

УДК 69.059;69:002;725;728

*П.Є. Григоровський, к.т.н.; Л.О. Косолап;  
Н.П. Чуканова, НДІБВ, м. Київ*

## **ВПЛИВ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИ ТЕХНІЧНОМУ ОБСТЕЖЕННІ БУДІВЕЛЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА ЗБІЛЬШЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ БУДІВЕЛЬ**

### **АНОТАЦІЯ**

В статті зроблено аналіз можливості визначення технічного стану будівельних конструкцій в реальних умовах невизначеності. Розглянуті деякі моделі діагностування технічного стану будівлі. Визначено суть методу з використанням формули Байєса та експертно-статистичний метод оцінювання параметрів будівель. Розглянуто можливість застосування нечіткої логіки для діагностування будівель. Визначена структурна модель ідентифікації дефектів та пошкоджень. Наведено блок-схему нечіткого висновку за результатами обстеження. В статті зроблено висновок, що застосування експертних систем сприяє оптимізації тривалості життєвого циклу будівель та дозволяє приймати економічно та технічно обґрунтовані рішення з їх реконструкції чи ліквідації.

Ключові слова: довготривала експлуатація, невизначеність, моделі діагностування, імовірнісні методи, формула Байєса, експертно-статистичний метод, нечітка логіка, структурна модель, система нечіткого висновку, експертні системи.

### **1. Постановка задачі**

Дефекти і пошкодження елементів будівель, споруд та інженерних мереж виявляють при їх технічному обстеженні. Для збільшення життєвого циклу будівель важливе значення має правильне визначення причин виникнення дефектів і пошкоджень та прогноз впливу цих причин на технічний стан будівель.

Будівельні елементи відрізняються різним ступенем складності і категорією технічного стану, а також значною кількістю чинників, що призводять до їх пошкоджень [2]. Тому однозначна ідентифікація зв'язку між видом пошкоджень та причинами їх появи досить багатofакторне завдання. В деяких випадках така ідентифікація неможлива [1].

Забезпечення довготривалої експлуатації будівель потребує комплексного контролю їх експлуатаційних характеристик, накопичення даних про дефекти і пошкодження, виконання аналізу причин їх виникнення та розробки пропозицій щодо запобігання їх подальшому розвитку. Ця робота вимагає залучення висококваліфікованих фахівців з обстеження будівель, розробки методів і засобів діагностування пошкоджень та прогнозування їх розвитку. На жаль, ситуація з управлінням будівлями та їх мережами характеризується високим рівнем невизначеності за причин:

- децентралізації управління станом будинків;
- нестабільністю фінансування ремонтів та реконструкції;
- зменшення рівня компетентності обслуговуючого персоналу.

Перспективним напрямком збільшення життєвого циклу будівель і споруд в умовах невизначеності є розвиток методології отримання об'єктивної інформації щодо їх технічного стану з використанням інтелектуальних систем. Такі системи дозволяють в режимі реального часу здійснювати аналіз технічного стану будівлі, прогнозувати можливий розвиток дефектів, пропонувати рекомендації з вибору профілактичних заходів, проводити оперативне коригування існуючих планів відновлювальних заходів чи рекомендувати ліквідацію будівлі у разі, якщо вартість відновлювальних заходів перевищує вартість ліквідації та нового будівництва [3]. При цьому підвищується обґрунтованість прийнятих рішень щодо забезпечення експлуатаційних характеристик будівель та інженерних мереж.

Зробимо аналіз можливості визначення технічного стану будівельних конструкцій в реальних умовах невизначеності, коли дефекти, їх причини та розвиток пошкоджень не мають чіткого однозначного зв'язку.

### **2. Моделі діагностування елементів будівель в умовах невизначеності**

У нашому випадку відмовою конструкції або будівлі в цілому умовно вважаємо виникнення дефектів та пошкоджень, що погіршують категорію їх технічного стану.

В [3] для вирішення завдань підвищення ефективності функціонування будівель за рахунок зменшення кількості відмов в умовах невизначеності пропонуються моделі діагностування відмов

будівельних конструкцій і споруд та вибір стратегії їх відновлення.

Якщо є вектор (множина) діагностичних ознак та множина потенційно можливих станів об'єкта, що діагностується  $D^*$ , то для розв'язання задачі технічної діагностики (побудови діагностичної моделі  $R$ ) необхідно встановити залежність, що визначає правило ( $p$ ) відображення діагностичних ознак в множині можливих станів  $D^*$ .

$$R: \bar{X} \xrightarrow{p} D^*; \quad (1)$$

$$\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n, \dots, X_N); \quad (2)$$

$$D^* = \{D_1^*, D_2^*, \dots, D_l^*, \dots, D_L^*\}. \quad (3)$$

Основою технічної діагностики є бібліотека діагностичних моделей у відповідності з (1). При експлуатації об'єкта ведеться контроль за його станом і у відповідності з діагностичними бібліотеками ідентифікується дефект та прогнозується його розвиток і вибирається оптимальна стратегія відновлення з корекцією планової стратегії. Діагностичні моделі об'єкта визначаються його конструктивними і функціональними особливостями, характером прояву порушень нормального функціонування, появою різного типу відмов.

Діагностичні моделі можуть бути у вигляді таблиці несправностей, чітких або нечітких лінгвістичних моделей, нечітких нейронних мереж.

У першому варіанті найбільш зручна підготовка даних у вигляді таблиці, де рядки містять інформацію про можливі дефекти, а в стовпцях розміщена інформація про діагностичні ознаки, що відповідають відмовам об'єкта. Інформація в таблицях дозволяє ідентифікувати типи відмов за наявності певних ознак.

Другий тип моделі — це чіткі діагностичні моделі, що базуються на чітких лінгвістичних правилах. Ці правила описують характер прояву діагностичних ознак при тому або іншому порушенні нормальної експлуатації чи відмови. Звичайне правило для цієї моделі: якщо  $\bar{X}_n = a_n$ , то  $D_n^* = b_n$ .

Третій тип моделі базується на опитуванні групи експертів, за результатами яких складаються діагностичні правила, що формують причинно-наслідковий зв'язок між ознакою дефекту і висновками щодо технічного стану будівлі. Правила об'єднуються в групи і заносяться у базу даних експертної системи.

Четвертий тип моделі базується на достатній кількості статистичної інформації про дефекти. У

такому разі може бути використана модель нечіткої нейронної мережі з автоматичною оптимізацією.

Всі ці діагностичні моделі можуть бути використані для формування бази знань і діагностування будівельних конструкцій. Ці моделі можуть вирішувати вибір стратегії відновлення, яка враховуватиме інформацію про дефекти різної природи, а також неточність ідентифікації дефектів і імовірнісну природу виникнення дефектів об'єкта.

В [4 – 11] для визначення технічного стану будівель, споруд та їх елементів розглядається використання імовірнісних методів розпізнавання. Якщо елемент будівлі або сама будівля знаходиться в одному з випадкових станів з декількох, що попередньо визначені, та визначена сукупність ознак, кожна з яких з певною вірогідністю характеризує стан елемента будівлі чи самої будівлі, то розпізнавання стану може бути виконано статистичними методами. При цьому потрібно сформулювати правило, за допомогою якого сукупність ознак була б віднесена до одного з можливих станів. Також важливо оцінити достовірність прийнятого рішення, а також міру ризику помилкового рішення.

Одним з основних статистичних методів є метод, заснований на формулі Байєса.

Суть методу полягає в тому, що, якщо є стан  $S_i$  і ознака  $k_j$ , що зустрічається в цьому стані, то відповідно до понять теорії вірогідності вірогідність стану  $S_i$  після того, як стала відома наявність у даного об'єкта ознаки  $k_j$  (апостеріорна вірогідність стану) визначається з формули Байєса

$$P(S_i / k_j) = P(S_i) \frac{P(k_j / S_i)}{P(k_j)}, \quad (4)$$

де  $P(S_i)$  — вірогідність стану  $S_i$ , що визначається за статистичними даними (апостеріорна вірогідність стану). Якщо до моменту діагностування заздалегідь обстежено  $N$  об'єктів і близько  $N_i$  об'єктів знаходиться в стані  $S_i$ , то ;

$$P(S_i) = \frac{N_i}{N};$$

$P(k_j / S_i)$  — вірогідність появи ознаки  $k_j$  у об'єктів із станом  $S_i$ . Якщо серед  $N_i$  об'єктів, що мають стан  $S_i$ , у частини об'єктів  $N_{ij}$  з'явилась ознака  $k_j$ , то ;

$$P(k_j / S_i) = \frac{N_{ij}}{N_i};$$

$P(k_j)$  – вірогідність появи ознаки  $k_j$  у всіх об'єктів незалежно від стану об'єкта. Якщо із загального числа  $N$  об'єктів ознака  $k_j$  була виявлена у  $N_j$  об'єктів, то

$$P(k_j) = \frac{N_j}{N}.$$

При визначенні  $P(S_j)$  передбачається, що система знаходиться тільки в одному з станів, які розглядаються. У такому разі слід мати на увазі, що

$$\sum_{i=1}^n P(S_i) = 1.$$

Для практичних завдань діагностування стану будівель завжди проводиться за комплексом ознак  $K_j$ , що включає множину ознак  $k_1, k_2, \dots, k_i$ . У кожній з них може бути  $m$  розрядів з конкретними чисельними значеннями  $(k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm})$ . У результаті обстеження встановлюється наявність у конструктивного елемента будівлі тієї або іншої ознаки з відповідним розрядом, тобто реалізація у системи цієї ознаки  $k_j^*$  стає відомою і вважається відомою реалізація усього комплексу ознак  $K^*$ . Індекс  $*$  має значення конкретної реалізації ознаки.

Для визначення вірогідності станів за методом Байєса складається так звана діагностична матриця. Ця матриця формується у вигляді таблиці вірогідності ознак і їх розрядів при різних діагнозах. Таким чином, таблиця будується на основі попереднього статистичного матеріалу, тобто в неї включена апріорна вірогідність станів і ознак. Після проведення серії розрахунків одержують ряд апостеріорної вірогідності кожного стану, який діагностується, або по всій сукупності ознак і їх розрядів, або по частині з них. Правило, відповідно до якого приймається рішення про конкретний діагноз, полягає в тому, що об'єкт з комплексом ознак  $K^*$  відноситься до стану  $S_i$ , якщо апостеріорна вірогідність цього стану  $S_i$  є найбільшою, тобто

$$K^* \in S_{ij}, \text{ якщо}$$

$$P(S_i / K^*) > P(S_j / K^*) \quad (j = 1, 2, \dots, n; i \neq j). \quad (5)$$

В [12] розглянуто експертно-статистичний метод оцінювання параметрів впливу на технічний стан інженерних мереж в умовах невизначеності. Метод може бути застосований і до оцінювання стану будівель.

Для забезпечення надійності і довговічності інженерних мереж потрібно здійснювати їх

профілактичне обслуговування, капітальні та поточні ремонти, модернізацію, реконструкцію. Найважливішим показником цих заходів є їх періодичність, що розглядається як детермінована величина, а самі мережі оцінюються експертними системами [13].

Якщо результативність функціонування мереж (будинків) описується показником  $\pi$ , який може бути виражений в термінах економіки, технології або надійності і залежить від інтервалу часу  $\tau_{\text{вд}}$  до чергової відновлювальної дії та умовою  $\omega$  невизначеності  $\tau_{\text{вд}}$ , то

$$\pi = G(\tau_{\text{вд}}, \omega), \quad (6)$$

де  $\tau_{\text{вд}}$  – нечітка змінна.

Для розв'язання задачі визначення інтервалу  $\tau_{\text{вд}}$ , що характеризує надійність мережі, на першому етапі формується "чіткий" підхід до описання показників надійності і формуються відповідні аналітичні залежності, в яких  $\tau_{\text{вд}}$  виступають як аргументи. На другому етапі в одержаних моделях міняють значення чітких інтервалів на нечіткі  $\tau_{\text{вд}}$  і виконуються відповідні розрахунки показників надійності за правилами нечіткої логіки [14, 15].

Це дозволяє об'єднувати як накопичені дані про властивості об'єкта, так і експертні висновки. Результати, одержані цим методом з допомогою нечіткої логіки, дозволяють підвищити обґрунтованість рішень щодо забезпечення функціонування інженерних мереж та безаварійної експлуатації будівель.

В [16] розглядається використання експертної інформації про технічний стан будівель і споруд, що базуються на апараті нечіткої логіки [14, 15]. В статті розглядаються причини появи не тільки поточних, але і прогностичних дефектів на основі експертної апріорної інформації. При такому підході можуть бути скорочені витрати на обстеження будівель і споруд шляхом виключення заходів, не пов'язаних з причинами появи дефектів будівельних конструкцій.

В ході обстеження будівель і споруд фіксуються дефекти будівельних конструкцій, а також параметри стану конструкцій, які можуть виступати в якості передумов появи відповідних дефектів. Передбачається, що між фактом появи конкретного дефекту будівельної конструкції і передумовами до нього існує деякий взаємозв'язок. Характер вказаного зв'язку визначають експерти на основі

наявного досвіду і знань, причому свою думку вони висловлюють у термінах природної мови.

На основі отриманих висновків експертів будується математична модель, яка дозволяє визначати причинно-наслідкові зв'язки між дефектами будівельних конструкцій і чинниками, що впливають на ці дефекти. Результати такого моделювання можуть бути застосовні для прийняття рішень з управління технічним станом обстежуваних будівель і споруд. Математичну модель, що визначає взаємозв'язки між передумовами і причинами появи тих чи інших дефектів, можна представити схемою (рисунок 1).

$$[X] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}$$

– матриця (множина) передумов появи дефектів та пошкоджень будівельних елементів;  $n$  – загальна кількість передумов;

$$[D] = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_m \end{bmatrix}$$

– матриця (множина) висновків із причин виникнення дефектів та пошкоджень будівельних елементів;  $m$  – загальна кількість експертних висновків;

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1i} \\ r_{21} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{j1} & \dots & \dots & r_{ji} \end{bmatrix}$$

– матриця нечітких відносин між елементами множин  $X$  та  $D$ .

Відношення множин  $X$  та  $D$  можна представити як

$$D = X * R, \quad (7)$$

де символом  $*$  позначено правило композиції нечіткого висновку [17, 18].

Входи  $X$  моделі та її виходи  $D$  розглядаються як лінгвістичні змінні, що оцінюються нечіткими терм-множинами (множинами допустимих значень лінгвістичної змінної) з відповідними функціями належності.

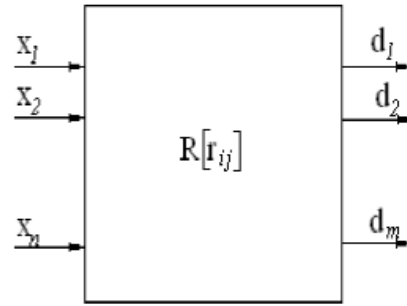


Рис. 1. Структурна модель ідентифікації дефектів та пошкоджень будівельних елементів

Система нечіткого висновку за результатами обстеження будівельного елемента може бути представлена у вигляді блок-схеми, що зображена на рисунку 2.

В цій структурі "фазифікатор" – це блок перетворення вектора  $X$  чітких значень параметрів стану конструкції у вектор  $\tilde{X}$  значень функцій належності ознак передумов дефектів та пошкоджень будівельного елемента, при цьому використовуються функції належності нечітких термів, що описують  $X$ . "Нечітка база знань" – це сукупність експертних процедур імплікації (операцій логіки "якщо..., то"), які призводять до отримання нечіткої множини вихідних змінних моделі. "Дефазифікатор" перетворює нечітке представлення вихідних параметрів моделі  $\tilde{D}$  в чітке значення  $D$ .

Використовуючи апарат нечіткої логіки, можна побудувати модель ідентифікації причин виникнення дефектів будівельних конструкцій різного типу. Одним з основних елементів моделі є база нечітких знань для певних типів дефектів конструкцій будівель і споруд, при формуванні якої використовуються знання і досвід фахівців-експертів. Ця модель дозволяє здійснити прогнозування появи пошкоджень будівель і споруд з тих або інших можливих причин. Отримувані прогнози дозволяють скоротити витрати на обстеження будівельних об'єктів та їх подальшу експлуатацію у зв'язку із своєчасним попередженням можливих руйнувань.

У наведених методах не повністю враховується невизначеність фактичних даних про будівельні елементи, яка обумовлена різною їх конструктивною складністю і категорією технічного стану, а також значною кількістю чинників, що призводять до пошкоджень. Зменшенню такої невизначеності сприятиме використання знань і досвіду фахівців-експертів у сукупності з результатами інструментального і візуального контролю.

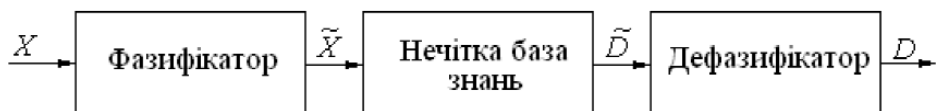


Рис. 2. Структура системи нечіткого висновку за результатами обстеження будівельного елемента

У [19, 20] наведено приклад нечіткої моделі, що дозволяє визначити причину появи тріщини цегляної конструкції на етапі візуального обстеження будівлі. Виходячи з того, що причини появи тріщин у цегляних конструкціях можна визначити, як статичне перевантаження; динамічне перевантаження; особливе перевантаження; дефекти фундаментів та деформація основи; температурні деформації; порушення технології будівельних робіт або неврахування властивостей матеріалів, будується математична модель у вигляді залежностей параметрів стану конструкцій від причин виникнення дефектів. Ієрархічний зв'язок між параметрами стану та причиною виникнення тріщини задається у вигляді нечітких баз знань.

### 3. Висновки

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 у 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 об'єктів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Обследование и испытание зданий и сооружений. Поверочные расчеты: Метод. указания / Сост. В. А. Соколов, Л.Н. Сияків, Д.А. Страхов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — 68 стр.*
2. *Ройтман А.Г. Надійність конструкцій експлуатованих будівель. М.:Стройиздат, 1985. 175 стр.*
3. *Галина Кулик. О построении диагностических моделей строительных конструкций: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры.*
4. *Соколов В.А. Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания. Электронный журнал. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010-08-05.*

стных методов распознавания. Электронный журнал. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010-08-05.

5. *Соколов В.А. Оценка технического состояния элементов строительных систем с использованием вероятностных методов распознавания // Дефекты зданий и сооружений: материалы XIУ научно-методической конференции №14. СПб.: Изд-во ВИТИ, 2010. — С. 54-63.*

6. *Соколов В.А. Вероятностный метод оценки технического состояния конструкций железобетонного монолитного перекрытия зданий старой городской застройки // Инженерно-строительный журнал, 2010, №4. С. 49-58.*

7. *Соколов В.А. Вероятностный анализ технического состояния конструкций зданий старой городской застройки // Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс: Сборник трудов Международного симпозиума №14, часть 1. Одесса: Внешрекламсервис, 2010. С. 242-250.*

8. *Соколов В.А. Многоуровневый вероятностный анализ технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений // Дефекты зданий и сооружений: материалы XU научно-методической конференции №15. СПб.: Изд-во ВИТИ, 2011. — С. 54-63.*

9. *Соколов В.А. Определение категорий технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений с использованием вероятностных методов распознавания // Сборник научных трудов IУ Международной конференции "Предотвращение аварий зданий и сооружений". — Выпуск 9. М.: 2010.*

10. *Соколов В. А. Вероятностный анализ технического состояния (ВАТС) элементов строительных систем // Материалы XIV научно-методической конференции ВИТУ "Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций СПб.: Изд-во ВИТУ, 2010.*

11. *Соколов В. А. Построение решения для оценки технического состояния конструктивных систем зданий и сооружений с использованием веро-*

ятностных методов распознавания // *Инженерно-строительный журнал*, 2010, №6. — С. 48-57.

12. Солдатенков Т.Н. *Экспертно-статистический метод оценивания параметров управляющих воздействий на инженерные сети зданий в условиях неопределенности* // *Инженерно-строительный журнал*, 2011, №5. — С. 60-66.

13. Рогонский В.А. *Эксплуатационная надежность зданий и сооружений* / В.А. Рогонский, А.И. Костриц, В.Ф. Шеряков и др. — СПб.: ОАО Издательство "Стройиздат СПб", 2004. — 272 стр.

14. Заде Л. *Понятие лингвистической переменной и ее применение к понятию приближенных решений*. М.: Мир, 1976. — 167 с.

15. Борисов А.Н., Крумберг О.Ф., Федоров И.П. *Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования*. Рига: Зинатне, 1990. — 184 с.

16. Солдатенков Т.Н. *Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования*. *Magazine of Civil Engineering*, 2011, №7.

17. *Прикладные нечеткие системы: пер. с япон.* / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иван и др.: под ред. Т. Тэрano, К. Асаи, М. Сугэно. Мир, 1993. — 368 с.

18. Ротштейн А.П., Кательников Д.И. *Идентификация нелинейных объектов нечеткими базами знаний* // *Кибернетика и системный анализ*, 1998, №6. — С. 53-61.

19. 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.

20. Панкевич О. Д, Штовба С. Д. *Застосування нечітких моделей для діагностики будівельних конструкцій*. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 2011, №4

#### АННОТАЦИЯ

В статье сделан анализ возможности определения технического состояния строительных конструкций в реальных условиях неопределенности.

Рассмотрены некоторые модели диагностирования технического состояния здания. Определена суть метода с использованием формулы Байеса и экспертно-статистический метод оценивания параметров зданий. Рассмотрена возможность применения нечеткой логики для диагностики зданий. Определена структурная модель идентификации дефектов и повреждений. Приведена блок-схема нечеткого вывода по результатам обследования. В статье сделан вывод, что применение экспертных систем способствует оптимизации продолжительности жизненного цикла строений и позволяет принимать экономически и технически обоснованные решения по их реконструкции или ликвидации.

Ключевые слова: длительная эксплуатация, неопределенность, модели диагностирования, вероятностные методы, формула Байеса, экспертно-статистический метод, нечеткая логика, структурная модель, система нечеткого вывода, экспертные системы.

#### ANNOTATION

The article is the analysis of the possibility of determining the technical state of building structures in the real world of uncertainty. Considered models diagnosing the technical condition of the building. Essence of the method using Bayesian formula and expert-statistical method of parameter estimation buildings. The possibility of application of fuzzy logic for building diagnostics. The structural model for identification of defects and damage. An flowchart fuzzy conclusion of the test. The article concludes that the use of expert systems helps optimize the duration of the life cycle of buildings and allows you to take an economically and technically sound solutions for their rehabilitation or liquidation.

Keywords: Long-term exploitation, uncertainty, model diagnostics likelihood methods, Bayesian formula, expert statistical method, fuzzy logic, structural model, fuzzy system concluded expert systems.