Експериментальне моделювання підтвердило здатність нейронних мереж ефективно апроксимувати складні функції, що підкреслює їх актуальність для задач прогнозування, керування та аналізу сигналів. Нейронні мережі залишаються ключовою технологією, яка визначає напрям розвитку ШІ та робототехніки.

Список використаних джерел

1. Kingma D., Welling M. Auto-encoding variational Bayes. 2014. URL: https://arxiv.org/abs/1312.6114 (дата звернення: 26.11.2025).

2. Deep residual learning for image recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* 2016. P. 770–778.

3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation.* 1997. Vol. 9, № 8. P. 1735–1780.

4. Attention is all you need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar et al. *Advances in Neural Information Processing Systems.* 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.

5. Baltrusaitis T., Ahuja C., Morency L. Multimodal machine learning: a survey and taxonomy. *IEEE Signal Processing Magazine.* 2019. Vol. 36, № 1. P. 27–45.

УДК 004.8:330.4

Русавський О. О., аспірант,
Роштейн О. П., д-р техн. наук, професор
кафедри інформаційних технологій

ПРОЄКТУВАННЯ НЕЧІТКИХ КОГНІТИВНИХ КАРТ МЕТОДОМ НАЙМЕНШОГО ВПЛИВУ

Донецький національний університет імені Василя Стуса, м. Вінниця

Вступ. Нечіткі когнітивні карти (НКК) [1; 2] є зручним інструментом для моделювання узагальнених динамічних систем, до яких належать промислове підприємство, людський організм, бойові дії та інші системи, що розглядаються як взаємопов'язана сукупність об'єктів і процесів, які змінюються з часом [3]. Важливим етапом побудови НКК є визначення сили впливу (w_{ij}) між концептами C_i та C_j, які відповідають змінним стану системи. Пряме призначення числових значень сил впливу w_{ij} пов'язане з великою часткою суб'єктивізму. Експерту важко дати чітку числову оцінку величини w_{ij}, але він легко користується якісними порівняннями, як-от: однакова, трохи більше (менше), набагато більше (менше) тощо. Парні порівняння реалізовані в методі ієрархії Сааті [4]. Складність цього методу полягає в необхідності побудови повної матриці парних порівнянь і перевірки її узгодженості.

Для зменшення кількості опитувань експертів і обчислень пропоновано скористатись методом «найгіршого випадку», який представлено у роботі [5].

Метод. Передбачається наявність експерта, який здатен:

– визначити множину концептів НКК;

– визначити множини позитивних і негативних впливів між концептами;

– в множинах позитивних і негативних впливів визначити найменші впливи;

– порівняти кожен із впливів з найменшим впливом за 9-бальною шкалою Сааті (табл. 1).

Зв'язки поділяються на дві групи: *позитивні* ($w_{ij} > 0$) та *негативні* ($w_{ij} < 0$).

У кожній групі експерт обирає зв'язок із *найменшою силою впливу* (w_{min}), якому присвоюється ранг r_{min}.

Усі інші зв'язки порівнюються з найменшим. Ранг r_i характеризує силу впливу так, що виконується співвідношення:

$$\frac{w_1}{r_1} = \frac{w_2}{r_2} = \cdots = \frac{w_{min}}{r_{min}} = \cdots = \frac{w_n}{r_n}.$$

Відношення рангів оцінюється за шкалою Сааті (табл. 1).

Таблиця 1 – Шкала порівнянь Сааті

r_i відносно r_{min}	$\frac{r_i}{r_{min}}$
Такий самий	1
Трохи сильніший	3
Сильніший	5
Значно сильніший	7
Абсолютно сильніший	9

З огляду на умову нормування $w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1$ сила найменшого впливу визначається на такою формулою:

$$w_{min} = \frac{1}{\frac{r_1}{r_{min}} + \frac{r_2}{r_{min}} + \cdots + \frac{r_n}{r_{min}}}. \quad (1)$$

Решта ваг визначаються через найменшу силу впливу:

$$w_1 = w_{min} \cdot \frac{r_1}{r_{min}}, w_2 = w_{min} \cdot \frac{r_2}{r_{min}}, \ldots, w_n = w_{min} \cdot \frac{r_n}{r_{min}}.$$

Отримані значення сил впливу нормалізуються шляхом ділення на найбільшу силу впливу.

Приклад. Розглянемо абстрактну НКК, що складається з 7 концептів ($C_1 \ldots C_7$), структура якої наведена на рис. 1.

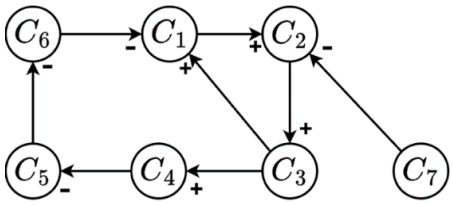

Рисунок 1 – Граф НКК

Ваги позитивних впливів визначаються множиною: $\{w_{1,2}, w_{2,3}, w_{3,1}, w_{3,4}\}$. Припускаємо, що вага найменшого позитивного впливу: $w_{1,2} = w(C_1 \to C_2)$.

Таблиця 2 – Порівняння позитивних впливів

Сила впливу	**Порівняння з найменшим впливом**	**Відношення рангу**
$w_{1,2}$	Такий самий	$r_{1,2}/r_{1,2} = 1$
$w_{2,3}$	Трохи сильніший	$r_{2,3}/r_{1,2} = 3$
$w_{3,1}$	Сильніший	$r_{3,1}/r_{1,2} = 5$
$w_{3,4}$	Значно сильніший	$r_{3,4}/r_{1,2} = 7$

Підставивши відношення рангів з табл. 2 у формулу (2), отримаємо:

$$w_{1,2} = \frac{1}{r_{1,2}/r_{1,2} + r_{2,3}/r_{1,2} + r_{3,1}/r_{1,2} + r_{3,4}/r_{1,2}} = \frac{1}{1+3+5+7} = \frac{1}{16}.$$

Решта сил впливу розраховується за формулами пропорції, наведеними в табл. 3. Для нормалізації значення діляться на максимум $(w_{3,4})$.

Таблиця 3 – Сили позитивних впливів

Сила впливу	$\boldsymbol{w_{1,2}}$	$\boldsymbol{w_{2,3}}$	$\boldsymbol{w_{3,4}}$	$\boldsymbol{w_{3,1}}$
Перед нормалізацією	$\frac{1}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$
Після нормалізації	$\frac{1}{7} \approx 0.14$	$\frac{3}{7} \approx 0.43$	$\frac{5}{7} \approx 0.71$	$\frac{7}{7} = 1$

Ваги негативних впливів визначаються множиною: $\{w_{4,5}, w_{5,6}, w_{6,1}, w_{7,2}\}$. Припускаємо, що вага найменшого позитивного впливу: $w_{4,5} = w(C_4 \to C_5)$.

Таблиця 4 – Порівняння негативних ваг

Сила впливу	**Порівняння з найменшим впливом**	**Відношення рангу**
$w_{4,5}$	Такий самий	$r_{4,5}/r_{4,5} = 1$
$w_{6,1}$	Трохи сильніший	$r_{6,1}/r_{4,5} = 3$
$w_{7,2}$	Трохи сильніший	$r_{7,2}/r_{4,5} = 5$
$w_{5,6}$	Сильніший	$r_{5,6}/r_{4,5} = 7$

Підставивши відношення рангів з табл. 4 у формулу (2), отримаємо:

$$w_{4,5} = \frac{1}{r_{4,5}/r_{4,5} + r_{6,1}/r_{4,5} + r_{7,2}/r_{4,5} + r_{5,6}/r_{4,5}} = \frac{1}{1+3+3+5} = \frac{1}{12}.$$

Решту сил впливу розраховують за формулами пропорції, наведеними в табл. 5. Для нормалізації значення ділять на максимум $(w_{5,6})$.

Таблиця 5 – Сили негативних впливів

Сила впливу	$w_{4,5}$	$w_{6,1}$	$w_{7,2}$	$w_{5,6}$
Перед нормалізацією	$\frac{1}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{3}{12}$	$\frac{5}{12}$
Після нормалізації	$\frac{1}{5} = 0.20$	$\frac{3}{5} = 0.60$	$\frac{3}{5} = 0.60$	$\frac{5}{5} = 1$

Результати табл. 3 та 5 зводяться у матрицю суміжності W, що наведена у табл. 6.

Таблиця 6 – Матриця ваг дуг НКК

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
C_1	0	0.14	0	0	0	0	0
C_2	0	0	0.43	0	0	0	0
C_3	1.00	0	0	0.71	0	0	0
C_4	0	0	0	0	–0.20	0	0
C_5	0	0	0	0	0	–1.00	0
C_6	–0.60	0	0	0	0	0	0
C_7	0	–0.60	0	0	0	0	0

Висновки. Результатом роботи є метод найменшого впливу для оцінки ваг дуг нечіткої когнітивної карти. Сутність методу полягає у визначенні найменших ваг дуг серед позитивних і негативних впливів та порівнянні з найменшою вагою останніх ваг дуг за 9-бальною шкалою Сааті. Застосування методу забезпечує зменшення рівня суб'єктивізму експерта в порівнянні з прямим числовим оцінюванням ваг дуг, а також значно меншу кількість обчислень, порівняно з методом ієрархій Сааті.

Список використаних джерел

1. Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies.* 1986. Vol. 24. P. 65–75.

2. Нечіткий сценарний аналіз узагальнених динамічних систем / О. П. Ротштейн, А. А. Кашканов, О. В. Зелінська, Д. І. Катєльніков. *Кібернетика і системний аналіз.* 2026. № 1.

3. Glushkov V. M. Introduction to ASU. Kiev: Technika, 1974.

4. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences.* 2008. Vol. 1, № 1. P. 83–98.

5. Fuzzy multicriteria selection of alternatives: the worst-case method / A. Rotshtein, E. Shnaider, M. Schneider, A. Kandel. *International Journal of Intelligent Systems.* 2010. Vol. 25. P. 948–957.