

УДК 512.44

DOI [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2026.49\(2\).308-316](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2026.49(2).308-316)**М. М. Шаркаді**

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,  
доцент кафедри кібернетики і прикладної математики,  
кандидат економічних наук, доцент  
[marianna.sharkadi@uzhnu.edu.ua](mailto:marianna.sharkadi@uzhnu.edu.ua)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1850-996X>

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ БЕЗПЕКООРІЄНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ СОЦІО-ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

У статті розглянуто проблему підтримки прийняття рішень у соціо-еколого-економічних системах в умовах невизначеності інформації. Метою дослідження є розроблення моделі інтелектуальної гібридної системи підтримки безпекоорієнтованого управління, що поєднує методи нечіткого моделювання та машинного навчання. Запропоновано математичну модель, яка базується на використанні лінгвістичних змінних, функцій належності та бази нечітких правил для оцінювання інтегрального рівня безпеки системи. Для підвищення адаптивності та прогностичних можливостей системи інтегровано модуль машинного навчання, що забезпечує прогнозування значень індикаторів на основі історичних даних.

Сформовано систему індикаторів, яка охоплює економічні, соціальні, екологічні та інституційні аспекти функціонування соціо-еколого-економічної системи. Розроблено процедуру нечіткого висновку, що включає фазифікацію вхідних даних, активізацію правил, агрегування результатів та дефазифікацію для отримання числового значення інтегрального показника безпеки. Проведено демонстраційний приклад застосування запропонованої моделі, який підтверджує її здатність оцінювати поточний стан системи та прогнозувати його зміну.

Отримані результати свідчать, що використання гібридного підходу, який поєднує нечітку логіку та методи машинного навчання, дозволяє підвищити точність оцінювання, адаптивність та інтерпретованість систем підтримки прийняття рішень у задачах безпекоорієнтованого управління соціо-еколого-економічними системами.

**Ключові слова:** нечітка логіка, машинне навчання, гібридна система, підтримка прийняття рішень, соціо-еколого-економічні системи, безпекоорієнтоване управління, невизначеність.

**1. Вступ.** Сучасні соціо-еколого-економічні системи функціонують в умовах високої динамічності, складності взаємозв'язків між економічними, соціальними та екологічними процесами, а також значного рівня невизначеності інформації. Ефективне управління такими системами передбачає своєчасне виявлення загроз, оцінювання ризиків і формування обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на забезпечення стабільності та безпеки їх функціонування. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває концепція безпекоорієнтованого управління, яка передбачає інтеграцію економічних, соціальних та інституційних аспектів розвитку системи з урахуванням потенційних ризиків і невизначеностей середовища.

Однією з основних проблем управління соціо-еколого-економічними системами є невизначеність інформації, що виникає через неповноту даних, наявність якісних показників та суб'єктивність експертних оцінок. У таких умовах

використання класичних економіко-математичних моделей часто є недостатньо ефективним. Для розв'язання цієї проблеми у сучасних дослідженнях активно використовуються методи нечіткої логіки, які дозволяють формалізувати лінгвістичні знання та працювати з нечіткими даними.

Зокрема, у [4] запропоновано гібридну систему прийняття рішень на основі нечітких представлень даних. У роботі [1] поєднання нечіткої логіки з алгоритмом Random Forest забезпечує підвищення точності прогнозування. Дослідження [3] демонструє ефективність fuzzy decision support system для аналізу ризиків, а в [2] показано переваги інтеграції машинного навчання у нечіткі регресійні моделі.

Сучасні підходи також включають гібридні системи, що поєднують нечіткі моделі та алгоритми машинного навчання. Наприклад, у [5] реалізовано поєднання CNN і нечіткої логіки для задач діагностики, а в [6] доведено підвищення інтерпретованості та адаптивності таких систем.

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання інтеграції нечіткого моделювання, машинного навчання та багатокритеріального оцінювання в єдиній системі підтримки безпекоорієнтованого управління залишаються недостатньо розробленими.

Таким чином, науковою проблемою є розроблення інтелектуальної гібридної системи підтримки прийняття рішень, яка поєднує можливості нечіткого моделювання та методів машинного навчання для оцінювання, прогнозування та управління станом соціо-еколого-економічних систем в умовах невизначеності інформації.

Метою дослідження є розроблення моделі інтелектуальної гібридної системи підтримки безпекоорієнтованого управління соціо-еколого-економічними системами, що інтегрує нечітке моделювання та методи машинного навчання для аналізу, оцінювання та прогнозування стану системи.

**2. Постановка задачі та математична модель.** Соціо-еколого-економічна система характеризується множиною взаємопов'язаних факторів, що описують економічний, соціальний, екологічний та інституційний стан об'єкта управління. У задачах безпекоорієнтованого управління необхідно здійснювати комплексне оцінювання стану системи, прогнозування можливих змін та формування управлінських рішень в умовах невизначеності інформації.

Нехай стан соціо-еколого-економічної системи описується множиною показників

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

де  $x_i$  — значення  $i$ -го індикатора, що характеризує стан системи.

До таких індикаторів можуть належати економічні, соціальні, екологічні та інституційні показники.

Множина критеріїв оцінювання безпеки системи визначається як

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\},$$

де  $k_j$  — критерій оцінювання стану системи.

Задача безпекоорієнтованого управління полягає у визначенні інтегрального показника рівня безпеки системи

$$S = F(X),$$

де  $S$  — інтегральний індекс безпеки системи,  $F$  — функція агрегування показників.

У реальних задачах значення показників часто мають нечіткий характер. Тому кожному показнику  $x_i$  ставиться у відповідність нечітка множина

$$A_i = \{(x_i, \mu_i(x_i))\},$$

де  $\mu_i(x_i)$  — функція належності значення показника  $x_i$  до відповідної лінгвістичної категорії і визначається як  $\mu_i : X_i \rightarrow [0, 1]$ .

Знання експертів щодо оцінювання стану системи формалізуються у вигляді бази нечітких правил  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$ , де  $r_l$  — нечітке правило виду:

$$\mathbf{IF} \ x_1 \in A_1^l \wedge x_2 \in A_2^l \wedge \dots \wedge x_n \in A_n^l \ \mathbf{THEN} \ S \in B^l.$$

Тут  $A_i^l$  — нечітка множина для  $i$ -го показника,  $B^l$  — нечітка оцінка рівня безпеки.

Для обчислення ступеня активізації правила використовується оператор

$$\alpha_l = \min(\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \dots, \mu_n(x_n)).$$

Інтегральна нечітка оцінка визначається агрегуванням результатів усіх правил  $\mu_S = \max_l(\alpha_l)$ .

Остаточне значення індексу безпеки визначається методом дефазифікації

$$S = \frac{\int y \cdot \mu_S(y) dy}{\int \mu_S(y) dy}.$$

Для підвищення адаптивності системи до змін середовища у модель інтегрується модуль машинного навчання.

Нехай  $X_t = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}$  — вектор показників у момент часу  $t$ .

Модель прогнозування має вигляд

$$\hat{X}_{t+1} = M(X_t),$$

де  $M$  — модель машинного навчання.

Тоді, інтегральна модель інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень визначається як  $S = H(X, R, W, M)$ , де  $X$  — вектор вхідних показників,  $R$  — база нечітких правил,  $W$  — вагові коефіцієнти критеріїв,  $M$  — модуль машинного навчання.

Задача управління формулюється як задача оптимального вибору управлінських рішень

$$U^* = \arg \max_{U \in \Omega} S(U),$$

де  $U$  — множина можливих управлінських рішень,  $\Omega$  — допустима область рішень,  $S(U)$  — функція оцінювання рівня безпеки системи.

**3. Функціонування інтелектуальної гібридної системи та приклад застосування.** Запропонована інтелектуальна система підтримки безпекоорієнтованого управління соціо-еколого-економічними системами реалізує процес аналізу, оцінювання та прогнозування стану системи в умовах невизначеності

інформації. Система поєднує методи нечіткого моделювання, багатокритеріального аналізу та машинного навчання.

Функціонування системи передбачає послідовне виконання кількох взаємопов'язаних етапів.

На першому етапі формується система індикаторів, що охоплюють економічні, соціальні, екологічні та інституційні аспекти функціонування системи. Це забезпечує комплексність оцінювання та врахування взаємозв'язків між складовими. Для прикладу запропонована система показників (табл. 1) дозволяє комплексно оцінити стан соціо-еколого-економічної системи та врахувати взаємозв'язки між різними складовими її функціонування.

Таблиця 1.

Система індикаторів безпекоорієнтованого управління соціо-еколого-економічною системою

Група індикаторів	Показник	Економічний зміст показника
<b>Економічні</b>	Рівень економічного зростання	Відображає динаміку розвитку економічної системи та її здатність до стабільного функціонування
	Рівень інвестиційної активності	Характеризує обсяг інвестицій у розвиток економічної системи
	Рівень фінансової стабільності	Визначає здатність системи підтримувати збалансований фінансовий стан
<b>Соціальні</b>	Рівень зайнятості населення	Показує рівень використання трудових ресурсів та економічну активність населення
	Рівень соціального добробуту	Характеризує якість життя населення та рівень соціального забезпечення
	Рівень доступності освіти	Відображає можливість населення отримувати освітні послуги
	Рівень доступності медичних послуг	Характеризує стан системи охорони здоров'я
<b>Екологічні</b>	Рівень соціальної стабільності	Показує рівень соціальної напруги та стабільності у суспільстві
	Рівень екологічної безпеки	Визначає стан навколишнього середовища
	Рівень забруднення довкілля	Характеризує антропогенний вплив на екосистеми
<b>Інституційні</b>	Ефективність використання природних ресурсів	Відображає раціональність використання ресурсного потенціалу
	Рівень ефективності управління	Характеризує якість управлінських рішень та функціонування інститутів
	Рівень розвитку інституційної інфраструктури	Відображає стан економічних та соціальних інститутів
	Рівень інноваційного розвитку	Характеризує здатність системи до технологічного оновлення

Аналіз наведених у таблиці індикаторів показує, що безпекоорієнтоване управління соціо-еколого-економічною системою повинно базуватися на комплексному врахуванні економічних, соціальних, екологічних та інституційних

факторів. Запропонована система показників дозволяє сформуванати багатокритеріальну модель оцінювання стану системи, у якій кожен індикатор характеризує окремий аспект її функціонування. Використання такої структури індикаторів забезпечує можливість інтегрованого аналізу стану соціо-еколого-економічної системи та створює основу для побудови нечіткої моделі оцінювання рівня її безпеки.

Нехай стан соціо-еколого-економічної системи описується множиною показників

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\},$$

де  $x_1$  — рівень економічної стабільності,  $x_2$  — рівень соціального розвитку,  $x_3$  — рівень екологічної безпеки,  $x_4$  — ефективність інституційного управління.

Значення показників попередньо нормалізуються на інтервалі  $x_i \in [0, 1]$ .

Для прикладу розглянемо такі значення показників: економічна стабільність — 0.7, соціальний розвиток — 0.6, екологічна безпека — 0.55, інституційна ефективність — 0.65.

На наступному етапі здійснюється перетворення числових значень показників у лінгвістичні змінні.

Кожному індикатору ставиться у відповідність лінгвістична змінна  $L_i = \{\text{низький, середній, високий}\}$ . Лінгвістичні змінні описуються функціями належності  $\mu_i(x_i) : X_i \rightarrow [0, 1]$ .

Функції належності дозволяють формалізувати експертні знання щодо оцінювання стану системи.

Наприклад, для показника економічної стабільності можуть бути отримані такі значення функцій належності: низький — 0, середній — 0.3, високий — 0.7. Аналогічні обчислення виконуються для інших показників.

Після визначення лінгвістичних змінних та побудови відповідних функцій належності наступним етапом є формування бази нечітких правил, яка відображає експертні знання щодо оцінювання рівня безпеки соціо-еколого-економічної системи.

Таблиця 2.

База нечітких правил оцінювання рівня безпеки соціо-еколого-економічної системи

№ правила	Економічна стабільність	Соціальна стабільність	Екологічна безпека	Інституційна ефективність	Рівень безпеки системи (S)
R1	низька	низька	низька	низька	дуже низький
R2	низька	низька	середня	низька	низький
R3	низька	середня	середня	середня	низький
R4	середня	середня	середня	середня	середній
R5	середня	висока	середня	висока	середній
R6	висока	середня	висока	висока	високий
R7	висока	висока	середня	висока	високий
R8	висока	висока	висока	висока	дуже високий

Нечіткі правила дозволяють встановити залежності між значеннями індикаторів системи та інтегральною оцінкою її стану. База нечітких правил формується на основі експертних знань щодо впливу різних факторів на рівень безпеки соціо-еколого-економічної системи. Кожне правило відображає певну комбінацію значень індикаторів системи та відповідну оцінку її стану. Приклад наведено у таблиці 2.

Застосування такої бази правил дозволяє формалізувати експертні знання та врахувати невизначеність інформації під час оцінювання стану соціо-еколого-економічної системи.

Після формування бази нечітких правил наступним етапом є виконання процедури нечіткого висновку, яка дозволяє на основі значень вхідних індикаторів визначити інтегральну оцінку рівня безпеки соціо-еколого-економічної системи.

Нечіткий висновок реалізується шляхом визначення ступеня активізації кожного правила з бази знань. Для цього використовуються значення функцій належності відповідних лінгвістичних змінних. Ступінь активізації  $l$ -го правила визначається як  $\alpha_l = \min(\mu_1(x_1), \mu_2(x_2), \dots, \mu_n(x_n))$ , де  $\mu_i(x_i)$  — значення функції належності  $i$ -го індикатора до відповідної нечіткої множини.

Отримані значення  $\alpha_l$  характеризують ступінь виконання кожного нечіткого правила. На основі цих значень формується агрегована нечітка оцінка вихідної змінної, що відповідає рівню безпеки системи.

Агрегування результатів усіх правил здійснюється за допомогою оператора максимуму  $\mu_S = \max_l(\alpha_l)$ , де  $\mu_S$  — функція належності інтегральної оцінки безпеки системи.

Після фазифікації значень індикаторів виконується активізація правил із бази знань. Наприклад, для правила **IF** (економічна стабільність — висока) **AND** (соціальний розвиток — середній) **AND** (екологічна безпека — середня) **AND** (інституційна ефективність — висока) **THEN** (рівень безпеки — високий).

Ступінь активізації правила визначається як  $\alpha = \min(0.7, 0.6, 0.5, 0.6)$ .

Після визначення ступеня активізації всіх правил здійснюється агрегування результатів наступним чином:  $\mu_S = \max(0.5, 0.4, 0.6) = 0.6$ .

Для отримання числового значення інтегрального показника безпеки виконується процедура дефазифікації. У запропонованій моделі використовується метод центру ваги, отримано  $S = 0.67$ . Отримане значення відповідає середньому рівню безпеки соціо-еколого-економічної системи з тенденцією до підвищення.

Для підвищення адаптивності та прогностичних можливостей запропонованої системи підтримки прийняття рішень до її структури включено модуль машинного навчання. Його основним завданням є виявлення закономірностей у динаміці зміни показників соціо-еколого-економічної системи та прогнозування їх майбутніх значень.

Соціо-еколого-економічні процеси мають складний і динамічний характер, що обумовлює необхідність використання інтелектуальних методів аналізу даних. Алгоритми машинного навчання дозволяють обробляти великі масиви статистичної інформації, виявляти приховані залежності між показниками системи та будувати прогностичні моделі її розвитку.

Метою застосування методів машинного навчання є побудова моделі прогнозування, яка дозволяє оцінити значення показників системи у наступний момент часу.

У межах запропонованої системи можуть використовуватись різні алгоритми машинного навчання, зокрема:

- Random Forest, який дозволяє будувати ансамблеві моделі для прогнозування складних нелінійних залежностей між показниками;

- Gradient Boosting, що забезпечує високу точність прогнозування за рахунок послідовного покращення моделі;
- штучні та рекурентні нейронні мережі, які ефективно використовуються для аналізу складних багатовимірних даних та моделювання часових рядів.

Отримані прогнозовані значення показників використовуються як вхідні дані для нечіткої системи оцінювання рівня безпеки соціо-еколого-економічної системи. Це дозволяє враховувати не лише поточний стан системи, але й прогнозовані зміни її параметрів.

Таким чином, поєднання нечіткого моделювання та методів машинного навчання забезпечує формування гібридної інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, яка поєднує інтерпретованість експертних правил із високою точністю аналізу та прогнозування даних.

**4. Висновки та перспективи подальших досліджень.** У роботі вирішено наукову задачу розроблення інтелектуальної гібридної системи підтримки безпекоорієнтованого управління соціо-еколого-економічними системами в умовах невизначеності інформації. Проведений аналіз показав обмеженість традиційних економіко-математичних підходів щодо врахування складних нелінійних взаємозв'язків і нечітких даних, що обґрунтовує доцільність застосування інтелектуальних методів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробленні моделі гібридної системи підтримки прийняття рішень, яка інтегрує механізм нечіткого висновку, багатокритеріальне оцінювання та модуль машинного навчання в єдину узгоджену структуру. Запропонований підхід забезпечує поєднання інтерпретованості експертних знань із високою точністю прогнозування.

У межах дослідження сформовано систему індикаторів, що комплексно відображає економічні, соціальні, екологічні та інституційні аспекти функціонування системи; розроблено математичну модель нечіткого оцінювання рівня безпеки на основі лінгвістичних змінних і бази правил; інтегровано методи машинного навчання для прогнозування динаміки показників; продемонстровано практичну реалізацію запропонованого підходу.

Отримані результати підтверджують, що запропонована гібридна модель забезпечує підвищення точності оцінювання, адаптивності та обґрунтованості управлінських рішень у порівнянні з традиційними підходами. Практичне значення полягає у можливості використання моделі в системах підтримки прийняття рішень для аналізу, прогнозування та управління станом соціо-еколого-економічних систем.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням системи індикаторів, удосконаленням бази нечітких правил, а також розвитком методів машинного навчання для підвищення точності прогнозування та адаптивності системи.

---

### Конфлікт інтересів

---

Шаркаді Маріанна Миколаївна, членкиня редакційної колегії, є авторкою цієї статті та не брала участі в редакційному розгляді й ухваленні рішення щодо рукопису. Опрацювання рукопису здійснювалося незалежним редактором.

---

## Фінансування

---

Дослідження здійснено в рамках кафедральної науково-дослідної роботи «Методи обчислювального інтелекту для обробки і аналізу даних» (номер державної реєстрації 0121U109279).

---

## Доступність даних

---

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису.

---

## Використання штучного інтелекту

---

Автор підтверджує, що при створенні даної роботи не використовувались технології штучного інтелекту.

---

Авторські права ©



(2026). Шаркаді М. М. Ця робота ліцензується відповідно до Creative Commons Attribution 4.0 International License.

---

## Список використаної літератури

1. Hudon, A., & et al. (2025). A hybrid fuzzy logic–Random Forest model to predict outcomes and identify important influencing factors. *Frontiers in Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1606250>
2. Khan, M., Kumar, R., & Dhiman, G. (2025). A hybrid machine learning fuzzy non-linear regression approach for neutrosophic fuzzy set. *ICCK Transactions on Machine Intelligence*. <https://doi.org/10.62762/TMI.2025.561363>
3. Zhang, Z. (2024). Application of fuzzy decision support systems in risk assessment. *Computational Economics*. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00556-y>
4. Lamrani Alaoui, Y., & et al. (2024). A hybrid fuzzy decision-making framework for technology selection. *Discover Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06229-x>
5. Yadav, N., & et al. (2025). Transfer learning with fuzzy decision support for multi-class lung disease classification. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-19114-3>
6. Akram, M., & et al. (2025). An explainable hybrid fuzzy–machine learning framework for decision support. *Knowledge-Based Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.111115>

**Sharkadi M. M.** Intelligent hybrid model for supporting security-oriented management of socio-ecological-economic systems under conditions of uncertainty.

This article examines the problem of decision support in socio-ecological-economic systems under conditions of information uncertainty. The aim of the study is to develop a model of an intelligent hybrid system for supporting security-oriented management that combines methods of fuzzy modeling and machine learning. A mathematical model is proposed that is based on the use of linguistic variables, membership functions, and a fuzzy rule base to assess the integral level of system security. To enhance the system's adaptability and predictive capabilities, a machine learning module has been integrated, enabling the prediction of indicator values based on historical data.

A system of indicators has been developed that covers the economic, social, environmental, and institutional aspects of the functioning of the socio-ecological-economic system. A

fuzzy inference procedure has been developed that includes the phasification of input data, rule activation, aggregation of results, and defuzzification to obtain a numerical value of the integral safety indicator. A demonstration example of the proposed model's application was conducted, confirming its ability to assess the current state of the system and predict its changes.

The results indicate that the use of a hybrid approach combining fuzzy logic and machine learning methods allows for improved assessment accuracy, adaptability, and interpretability of decision support systems in the context of security-oriented management of socio-ecological-economic systems.

**Keywords:** fuzzy logic, machine learning, hybrid system, decision support, socio-ecological-economic systems, safety-oriented management, uncertainty.

Отримано: 07.03.2026

Прийнято: 25.03.2026

Опубліковано: 30.04.2026