

УДК 002;69.059

Терентьев Александр Александрович

Кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій, orcid.org/0000-0001-6995-1419
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Шабала Євгенія Євгенівна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетичної безпеки та комп'ютерної інженерії, orcid.org/0000-0002-0428-9273
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Саченко Ілля Александрович

Співробітник, orcid.org/0000-0001-6995-1419
Корпорація «Альміс-Холдінг», Київ

ПОБУДОВА СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ НА ПРИКЛАДІ БАЛКИ ПЕРЕКРИТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Анотація. Розглянуто приклад проведення аналізу технічного стану конструктивного елемента балки перекриття з використанням методів та апарату теорії нечітких множин. Нечітка технологія завойовує все більше прихильників серед фахівців, працюючих в області прийняття рішень, коли обмеження і наслідки можливих дій точно невідомі. Взятиши старт ще в 1965 році з робіт Лотфі Заде, нечітка логіка набула широкого застосування в різних областях техніки наприкінці дев'яностих років. Основні положення, визначення і терміни теорії нечітких (розмитих, нечітко визначених, розпливчастих) множин сформульовані Л. Заде і розвинені далі в роботах. У даному випадку, в основу діагностування станів розглянутої підсистеми, пропонується покласти алгоритм постановки діагнозу. Розглянутий підхід сприяє визначеності при розпізнаванні станів конструкцій будівель в умовах обмеженості та неточності вхідної інформації. Також він додає впевненості експерту при обґрунтуванні необхідних рішень, про ступінь та глибину інженерного втручання в систему з метою приведення її в нормальний технічний стан.

Ключові слова: нечіткі множини; діагностика технічного стану; інформаційна технологія; нечіткі терми логічні рівняння; лінгвістичні змінні

Актуальність та аналіз проблеми

Актуальність роботи полягає в необхідності підвищення ефективності моделей і методів діагностики та прогнозування технічного стану будівель, реалізованих аналітичним апаратом нечітких множин, який дає можливість створити інформаційну платформу для накопичення реальної, достовірної та мінімально збиткової інформації, як потужного інструменту для точної і надійної діагностики часових етапів експлуатації будівель в межах життєвого циклу.

Мета статті

Головною метою є побудова системи діагностики технічного стану будівель на прикладі балки перекриття з використанням методів теорії нечітких множин.

Виклад основного матеріалу

Сформульовані стани S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 вважаються типами діагнозів, які підлягають розпізнаванню. При встановленні діагнозу беруться параметри – дев'ять діагностичних ознак з їх розрядами, представленими у вигляді діапазонів зміни: k_1 – пошкодження бетону, знижують його захисні властивості стосовно арматури (1 або 0); k_2 – поздовжні тріщини в захисному шарі бетону уздовж арматурних стержнів, продукти корозії уздовж арматурних стержнів (1 або 0); k_3 – наявність і ширина розкриття нормальних тріщин (0 – 1 мм); k_{14} – наявність похилих тріщин (1 або 0); k_5 – міцність бетону (0 – 31%); k_6 – корозія арматури (0 – 21%); k_7 – прогин (0 – 31%); k_8 – перевірка умови міцності за нормальними перетинами (1 або 0); k_9 – перевірка умови міцності по похилих перетинах (1 або 0).

Таблиця 1 – Діагностична матриця для балок перекриття в загальному вигляді

№ п/п	Діагностичні ознаки	K_{js}	Розряди ознак	$p(k_{ij})$	Стан S_1	Сост. S_2	Стан S_3	Стан S_4	Стан S_5
					$P(S_1)$	$P(S_2)$	$P(S_3)$	$P(S_4)$	$P(S_5)$
1	Пошкодження бетону, що знижують його властивості по відношенню до арматури	K_{11}	так	$p(k_{11})$	$p(k_{11} / S_1)$	$p(k_{11} / S_2)$	$p(k_{11} / S_3)$	$p(k_{11} / S_4)$	$p(k_{11} / S_5)$
		K_{12}	ні	$p(k_{12})$	$p(k_{12} / S_1)$	$p(k_{12} / S_2)$	$p(k_{12} / S_3)$	$p(k_{12} / S_4)$	$p(k_{12} / S_5)$
2	Поздовжні тріщини в захисному шарі вздовж арматурних стержнів	K_{21}	так	$p(k_{21})$	$p(k_{21} / S_1)$	$p(k_{21} / S_2)$	$p(k_{21} / S_3)$	$p(k_{21} / S_4)$	$p(k_{21} / S_5)$
		K_{22}	ні	$p(k_{22})$	$p(k_{22} / S_1)$	$p(k_{22} / S_2)$	$p(k_{22} / S_3)$	$p(k_{22} / S_4)$	$p(k_{22} / S_5)$
3	Нормальні тріщини (ширина розкриття)	K_{31}	< 0,4 мм	$p(k_{31})$	$p(k_{31} / S_1)$	$p(k_{31} / S_2)$	$p(k_{31} / S_3)$	$p(k_{31} / S_4)$	$p(k_{31} / S_5)$
		K_{32}	до 1,0 мм	$p(k_{32})$	$p(k_{32} / S_1)$	$p(k_{32} / S_2)$	$p(k_{32} / S_3)$	$p(k_{32} / S_4)$	$p(k_{32} / S_5)$
		K_{33}	≥ 1,0 мм	$p(k_{33})$	$p(k_{33} / S_1)$	$p(k_{33} / S_2)$	$p(k_{33} / S_3)$	$p(k_{33} / S_4)$	$p(k_{33} / S_5)$
4	Похилі тріщини (наявність)	K_{41}	так	$p(k_{41})$	$p(k_{41} / S_1)$	$p(k_{41} / S_2)$	$p(k_{41} / S_3)$	$p(k_{41} / S_4)$	$p(k_{41} / S_5)$
		K_{42}	ні	$p(k_{42})$	$p(k_{42} / S_1)$	$p(k_{42} / S_2)$	$p(k_{42} / S_3)$	$p(k_{42} / S_4)$	$p(k_{42} / S_5)$
5	Міцність бетону	K_{51}	проектна	$p(k_{51})$	$p(k_{51} / S_1)$	$p(k_{51} / S_2)$	$p(k_{51} / S_3)$	$p(k_{51} / S_4)$	$p(k_{51} / S_5)$
		K_{52}	≤ 30%	$p(k_{52})$	$p(k_{52} / S_1)$	$p(k_{52} / S_2)$	$p(k_{52} / S_3)$	$p(k_{52} / S_4)$	$p(k_{52} / S_5)$
		K_{53}	> 30%	$p(k_{53})$	$p(k_{53} / S_1)$	$p(k_{53} / S_2)$	$p(k_{53} / S_3)$	$p(k_{53} / S_4)$	$p(k_{53} / S_5)$
6	Корозія арматури	K_{61}	< 5%	$p(k_{61})$	$p(k_{61} / S_1)$	$p(k_{61} / S_2)$	$p(k_{61} / S_3)$	$p(k_{61} / S_4)$	$p(k_{61} / S_5)$
		K_{62}	5 – 20	$p(k_{62})$	$p(k_{62} / S_1)$	$p(k_{62} / S_2)$	$p(k_{62} / S_3)$	$p(k_{62} / S_4)$	$p(k_{62} / S_5)$
		K_{63}	> 20%	$p(k_{63})$	$p(k_{63} / S_1)$	$p(k_{63} / S_2)$	$p(k_{63} / S_3)$	$p(k_{63} / S_4)$	$p(k_{63} / S_5)$
7	Прогин	K_{71}	дозволений	$p(k_{71})$	$p(k_{71} / S_1)$	$p(k_{71} / S_2)$	$p(k_{71} / S_3)$	$p(k_{71} / S_4)$	$p(k_{71} / S_5)$
		K_{72}	≤ 30%	$p(k_{72})$	$p(k_{72} / S_1)$	$p(k_{72} / S_2)$	$p(k_{72} / S_3)$	$p(k_{72} / S_4)$	$p(k_{72} / S_5)$
		K_{73}	> 30%	$p(k_{73})$	$p(k_{73} / S_1)$	$p(k_{73} / S_2)$	$p(k_{73} / S_3)$	$p(k_{73} / S_4)$	$p(k_{73} / S_5)$
8	Умова міцності по нормальних перетинах	K_{81}	так	$p(k_{81})$	$p(k_{81} / S_1)$	$p(k_{81} / S_2)$	$p(k_{81} / S_3)$	$p(k_{81} / S_4)$	$p(k_{81} / S_5)$
		K_{82}	ні	$p(k_{82})$	$p(k_{82} / S_1)$	$p(k_{82} / S_2)$	$p(k_{82} / S_3)$	$p(k_{82} / S_4)$	$p(k_{82} / S_5)$
9	Умова міцності по похилих перетинах	K_{91}	так	$p(k_{91})$	$p(k_{91} / S_1)$	$p(k_{91} / S_2)$	$p(k_{91} / S_3)$	$p(k_{91} / S_4)$	$p(k_{91} / S_5)$
		K_{92}	ні	$p(k_{92})$	$p(k_{92} / S_1)$	$p(k_{92} / S_2)$	$p(k_{92} / S_3)$	$p(k_{92} / S_4)$	$p(k_{92} / S_5)$

Завдання діагностики полягає в тому, щоб кожному поєднанню значень параметрів поставити у відповідність одне з рішень: $S_i (i = \overline{1,5})$.

Параметри $k_1 - k_9$ розглядаються як лінгвістичні змінні. Для подальшого аналізу їх слід розділити на групи, які є лінгвістичними змінними:

k_1, k_2, k_4 – група параметрів, визначених при обстеженні візуально;

k_3, k_5, k_6, k_7 – група параметрів, визначених за результатами інструментальних вимірювань;

k_8, k_9 – група параметрів, що визначаються за результатами перевірочних розрахунків.

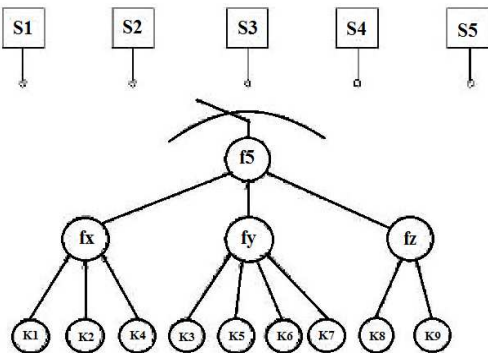


Рисунок 1 – Дерево логічного виведення

Крім того, вводиться лінгвістична змінна S , яка вимірюється діапазоном станів-діагнозів $S_1 - S_5$.

Структура моделі проведення діагностики станів розглянутої балки показана у вигляді дерева логічного виведення, яке зображене на рис. 1:

$$S = f_s(x, y, z); \quad x = f_x(k_1, k_2, k_4); \\ y = f_y(k_3, k_5, k_6, k_7); \quad z = f_z(k_8, k_9). \quad (1)$$

Для оцінки значень лінгвістичних змінних $k_1 - k_9$, а також x, y, z вводиться єдина шкала якісних термів:

- Н – низький;
- НС – нижче середнього;
- С – середній;
- ВС – вище середнього;
- В – високий.

Кожен з цих термів являє собою нечітку множину, що задана за допомогою відповідної функції приналежності. Користуючись введеними якісними термами і аналізуючи інтервали зміни чисельних значень ймовірностей, реалізації ознак $p = (k_{ij} / S_i)$ в діагностичній матриці (табл. 2), співвідношення (1) подаються у вигляді табл. 3 – 6.

Таблиця 2 – Діагностична матриця для балок перекриття з чисельними значеннями ймовірностей станів і ознак

№ п/п	Діагностичні ознаки	K_{ij}	Розряди ознак	$P(K_{ij})$	Стан S_1	Стан S_2	Стан S_3	Стан S_4	Стан S_5
					$P(S_1)$	$P(S_2)$	$P(S_3)$	$P(S_4)$	$P(S_5)$
					0,18	0,29	0,35	0,13	0,05
1	Пошкодження бетону, що знижують його властивості по відношенню до арматури	K_{11}	так	$P(K_{11})$	0,14	0,29	0,40	0,56	0,76
		K_{12}	ні	$P(K_{12})$	0,86	0,71	0,60	0,44	0,24
2	Поздовжні тріщини в захисному шарі вздовж арматурних стержнів	K_{21}	так	$P(K_{21})$	0,05	0,27	0,38	0,59	0,88
		K_{22}	ні	$P(K_{22})$	0,95	0,73	0,62	0,41	0,12
3	Нормальні тріщини (ширина розкриття)	K_{31}	< 0,4 мм	$P(K_{31})$	0,92	0,78	0,67	0,54	0,22
		K_{32}	до 1,0 мм	$P(K_{32})$	0,07	0,21	0,28	0,34	0,48
		K_{33}	≥ 1,0 мм	$P(K_{33})$	0,01	0,01	0,05	0,12	0,30
4	Похилі тріщини (наявність)	K_{41}	да	$P(K_{41})$	0,03	0,05	0,28	0,30	0,35
		K_{42}	нет	$P(K_{42})$	0,97	0,95	0,72	0,70	0,65
5	Міцність бетону	K_{51}	проектна	$P(K_{51})$	0,79	0,49	0,33	0,28	0,20
		K_{52}	≤ 30%	$P(K_{52})$	0,17	0,33	0,36	0,39	0,42
		K_{53}	> 30%	$P(K_{53})$	0,04	0,18	0,31	0,33	0,38
6	Корозія арматури	K_{61}	< 5%	$P(K_{61})$	0,73	0,52	0,33	0,26	0,13
		K_{62}	5 – 20	$P(K_{62})$	0,23	0,28	0,34	0,39	0,40
		K_{63}	> 20%	$P(K_{63})$	0,04	0,20	0,33	0,35	0,47
7	Прогин	K_{71}	дозволений	$P(K_{71})$	0,93	0,82	0,59	0,35	0,11
		K_{72}	≤ 30%	$P(K_{72})$	0,05	0,11	0,28	0,39	0,43
		K_{73}	> 30%	$P(K_{73})$	0,02	0,07	0,13	0,26	0,46
8	Умова міцності по нормальних перетинах	K_{81}	так	$P(K_{81})$	0,93	0,75	0,53	0,29	0,09
		K_{82}	ні	$P(K_{82})$	0,07	0,25	0,47	0,71	0,91
9	Умова міцності по похилих перетинах	K_{91}	так	$P(K_{91})$	0,94	0,83	0,75	0,55	0,33
		K_{92}	ні	$P(K_{92})$	0,06	0,17	0,25	0,45	0,67

Таблиця 3 – Знання про співвідношення s

S	S_1			S_2			S_3			S_4			S_5		
X	H	B	B	HC	C	BC	HC	HC	C	HC	C	C	HC	HC	BC
Y	H	H	B	H	HC	C	H	HC	HC	HC	HC	C	H	HC	C
Z	H	C	B	HC	C	BC	C	C	BC	HC	C	BC	HC	C	B

Таблиця 4 – Знання про співвідношення x

X	H			HC			C			BC			B		
K_1	HC	C	BC	C	HC	C	H	BC	BC	HC	C	BC	HC	HC	C
K_2	H	HC	BC	HC	C	C	H	B	B	HC	C	BC	HC	HC	C
K_4	HC	HC	C	HC	C	C	H	B	B	H	HC	BC	HC	C	BC

Таблиця 5 – Знання про співвідношення y

Y	H			HC			C			BC			B		
K_3	HC	HC	C	H	HC	C	H	H	B	H	HC	BC	H	HC	C
K_5	H	HC	HC	HC	HC	HC	H	H	BC	H	HC	C	HC	HC	HC
K_6	H	HC	C	HC	HC	HC	H	HC	BC	HC	HC	C	HC	HC	HC
K_7	H	HC	HC	H	HC	HC	H	H	B	H	H	BC	H	HC	C

Таблиця 6 – Знання про співвідношення z

Z	H			HC			C			BC			B		
k ₈	H	C	B	HC	C	BC	H	C	B	HC	C	BC	C	C	C
k ₉	HC	C	BC	C	C	C	H	C	B	H	HC	BC	HC	C	BC

Використовуючи таблиці 3-6 і логічні операції (I – min) і V (АБО – max), можна записати системи нечітких логічних рівнянь, що зв'язують функції належності діагнозів і вхідних лінгвістичних змінних:

$$\begin{aligned}
 \mu^{S_1}(s) &= [\mu^H(x) \cdot \mu^H(y) \cdot \mu^H(z)] \vee \\
 &[\mu^B(x) \cdot \mu^H(y) \cdot \mu^C(z)] \vee [\mu^B(x) \cdot \mu^{BC}(y) \cdot \mu^B(z)]; \\
 \mu^{S_2}(s) &= [\mu^{HC}(x) \cdot \mu^H(y) \cdot \mu^{HC}(z)] \vee \\
 &[\mu^C(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^C(z)] \vee [\mu^{BC}(x) \cdot \mu^C(y) \cdot \mu^{BC}(z)]; \\
 \mu^{S_3}(s) &= [\mu^{HC}(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^C(z)] \vee \\
 &[\mu^{HC}(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^C(z)] \vee [\mu^C(x) \cdot \mu^C(y) \cdot \mu^{BC}(z)]; \\
 \mu^{S_4}(s) &= [\mu^{HC}(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^{HC}(z)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^C(z)] \vee [\mu^C(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^{BC}(z)]; \\
 \mu^{S_5}(s) &= [\mu^{HC}(x) \cdot \mu^H(y) \cdot \mu^{HC}(z)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^C(z)] \vee [\mu^{BC}(x) \cdot \mu^{HC}(y) \cdot \mu^B(z)];
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^H(x) &= [\mu^{HC}(k_1) \cdot \mu^H(k_2) \cdot \mu^{HC}(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_1) \cdot \mu^{HC}(k_2) \cdot \mu^C(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_1) \cdot \mu^{BC}(k_3) \cdot \mu^C(k_4)]; \\
 \mu^{HC}(x) &= [\mu^{HC}(k_1) \cdot \mu^{HC}(k_2) \cdot \mu^{HC}(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(k_1) \cdot \mu^C(k_2) \cdot \mu^C(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_1) \cdot \mu^C(k_3) \cdot \mu^C(k_4)]; \\
 \mu^C(x) &= [\mu^H(k_1) \cdot \mu^H(k_2) \cdot \mu^H(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_1) \cdot \mu^B(k_2) \cdot \mu^B(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_1) \cdot \mu^B(k_3) \cdot \mu^B(k_4)]; \\
 \mu^{BC}(x) &= [\mu^{HC}(k_1) \cdot \mu^{HC}(k_2) \cdot \mu^H(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_1) \cdot \mu^C(k_2) \cdot \mu^{HC}(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_1) \cdot \mu^{BC}(k_3) \cdot \mu^{BC}(k_4)]; \\
 \mu^B(x) &= [\mu^{HC}(k_1) \cdot \mu^{HC}(k_2) \cdot \mu^H(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(k_1) \cdot \mu^{HC}(k_2) \cdot \mu^C(k_4)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_1) \cdot \mu^C(k_3) \cdot \mu^{BC}(k_4)];
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^H(y) &= [\mu^{HC}(k_3) \cdot \mu^H(k_5) \cdot \mu^H(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^{HC}(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^C(k_6) \cdot \mu^{HC}(k_7)]; \\
 \mu^{HC}(y) &= [\mu^H(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^{HC}(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^{HC}(k_7)];
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^C(y) &= [\mu^H(k_3) \cdot \mu^H(k_5) \cdot \mu^H(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^H(k_3) \cdot \mu^H(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^B(k_3) \cdot \mu^{BC}(k_5) \cdot \mu^{BC}(k_6) \cdot \mu^B(k_7)]; \\
 \mu^{BC}(y) &= [\mu^H(k_3) \cdot \mu^H(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_3) \cdot \mu^C(k_5) \cdot \mu^C(k_6) \cdot \mu^{BC}(k_7)]; \\
 \mu^B(y) &= [\mu^H(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^H(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^{HC}(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^{HC}(k_7)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_3) \cdot \mu^{HC}(k_5) \cdot \mu^{HC}(k_6) \cdot \mu^C(k_7)];
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 \mu^H(z) &= [\mu^H(k_8) \cdot \mu^{HC}(k_9)] \vee [\mu^C(k_8) \cdot \mu^C(k_9)] \vee \\
 &\vee [\mu^B(k_8) \cdot \mu^{BC}(k_9)]; \\
 \mu^{HC}(z) &= [\mu^{HC}(k_8) \cdot \mu^C(k_9)] \vee [\mu^C(k_8) \cdot \mu^C(k_9)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_8) \cdot \mu^C(k_9)]; \\
 \mu^C(z) &= [\mu^H(k_8) \cdot \mu^H(k_9)] \vee [\mu^C(k_8) \cdot \mu^C(k_9)] \vee \\
 &\vee [\mu^B(k_8) \cdot \mu^B(k_9)]; \\
 \mu^{BC}(z) &= [\mu^{HC}(k_8) \cdot \mu^H(k_9)] \vee [\mu^C(k_8) \cdot \mu^{HC}(k_9)] \vee \\
 &\vee [\mu^{BC}(k_8) \cdot \mu^{BC}(k_9)]; \\
 \mu^B(z) &= [\mu^C(k_8) \cdot \mu^{HC}(k_9)] \vee [\mu^C(k_8) \cdot \mu^C(k_9)] \vee \\
 &\vee [\mu^C(k_8) \cdot \mu^{BC}(k_9)];
 \end{aligned} \tag{5}$$

Загальне число нечітких логічних рівнянь, становить 20. У загальному випадку кожна вхідна змінна $k_1 - k_9$ має свої власні функції приналежності, нечіткі терми (H, HC, C, BC, B), які використовуються в цих двадцяти рівняннях (2) – (5).

Однак, для спрощення подальшого моделювання в рамках побудови нечіткої бази знань, для всіх змінних $k_1 - k_9$ використовується тільки одна форма функції приналежності. Для цього інтервали кожної змінної зводяться до одного універсального інтервалу (0,4), що здійснюється за допомогою таких співвідношень:

$$\mu^j(k_i) \tilde{\mu}^j(u); u = 4 \frac{k_i - k_i}{k_i - k_i}, j = H, nC, C, vC, B, \quad (6)$$

де (k_i) – інтервал зміни змінної $k_i, i = 1, 9$.

Кінцева аналітична модель функції належності має вигляд:

$$\tilde{\mu}^j(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2} \quad (7)$$

Параметр b для термів H, nC, C, vC, B приймає значення 0, 1, 2, 3, 4, відповідно. Параметр c для всіх термів однаковий і дорівнює 0,923. Вибір зазначених співвідношень (6) і параметрів b і c в зазначеному вигляді обумовлений тим, що вони є перевіреними апроксимацією функцій приналежності, отриманих методом парних порівнянь.

Далі, нечіткі логічні рівняння (2) – (5) разом з функціями належності нечітких термів (7) дозволяють приймати рішення про конкретний діагноз за наступним алгоритмом.

1. Фіксують значення параметрів стану для обстежуваного елемента, тобто визначають реалізацію ознак у вигляді кількісних значень, що потрапляють в межі зазначених діапазонів їх зміни:

$$K^* = (k_1^*, k_2^*, k_3^*, \dots, k_9^*). \quad (8)$$

2. Використовуючи співвідношення (7) і параметри b та c , визначають значення функцій приналежності при фіксованих значеннях параметрів k_i^* .

3. З використанням логічних рівнянь (2) – (5) обчислюються значення функцій приналежності при фіксованому векторі стану K^* для всіх діагнозів $S1, S2, S3, S4, S5$. При цьому важливо відзначити, що логічні операції \wedge і АБО (\vee) над функціями належності замінюються операціями \min і \max :

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min[\mu(a), \mu(b)]; \quad (9)$$

$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max[\mu(a), \mu(b)].$$

4. Нарешті, приймається остаточне рішення, для якого

$$\mu^{sj}(k_1^*, k_2^*, \dots, k_9^*) = \max[\mu^{sj}(k_1^*, k_2^*, \dots, k_9^*)], \quad (10)$$

$$j = \overline{1, 9}.$$

Приклад реалізації запропонованого алгоритму можна привести, побудувавши вектор стану K^*

в тому вигляді, який відповідає реалізації ознак обстежуваної балки. У такому випадку дотримуються ті ж умови діагностування:

1) пошкодження зовнішньої поверхні ϵ , тобто $K1 = 1,0$ мм;

2) поздовжні тріщини в захисному шарі ϵ , тобто $K2 = 1,0$ мм;

3) нормальні тріщини в розтягнутій зоні розкриттям до 0,4 мм ϵ , тобто приймається $K3 = 0,2$ мм;

4) похилі тріщини ϵ , тобто $K4 = 1,0$;

5) міцність бетону виявилася на 10% нижче проектної, тобто $K5 = 10\%$;

6) має місце оголення арматури, 5% переріз якої уражено корозією, тобто $K6 = 5\%$;

7) прогин не перевищує нормативний; тобто $K7 = 0$;

8) умова міцності при розрахунку за нормальних перетинах задовольняється, тобто $K8 = 1,0$;

9) умова міцності при розрахунку по похилих перетинах задовольняється, тобто $K9 = 1,0$.

Використовуючи модель (8) і значення прийнятих параметрів b і c , обчислюють значення функцій приналежності в точках $k_i^* (i = 1, 9)$ для всіх нечітких термів. Результати наведені у табл. 7.

Таблиця 7 – Значення функцій належності

№ п/п	k_i^*	u_i^*	$\mu^H(k_i^*)$	$\mu^{nC}(k_i^*)$	$\mu^C(k_i^*)$	$\mu^{vC}(k_i^*)$	$\mu^B(k_i^*)$
1	1,0	4,0	0,0506	0,086	0,176	0,460	1,0
2	1,0	4,0	0,0506	0,086	0,176	0,460	1,0
3	0,2	2,0	0,176	0,460	1,0	0,460	0,176
4	1,0	4,0	0,0506	0,086	0,176	0,460	1,0
5	10,0	1,29	0,339	0,910	0,628	0,226	0,104
6	5,0	0,95	0,485	0,997	0,437	0,169	0,084
7	0,0	0,0	1,0	0,460	0,176	0,086	0,0506
8	1,0	4,0	0,0506	0,460	0,176	0,460	1,0
9	1,0	4,0	0,0506	0,460	0,176	0,460	1,0

Далі отримані значення підставляють в рівняння (2):

$$\begin{aligned} \mu_H(x) &= [0,086 \cdot 0,0506 \cdot 0,086] \vee \\ &\vee [0,176 \cdot 0,086 \cdot 0,176] \vee \\ &\vee [0,460 \cdot 0,460 \cdot 0,176] = 0,176. \end{aligned}$$

Аналогічно:

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(x) &= 0,176; \mu_C(x) = 0,460; \mu_{vC}(x) = 0,460; \\ \mu_B(x) &= 0,176. \end{aligned}$$

Відповідно до рівнянь (10):

$$\begin{aligned} \mu_H(y) &= [0,460 \cdot 0,339 \cdot 0,485 \cdot 1,0] \vee \\ &[0,460 \cdot 0,910 \cdot 0,997 \cdot 0,460] \vee \\ &\vee [1,0 \cdot 0,910 \cdot 0,437 \cdot 0,460] = 0,460. \end{aligned}$$

Аналогічно:

$$\begin{aligned}\mu_{nC}(y) &= 0,460; \mu_C(y) = 0,176; \\ \mu_{\nu C}(y) &= 0,460; \mu_{\nu B}(y) = 0,176.\end{aligned}$$

Відповідно до рівнянь (5):

$$\begin{aligned}\mu_H(z) &= [0,0506 \cdot 0,086] \vee [0,176 \cdot 0,176] \vee \\ &\vee [1,0 \cdot 0,460] = 0,460.\end{aligned}$$

Аналогічно:

$$\begin{aligned}\mu_{nC}(z) &= 0,176; \mu_C(z) = 0,176; \\ \mu_{\nu C}(z) &= 0,460; \mu_{\nu B}(z) = 0,460.\end{aligned}$$

Нарешті, відповідно до рівнянь (1):

$$\begin{aligned}\mu_{S_1}(s) &= [0,176 \cdot 0,176 \cdot 0,460] \vee \\ &\vee [0,176 \cdot 0,460 \cdot 0,176] \vee \\ &\vee [0,176 \cdot 0,460 \cdot 0,460] = 0,176.\end{aligned}$$

Аналогічно:

$$\begin{aligned}\mu_{S_2}(s) &= 0,176; \mu_{S_3}(s) = 0,460; \\ \mu_{S_4}(s) &= 0,176; \mu_{S_5}(s) = 0,176.\end{aligned}$$

Висновок

На підставі теорії нечітких множин результати отриманих даних формулюються таким чином: оскільки найбільше значення функції приналежності відповідає рішенням S_3 , то в якості стану приймається непридатний технічний стан (категорія III) елемента балки перекриття.

Таким чином, розглянутий підхід сприяє визначеності при розпізнаванні станів конструкцій будівель в умовах обмеженості та неточності вхідної інформації. В сукупності з імовірнісними підходами та методами теорії інформації нечітких множин розглянутий підхід додає впевненості експерту при обґрунтуванні необхідних рішень, про ступінь та глибину інженерного втручання в систему з метою приведення її в нормальний технічний стан.

Список літератури

1. Терентьев О.О. Модели назначения физического зношения конструктивных элементов здания для задач диагностики технического состояния / О.И. Баліна, Є.Є. Шабала. – К.: Управління розвитком складних систем. – Вип. 26, КНУБА. – 2016. – С. 153-157.
2. Терентьев О.О. Основы организации нечеткого вывода для задачи диагностики технического состояния зданий та споруд [Текст] // О.О. Терентьев, Є.Є. Шабала, Б.С. Малина. – К.: Управління розвитком складних систем. – КНУБА, 2015. – №22. – С. 138 – 143.
3. Терентьев О.О. Інформаційна технологія системи діагностики технічного стану будівель на основі дослідження мікросейсмічних коливань / Є.Є. Шабала, Б.С. Малина. – К.: Управління розвитком складних систем. – Вип. 23, КНУБА, 2015. – С.133 – 139.
4. Terentyev Olexander. Development of models and methods for determining the physical deterioration of items for the task of diagnostics of technical condition of buildings and structures / Olexander Poltorak. – Scientific Journal «ScienceRise» № 8/2 (25), August 2016. – P. 14-19.
5. Terentyev Olexander. The Method of Direct Grading and the Generalized Method of Assessment of Buildings Technical Condition [Text] // Olexander Terentyev, Mykola Tsiutsiura. – International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 4 Issue 7, July 2015. – P. 827-829.
6. Terentyev Olexander. Risk assessment of delayed damage diagnostics of technical condition of building structures / Olexander Poltorak. – Scientific Journal «ScienceRise» №2 (31), February 2017. – P. 42-45.
7. Михайленко В.М. Аналіз сучасних інформаційних методів системи діагностики технічного стану будівель / О.О. Терентьев, Є.Є. Шабала. – К.: Управління розвитком складних систем. – Вип. 29, КНУБА, 2017. – С. 136-143.
8. Інтегровані моделі і методи автоматизованої системи діагностики технічного стану об'єктів будівництва [Текст] : монографія / В.М. Михайленко, П.Є. Григоровський, І.В. Русан, О.О. Терентьев. – К: ЦП «Компринт», 2017. – С. 229.
9. Сімак С.В. Прогнозування ймовірних наслідків розвитку ринкових перетворень у будівельному комплексі / С.В. Сімак // Сучасні тенденції розвитку менеджменту: збірник матеріалів міжрегіональної наукової конференції. – Запоріжжя: ЗНУ, 2010. – С. 172-173.
10. Калинин В.М. Оценка технического состояния зданий: учебник / В.М. Калинин, С.Д. Сокова. – М.: ИНФРА. – 2006. – 268 с.

Стаття надійшла до редколегії 24.07.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Михайленко, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Терентьев Александр Александрович

Доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий проектирования и прикладной математики, orcid.org/0000-0002-2928-8459

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Шабала Евгения Евгеньевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, orcid.org/0000-0002-0428-9273

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Саченко Илья Александрович

Сотрудник корпорации «Альтис-Холдинг», Киев, orcid.org/0000-0001-6995-1419

**ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ
БАЛКИ ПЕРЕКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

Аннотация. Рассмотрен пример проведения анализа технического состояния конструктивного элемента балки перекрытия с использованием методов и аппарата теории нечетких множеств. Нечеткая технология завоевывает все больше сторонников среди специалистов, работающих в области принятия решений, когда ограничения и последствия возможных действий точно неизвестны. Взяв старт еще в 1965 году в работах Лотфи Заде, в конце девяностых годов нечеткая логика нашла широкое применение в различных областях техники. Основные положения, определения и термины теории нечетких (размытых, нечетко определенных, расплывчатых) множеств сформулированы Л. Заде и развиты в работах других авторов. В данном случае в основу диагностики состояний рассматриваемой подсистемы положен алгоритм постановки диагноза. Рассмотренный подход способствует определенности при распознавании состояний конструкций зданий в условиях ограниченности и неточности входной информации. Также он добавляет уверенности эксперту при обосновании необходимых решений, дает представление о степени и глубине инженерного вмешательства в систему с целью приведения ее в нормальное техническое состояние.

Ключевые слова: нечеткие множества; диагностика технического состояния; информационная технология; нечеткие термы; логические уравнения; лингвистические переменные

Terentyev Oleksander Oleksandrovich

Ph.D., professor, Department of Information Technology and applied mathematics, orcid.org/0000-0002-2928-8459

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Shabala Yevheniia

Ph.D., associate professor, Department of cyber security and Computer Engineering, orcid.org/0000-0002-0428-9273

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Sachenko Piya

Employee corporation Altis-Holding, Kiev, orcid.org/0000-0001-6995-1419

**CONSTRUCTION OF THE SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF BUILDINGS ON
THE EXAMPLE OF BEAMS OF OVERLAP USING FUZZY SET THEORY METHODS**

Abstract. In the article an example of the analysis of the technical condition of the structural element of the beam of overlap using the methods and the apparatus of the theory of fuzzy sets is considered. Fuzzy technology gains more and more supporters among decision-makers, when the limitations and consequences of possible actions are not exactly known. Having started in 1965 with works by Lotfi Zade, fuzzy logic was widely used in various fields of technology in the late nineties. The main provisions, definitions and terms of the theory of fuzzy (blurry, vague, vague) sets are formulated by L. Zade and further developed in the works. In this case, in the basis of diagnosing the states of the considered subsystem, it is proposed to put the algorithm of the diagnosis. The considered approach contributes to the certainty when recognizing the state of building constructions in the conditions of limitations and inaccuracies of the input information. He also adds confidence to the expert in substantiating the necessary decisions about the degree and depth of engineering intervention in the system in order to bring it to normal technical condition.

Keywords: Fuzzy sets, diagnostics of technical condition, information technology, fuzzy terms, logical equations, linguistic variables

References

1. Terentyev, Alexandr, Shabala, Yevgeniya, & Helena, Balina, (2015). Model definition of physical deterioration of structural elements the building for the tasks of diagnostics of technical condition. *Management of Development of Complex Systems*, 26, 153 – 157 [in Ukrainian].

2. O.O. Terentyev, Ye.E. Shabala, B.S. Malina, (2015). *Fundamentals of the organization of fuzzy output for the task of diagnosing the technical condition of buildings and structures.* – Kyiv, Ukraine: *Management of development of complex systems*, 22, 138 – 143.
 3. Terent'ev, Alexandr, Shabala, Yevgeniya, & Malina, Bogdan, (2015). *Information technology of buildings of technical diagnostic based research microseismic vibrations.* *Management of Development of Complex Systems*, 23 (1), 133-139.
 4. Terentyev Olexander, Poltorak Olexander, (2016). *Development of models and methods for determining the physical deterioration of items for the task of diagnostics of technical condition of buildings and structures.* – *Scientific Journal «Science Rise» №8/2 (25), August 2016, 14-19.*
 5. Terentyev Olexander, Terentyev Olexander, Tsiutsiura Mykola, (2015). *The Method of Direct Grading and the Generalized Method of Assessment of Buildings Technical Condition.* – *International Journal of Science and Research (IJSR) Volume 4 Issue 7, July 2015, 827-829.*
 6. Terentyev Olexander, Poltorak Olexander, (2017). *Risk assessment of delayed damage diagnostics of technical condition of building structures.* – *Scientific Journal «Science Rise» №2 (31), February 2017, 42-45.*
 7. Mikhailenko V.M. Terentyev O.O, & Shabala Ye.E. (2017). *Analysis of modern information methods of the system of diagnostics of the technical condition of buildings.* Kyiv, Ukraine: *Management of development of complex systems*, 29, 136 – 143.
 8. Mikhailenko B.M., Grigorovsky P.E., Rusan I.V., Terentyev O.O., (2017). *Integrated models and methods of the automated system of diagnostics of technical condition of construction objects [Text]: monograph.* – K: CP "Komprint", 229 p.
 9. Simak, S.V. (2010). *Predicting the likely consequences of market reforms in the construction industry.* – Zaporizhia, Ukraine: *Modern trends in management: Proceedings of the interregional conference*, 172-173.
 10. Kalinin, V.M., Sokova, S.D. (2006). *Evaluation of technical condition of buildings.* Moscow, Russia: INFRA, 268.
-

Посилання на публікацію

- APA Terent'ev O., Shabala, Ye., & Sachenko, I. (2017). *Construction of the system of diagnostics of technical condition of buildings on the example of beams of overlap using fuzzy set theory methods.* *Management of Development of Complex Systems*, 31, 145 – 152 [in Ukrainian].
- ГОСТ Терентьев, О.О. *Побудова системи діагностики технічного стану будівель на прикладі балки перекриття з використанням методів теорії нечітких множин [Текст] / О.О. Терентьев, Шабала Є.Є., Саченко І.А. // Управління розвитком складних систем.* – 2017. – № 31. – С. 145 – 152.