану інтерпретуються таким чином:

- $y_1$  — стан конструкції;
- $y_2$  — руйнування кладки;
- $y_3$  — додаткова інформація;
- $y_4$  — можливість деформації основи;
- $y_5$  — можливість статичного перевантаження;
- $y_6$  — дотримання вимог до температурного шва;
- $y_7$  — можливість порушення технології виробництва та неврахування властивостей матеріалів;
- $y_8$  — дотримання вимог до осадового шва.

Ієрархічний зв'язок між параметрами стану та причиною виникнення тріщини задано у вигляді 9 нечітких баз знань. Загальна кількість нечітких правил в них дорівнює 151 (табл. 2).

Таблиця 2

Розподіл правил по нечітким базам знань

База знань	$f_D$	$f_{y_1}$	$f_{y_2}$	$f_{y_3}$	$f_{y_4}$	$f_{y_5}$	$f_{y_6}$	$f_{y_7}$	$f_{y_8}$
Кількість класів рішень	6	3	3	7	3	2	2	2	2
Кількість правил	49	31	15	16	20	6	4	6	4

Навчання нечіткої моделі здійснено генетичним алгоритмом. Під час навчання налаштовано такі параметри нечіткої моделі: коефіцієнти концентрацій і координати максимумів функцій належності нечітких термів та вагові коефіцієнти правил нечітких баз знань. Під час навчання застосовано правила збереження прозорості нечіткої моделі, які описано в [20]. Після налаштування кількість помилок рішень на навчальній вибірці зменшилася в 4 рази і складає 2 помилки на 55 тріщин. На тестовій вибірці з 34 тріщин помилково діагностовано 2. Загалом з 89 тріщин збігання модельного рішення з дійсною причиною появи тріщини спостерігалось в 85 випадках, тобто в 95,5 %. В решті

випадків дійсної причини відповідало друге за рангом модельне рішення.

### Висновки

Проаналізовані роботи із застосування нечіткої логіки для діагностики будівельних конструкцій та пошкоджених будівель. Результатом діагностування найчастіше є визначення стану пошкодженої конструкції. Встановлено, що серед методів теорії нечітких множин в діагностиці будівельних конструкцій найчастіше застосовується логічне виведення по нечітких базах знань. Застосування нечітких баз знань дозволяє побудувати адекватні математичні моделі на основі досвіду експертів-діагностів та експериментальних даних. Одним із обмежень застосування інформаційних технологій для створення діагностичних моделей в будівництві є високі вимоги до обсягу статистичних даних. Застосування нечітких експертних баз знань дозволяє значно скоротити обсяг навчальної вибірки, яка формується за достовірними результатами діагностики реальних об'єктів.

Наведено основні характеристики авторської моделі діагностування тріщин цегляних конструкцій будівель [6], яка є прикладом найбільш опрацьованого в інженерному плані застосування нечітких баз знань у будівельній галузі. Використовуючи принципи розробки цієї моделі як шаблон проектування, можна легко створити аналогічні моделі для розв'язання задач оцінки стану будівлі та діагностування різноманітних будівельних конструкцій та споруд. Підтвердженням цієї тези є роботи з визначення технічного стану мостів [9] та діагностики залізобетонної балки [7], які методологічно ґрунтуються на монографії [6] та статтях, що їй передували [5, 21].

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zadeh L. Fuzzy Sets / L. Zadeh // Information and Control. — 1965. — № 8. — P. 338—353.
2. Zimmerman H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. 3rd ed. / H.-J. Zimmerman. — Kluwer Academic Publishers, 1996. — 435 p.
3. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — М. : Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
4. Фу К. С. Применение нечетких множеств для оценки устойчивости строительных конструкций при землетрясениях / К. С. Фу, М. Исидзука, Д. Т. Яо // кн. «Нечеткие множества и теория возможностей: последние достижения» / под ред. Ягера Р. Р. — М. : Энергоатомиздат. — 1986. — С. 312—332.
5. Ротштейн А. П. Принципы диагностики строительных конструкций на базе нечеткой логики / А. П. Ротштейн, О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. — 2000. — Вип. 1. «Будівельні конструкції. Будівлі та споруди». — С. 150—153.
6. Панкевич О. Д. Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань : моног. / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 108 с.
7. Соколов В. А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств / В. А. Соколов // Инженерно-строительный журнал. — 2010. — № 5. — С. 31—37.
8. Моргун А. С. Идентификация несущей способности паль методами нечеткой логики и методом граничных элементов / А. С. Моргун, Д. І. Кательников, І. А. Моргун [Електронний ресурс] // Наукові праці ВНТУ. — 2008. — № 2 — Режим доступу : [http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-2/2008-2.files/uk/08masmbe\\_uk.pdf](http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-2/2008-2.files/uk/08masmbe_uk.pdf).
9. Приходько Т. А. Оценка технического состояния элементов в рамках автоматизированной системы управления мостами / Т. А. Приходько // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. — 2004. — Вип. 69 / Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення. — С. 205—210.
10. Carreño M. Neuro-Fuzzy Assessment of Building Damage and Safety After an Earthquake / M. Carreño, O. Cardona, A. Barbat // In «Intelligent Computational Paradigms in Earthquake Engineering» Eds. : Lagaros N., Tsompanakis Y. Pennsylvania (USA) : Idea Group Inc. — 2007. — P. 123—157.
11. Попов Н. Н. Техническая диагностика — основа реконструкции зданий и сооружений / Н. Н. Попов, В. А. Меняйло // Реконструкція житла. — 2000. — Вип. 1. — С. 50—56.
12. Абдрахманов Н. Х. Оценка уровня риска в системе мониторинга и управления рисками объектов нефтегазовой отрасли / Н. Х. Абдрахманов, Р. А. Шайбаков, Р. А. Байбураин // Нефтегазовое дело. — 2008. — № 2. — С. 123—127.
13. Мельчаков А. П. Применение методов теории нечетких множеств к оценке конструктивной безопасности строящихся зданий и сооружений / А. П. Мельчаков, А. А. Смирнов // Известия Челябинского центра Уральского отделения РАО. — 1999. — № 1. — С. 111—120.
14. Мельчаков А. П. Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов. (Теория, методики и инженерные приложения) : учеб. пос. / А. П. Мельчаков. — Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 2006. — 49 с.
15. Уткин В. С. Определение остаточной несущей способности и надежности металлической балки / В. С. Уткин, О. С. Плотникова // Металеві конструкції. — 2006. — № 1. — С. 13—19.
16. Кострюков В. П. Разработка базы знаний экспертной системы оценки диагностики сооружений. /

В. П. Кострюков, Е. В. Кохан // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2008. — № 1. — С. 88—93.

17. Кулик Г. О. О построении диагностических моделей строительных конструкций / Г. О. Кулик // Теоретичні основи будівництва. Збірник наукових праць. — 2008. — № 16. — Режим доступу :

[http://www.nbu.gov.ua/Portal/natural/Tob/2008\\_16/Stati/32-Kulik.pdf](http://www.nbu.gov.ua/Portal/natural/Tob/2008_16/Stati/32-Kulik.pdf)

18. Югов А. М. Оцінка недосконалостей будівельних металевих конструкцій на основі теорії нечітких множин. / А. М. Югов // Металеві конструкції. — 2008. — № 1. — С. 43—51.

19. Панкевич О. Д. Диагностика причин трещин строительных конструкций на основе мягких вычислений / О. Д. Панкевич, С. Д. Штовба, Д. П. Штовба // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. — 2004. — Вип. 69 / Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення. — С. 179—184.

20. Штовба С. Д. Обеспечение точности и прозрачности нечеткой модели Мамдани при обучении по экспериментальным данным / С. Д. Штовба // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 4. — С. 102—114.

21. Панкевич О. Д. Определение причин появления трещин кирпичных конструкций на основе нечетких баз знаний / О. Д. Панкевич, И. В. Маевская // Известия вузов : Строительство. — 2002. — № 1—2. — С. 4—8.

Рекомендована кафедрою теплогазопостачання

Стаття надійшла до редакції 15.04.11

Рекомендована до друку 20.04.11

**Панкевич Ольга Дмитрівна** — доцент кафедри теплогазопостачання; **Штовба Сергій Дмитрович** — професор кафедри комп'ютерних систем управління.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця