

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ

© 2026 КУЗЬМЕНКО О. О., ВІТКІН Л. М.

УДК 330.46:658
JEL: C45; C53; D81; M15

Кузьменко О. О., Віткін Л. М. Синтез технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки в моделі оцінювання ризиків для прийняття управлінських рішень

Сучасний розвиток цифрових технологій та зростання складності процесів управління зумовлюють необхідність удосконалення підходів до оцінювання ризиків у системах підтримки прийняття управлінських рішень. Незважаючи на значний розвиток моделей, що базуються на використанні технологій штучного інтелекту або нечіткої логіки, більшість наявних підходів орієнтована переважно на застосування лише одного з цих інструментів або не забезпечує їх комплексної інтеграції. Недостатньо дослідженими залишаються питання побудови адаптивних моделей оцінювання ризиків, які одночасно враховують результати інтелектуального аналізу історичних даних, експертні знання та специфіку функціонування випробувальних лабораторій. Саме усунення цієї наукової прогалини визначило напрям проведеного дослідження. Метою дослідження є розроблення та наукове обґрунтування інтегрованої моделі оцінювання ризиків для підтримки прийняття управлінських рішень у діяльності випробувальних лабораторій на основі синтезу технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки, а також демонстрація можливостей її практичного застосування шляхом сценарного моделювання. У процесі дослідження використано методи системного та порівняльного аналізу, концептуального й сценарного моделювання, положення теорії нечітких множин, сучасні підходи до застосування технологій штучного інтелекту, а також методи узагальнення та систематизації наукових джерел. Інформаційну основу дослідження становили сучасні наукові праці з проблематики ризик-менеджменту, технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки, міжнародні нормативні документи, а також узагальнені матеріали щодо функціонування випробувальних лабораторій. У результаті дослідження проаналізовано сучасні моделі синтезу технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки, визначено їхні переваги й обмеження, а також розроблено інтегровану модель оцінювання ризиків, що поєднує модулі інтелектуального аналізу даних, нечіткого логічного виведення, інтегрованого оцінювання ризиків і формування управлінських рекомендацій. Для підтвердження працездатності запропонованого підходу проведено сценарне моделювання типових управлінських ситуацій, наближених до умов діяльності випробувальної лабораторії, яке продемонструвало можливість комплексного використання історичних даних та експертних оцінок під час формування управлінських рішень. Встановлено, що синтез технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки підвищує адаптивність процесу оцінювання ризиків, покращує інтерпретованість результатів, зменшує вплив суб'єктивних експертних оцінок і сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень в умовах невизначеності. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні інтегрованої моделі оцінювання ризиків, яка, на відміну від існуючих підходів, забезпечує комплексне поєднання механізмів інтелектуального аналізу історичних даних із нечітким логічним виведенням для формалізації експертних знань і формування інтерпретованих рекомендацій щодо управління ризиками. Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі в діяльності випробувальних лабораторій, органів оцінки відповідності та інших організацій для підтримки прийняття управлінських рішень, удосконалення процедур оцінювання ризиків, планування коригувальних і запобіжних заходів і підвищення ефективності функціонування систем менеджменту якості.

Ключові слова: штучний інтелект; нечітка логіка; оцінювання ризиків; підтримка прийняття управлінських рішень; випробувальна лабораторія; сценарне моделювання; ризик-менеджмент; системи менеджменту якості.

Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 15.

Кузьменко Олександр Олександрович – аспірант кафедри управлінських технологій, Університет економіки та права «КРОК» (вул. Табірна, 30-32, Київ, 03113, Україна)

E-mail: aleksandr.kuzmenko.1273@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4451-6753>

Віткін Леонід Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри управлінських технологій, Університет економіки та права «КРОК» (вул. Табірна, 30-32, Київ, 03113, Україна)

E-mail: lmvitkin@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-1333>

UDC 330.46:658
JEL: C45; C53; D81; M15

Kuzmenko O. O., Vitkin L. M. Synthesis of Artificial Intelligence and Fuzzy Logic Technologies in a Risk Assessment Model For Managerial Decision-Making

The rapid development of digital technologies and the increasing complexity of management processes necessitate the improvement of risk assessment approaches in decision support systems. Although numerous studies have explored the application of artificial intelligence and fuzzy logic in risk management, most existing approaches rely on either one of these technologies or provide only limited integration between them. Consequently, insufficient attention has been paid to the development of adaptive risk assessment models capable of simultaneously processing historical data, incorporating expert knowledge, and accounting for the specific characteristics of testing laboratories. Addressing this research gap constitutes the primary focus of the present study. The aim of

the study is to develop and scientifically substantiate an integrated risk assessment model for managerial decision support in testing laboratories based on the synthesis of artificial intelligence and fuzzy logic technologies, as well as to demonstrate its practical applicability through scenario-based modeling. The research employs methods of system analysis, comparative analysis, conceptual modeling, and scenario-based modeling, together with the principles of fuzzy set theory and contemporary approaches to artificial intelligence, as well as methods for summarizing and organizing scientific sources. The information base includes recent scientific publications on artificial intelligence, fuzzy logic, and risk management, relevant international standards, and generalized data characterizing the operation of testing laboratories. The study results include a comprehensive analysis of existing hybrid artificial intelligence–fuzzy logic models for risk assessment, identification of their strengths and limitations, and the development of an integrated model consisting of data analysis, fuzzy inference, integrated risk assessment, and managerial recommendation modules. To verify the feasibility of the proposed approach, scenario-based modeling of a typical managerial situation related to the operation of critical testing equipment was conducted. The obtained results demonstrate the possibility of combining historical operational data with expert evaluations to improve the quality and consistency of managerial decisions. The findings indicate that the synthesis of artificial intelligence and fuzzy logic technologies enhances the adaptability of the risk assessment process, improves the interpretability of assessment results, reduces the influence of subjective expert judgments, and increases the reliability of managerial decision-making under uncertainty. The scientific novelty of the research lies in the development of an integrated risk assessment model that, unlike existing approaches, combines intelligent analysis of historical data with fuzzy inference mechanisms for expert knowledge formalization and generation of interpretable managerial recommendations within a unified decision support framework. The practical significance of the proposed model consists in its potential application in testing laboratories, conformity assessment bodies, and other organizations requiring risk-oriented managerial decision-making. The model can be used to improve risk assessment procedures, support preventive and corrective actions, optimize quality management systems, and enhance the efficiency of operational risk management.

Keywords: artificial intelligence; fuzzy logic; risk assessment; managerial decision support; testing laboratory; scenario-based modeling; risk management; quality management systems.

Fig.: 2. **Tabl.:** 1. **Bibl.:** 15.

Kuzmenko Oleksandr O. – Postgraduate Student of the Department of Management of Technology, University of Economics and Law «KROK» (30-32 Tabirna Str., Kyiv, 03113, Ukraine)

E-mail: aleksandr.kuzmenko.1273@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4451-6753>

Vitkin Leonid M. – D. Sc. (Engineering), Professor of the Department of Management of Technology, University of Economics and Law «KROK» (30-32 Tabirna Str., Kyiv, 03113, Ukraine)

E-mail: lmvitkin@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-1333>

ВСТУП

В умовах цифрової трансформації економіки та зростання складності управлінських процесів суттєво підвищуються вимоги до якості прийняття управлінських рішень, особливо в системах, діяльність яких характеризується високим рівнем невизначеності, багатокритеріальністю та значною відповідальністю за результати. До таких систем належать випробувальні лабораторії, де управлінські рішення пов'язані з оцінюванням технічних, організаційних, метрологічних та операційних ризиків, від правильності яких залежать достовірність результатів випробувань, відповідність вимогам міжнародних стандартів та ефективність функціонування системи менеджменту якості.

Традиційні методи оцінювання ризиків, що ґрунтуються на детермінованих або класичних імовірнісних моделях, не завжди забезпечують достатню точність в умовах неповноти інформації, нечіткості експертних суджень та швидкої зміни факторів ризику. Значна частина характеристик, що визначають рівень ризику, має якісний характер і описується лінгвістичними оцінками, які складно формалізувати засобами класичного математичного апарату. Одночасно сучасні технології штучного інтелекту здатні ефективно аналізувати великі масиви даних та виявляти приховані

закономірності, однак їх використання нерідко супроводжується недостатньою інтерпретованістю отриманих результатів.

За цих умов актуальним напрямом розвитку систем підтримки прийняття управлінських рішень є інтеграція технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки. Таке поєднання дозволяє одночасно використовувати переваги експертних знань, накопиченого практичного досвіду та інтелектуального аналізу даних, забезпечуючи адаптивне оцінювання ризиків і підвищуючи обґрунтованість управлінських рішень. Незважаючи на активний розвиток досліджень у сфері штучного інтелекту та нечітких систем, питання побудови комплексних моделей оцінювання ризиків, адаптованих до специфіки діяльності випробувальних лабораторій, залишаються недостатньо опрацьованими, що зумовлює актуальність проведеного дослідження.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ Й АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблематика оцінювання ризиків в умовах невизначеності активно досліджується як українськими, так і зарубіжними науковцями. Сучасні наукові підходи спрямовані на інтеграцію методів нечіткої логіки, багатокритеріального аналізу, систем підтримки прийняття рішень і технологій штучного інтелекту, що розширює можливості оціню-

вання ризиків та підтримки управлінських рішень у складних системах [1–15].

Українські науковці приділяють основну увагу практичним аспектам оцінювання ризиків у діяльності підприємств і випробувальних лабораторій. Зокрема, досліджено можливості використання теорії нечітких множин для оцінювання кадрових ризиків, застосування методу «Краватка-метелик» (BowTie) у практиці управління ризиками, а також розроблено математичні моделі визначення ризику діяльності випробувальних лабораторій на основі нечіткої логіки. Окремі праці присвячені використанню нечітких моделей для аналізу ризиків автоматизованих систем, що підтверджує доцільність їх застосування під час оцінювання складних технічних об'єктів [1–4].

У зарубіжних дослідженнях значного розвитку набули підходи, що поєднують нечітку логіку з методами багатокритеріального прийняття рішень. Запропоновано ризик-орієнтовані системи підтримки прийняття рішень, які інтегрують методи компромісного ранжування альтернатив, структурованого аналізу вимог до якості, аналізу ієрархій та нечіткого логічного висновку, що дають змогу комплексно враховувати експертні знання й невизначеність під час оцінювання ризиків [5; 9; 11]. Теоретичну основу сучасних моделей становлять дослідження, присвячені нечітким множинам, теорії можливостей, методам ранжування нечітких чисел та агрегуванню експертних оцінок [8; 10; 14].

Важливим напрямом сучасних досліджень є використання технологій штучного інтелекту, штучних нейронних мереж та нечітких інтелектуальних систем. У наукових працях розглядаються можливості застосування алгоритмів штучного інтелекту для побудови систем інформаційної безпеки [7], автономних нечітких систем підтримки прийняття рішень для оцінювання ризиків на основі великих масивів даних [15], а також підходи до проектування систем нечіткої логіки другого типу [12]. Окремий напрям становить застосування нечіткої логіки у методі аналізу видів і наслідків потенційних відмов (FMEA) для оцінювання ризиків випробувальних і калібрувальних лабораторій [13]. Нормативно-методичну основу для оцінювання ризиків автоматизованих виробничих систем формує міжнародний стандарт ANSI/ISA-62443-3-2, який визначає вимоги до аналізу ризиків і проектування безпечних промислових систем автоматизації [6].

Метою дослідження є розроблення та наукове обґрунтування інтегрованої моделі оцінювання ризиків для підтримки прийняття управлінських

рішень у діяльності випробувальних лабораторій на основі синтезу технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки, а також демонстрація можливостей її практичного застосування шляхом сценарного моделювання.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких дослідницьких завдань: проаналізувати сучасні підходи до оцінювання ризиків; визначити обмеження наявних моделей; обґрунтувати механізм взаємодії модулів штучного інтелекту та нечіткої логіки; продемонструвати можливості практичного застосування запропонованої моделі на прикладах типових управлінських ситуацій у діяльності випробувальної лабораторії.

Методологічною основою дослідження стали системний підхід, концепції ризик-менеджменту, теорія нечітких множин і сучасні методи штучного інтелекту. У процесі дослідження використано метод системного аналізу для дослідження структури процесу оцінювання ризиків; метод концептуального моделювання; сценарне моделювання; метод порівняльного аналізу – для зіставлення запропонованого підходу з наявними моделями оцінювання ризиків.

Інформаційну основу дослідження становили сучасні наукові публікації з проблематики оцінювання ризиків, застосування нечіткої логіки та технологій штучного інтелекту, міжнародні нормативні документи у сфері ризик-менеджменту, а також узагальнені матеріали щодо організації діяльності випробувальних лабораторій. Практичну апробацію запропонованого підходу здійснено шляхом моделювання типових управлінських ситуацій, сформованих на основі процесів, характерних для діяльності випробувальної лабораторії ДП «Укрметртестстандарт», що дало змогу продемонструвати можливості використання моделі для підтримки управлінських рішень в умовах невизначеності.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень дозволив встановити, що розвиток моделей оцінювання ризиків відбувається у напрямі інтеграції технологій штучного інтелекту з методами нечіткої логіки. Такий підхід забезпечує поєднання автоматизованого аналізу великих масивів даних із можливістю врахування експертних знань та роботи в умовах невизначеності, що особливо важливо для функціонування випробувальних лабораторій [5; 7; 9]. Як зазначають Mousavi S. A., Seiti H., Hafezalkotob A., Asian S., Mobarra R, використання нечітких систем підтримки прийняття рішень дає

змогу враховувати суперечливість критеріїв та підвищує обґрунтованість управлінських рішень [5]. Водночас D. Dubois і H. Prade підкреслюють, що застосування нечітких множин є ефективним способом формалізації невизначених знань та експертних суджень [10].

Водночас аналіз літературних джерел показав, що більшість існуючих моделей орієнтована або на використання алгоритмів штучного інтелекту, або на застосування нечіткої логіки, тоді як комплексне поєднання цих підходів реалізовано недостатньо повно [5; 9; 12]. Крім того, у відомих рішеннях недостатньо враховано специфіку діяльності випробувальних лабораторій, яка потребує одночасного аналізу історичних даних, експертних оцінок, результатів внутрішніх аудитів, метрологічної інформації та показників системи менеджменту якості [3].

Водночас фундаментальні праці D. Dubois та H. Prade створюють теоретичне підґрунтя для формалізації невизначеності за допомогою нечітких множин, тоді як дослідження S.-M. Chen і K. Sanguansat пропонують математичний апарат для ранжування нечітких ризиків [8; 10]. Особливе значення для представленого дослідження мають роботи О. О. Кузьменка та Л. М. Віткіна, а також О. М. Testik і Е. Т. Unlu, у яких безпосередньо роз-

глянуто застосування нечіткої логіки до оцінювання ризиків діяльності випробувальних і калібрувальних лабораторій, що підтверджує доцільність використання саме такого підходу під час розроблення запропонованої моделі [3; 13]. Крім того, результати досліджень у сфері штучного інтелекту та нечіткої логіки другого типу свідчать про доцільність поєднання адаптивних алгоритмів аналізу даних із механізмами інтерпретованого логічного висновку, що дає змогу підвищити точність оцінювання ризиків та обґрунтованість управлінських рішень [12].

Для визначення сучасних тенденцій розвитку моделей оцінювання ризиків та обґрунтування напрямів удосконалення наявних підходів проведено порівняльний аналіз наукових праць, присвячених використанню нечіткої логіки, технологій штучного інтелекту та гібридних систем підтримки прийняття рішень. Особливу увагу приділено можливостям застосування зазначених підходів у процесі оцінювання ризиків діяльності випробувальних лабораторій, а також їхнім перевагам і обмеженням щодо забезпечення обґрунтованості управлінських рішень. Результати проведеного аналізу узагальнено в табл. 1.

Після аналізу, наведеного в табл. 1, можна зробити висновок, що жоден із розглянутих підходів окремо не забезпечує комплексного вирішення

Таблиця 1

Порівняльна характеристика сучасних підходів до оцінювання ризиків із використанням технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки

Науковий підхід	Основні характеристики	Переваги	Обмеження
Нечітка логіка для оцінювання ризиків [1; 3; 4; 8; 10]	Використання лінгвістичних змінних, нечітких множин і бази правил для формалізації експертних знань та оцінювання ризиків	Можливість роботи в умовах невизначеності, висока інтерпретованість результатів, врахування експертних оцінок	Залежність від якості експертної інформації та сформованої бази правил, обмежені можливості самонавчання
Технології штучного інтелекту та машинного навчання [7; 12]	Аналіз великих обсягів даних, виявлення прихованих закономірностей, прогнозування ризикових ситуацій	Висока швидкість оброблення інформації, адаптивність моделей, можливість автоматичного навчання	Значна потреба у якісних даних, недостатня пояснюваність отриманих результатів
Гібридні системи підтримки прийняття рішень [5; 9; 11]	Поєднання методів нечіткої логіки, багатокритеріального аналізу та інтелектуальних алгоритмів	Комплексне врахування кількісних і якісних показників, підвищення обґрунтованості управлінських рішень	Висока складність побудови моделей, необхідність адаптації до особливостей предметної області
Методичні та нормативні підходи до управління ризиками [2; 6]	Використання стандартизованих процедур і методів аналізу ризиків відповідно до міжнародних вимог	Системність процесу оцінювання ризиків, уніфікація процедур, підвищення керованості процесів	Не забезпечує автоматизованого аналізу даних і прогнозування ризиків без інтеграції сучасних цифрових технологій

Джерело: складено авторами на основі [1–15].

завдання оцінювання ризиків діяльності випробувальних лабораторій. Методи нечіткої логіки ефективно працюють із невизначеністю та експертними знаннями, однак характеризуються обмеженими адаптивними можливостями. Алгоритми штучного інтелекту забезпечують високу точність аналізу й прогнозування, проте їхні результати не завжди є достатньо інтерпретованими для прийняття управлінських рішень. Гібридні системи частко-

во усувають зазначені недоліки, однак переважно орієнтовані на окремі прикладні сфери й не враховують специфіку функціонування випробувальних лабораторій.

Це зумовило необхідність розроблення інтегрованої моделі оцінювання ризиків, що поєднає переваги технологій штучного інтелекту, нечіткої логіки та експертного оцінювання. Архітектуру запропонованої моделі наведено на рис. 1.

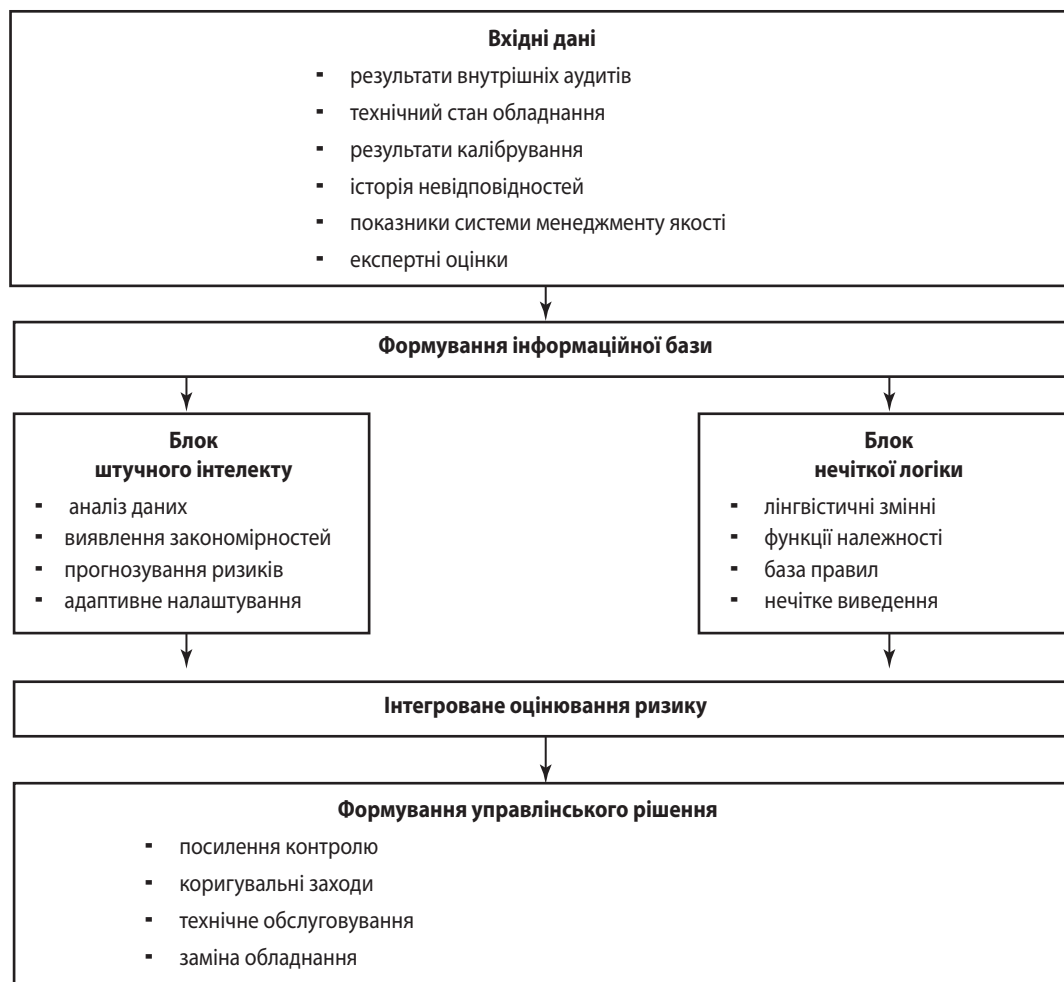


Рис. 1. Архітектура моделі оцінювання ризиків на основі синтезу технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки

Джерело: розроблено авторами.

На відміну від наявних моделей, запропонована архітектура забезпечує інтеграцію двох взаємодоповнювальних механізмів оцінювання ризиків. Технології штучного інтелекту виконують функції інтелектуального аналізу даних, прогнозування та адаптивного налаштування параметрів системи, тоді як нечітка логіка забезпечує формалізацію експертних знань, оброблення невизначеної інформації та інтерпретацію результатів оцінювання.

Такий підхід дозволяє не лише підвищити достовірність оцінювання ризиків, а й забезпе-

чити прозорість процесу формування управлінських рішень, що має принципове значення для діяльності випробувальних лабораторій.

Початковим етапом функціонування моделі є формування інформаційної бази, яка об'єднує результати внутрішніх аудитів, дані метрологічного забезпечення, інформацію про технічний стан обладнання, результати калібрування, показники функціонування системи менеджменту якості, відомості про персонал, а також історію виникнення невідповідностей. Такий підхід дозволяє врахувати сукупність факторів, що впливають на рівень ризи-

ку, та забезпечує інформаційну основу для подальшого аналізу.

Наступний блок реалізує технології штучного інтелекту, призначені для аналізу накопичених даних, виявлення прихованих взаємозв'язків між окремими факторами ризику та прогнозування можливих ризикових ситуацій. Використання алгоритмів інтелектуального аналізу даних забезпечує адаптивне коригування параметрів моделі відповідно до накопичення нової інформації, що підвищує її стійкість до зміни умов функціонування випробувальної лабораторії.

Важливою складовою моделі є блок нечіткого логічного виведення, який забезпечує формалізацію експертних знань щодо оцінювання ризиків. Для цього кількісні та якісні характеристики ризику трансформуються у лінгвістичні змінні, а взаємозв'язки між ними описуються системою продукційних правил типу «ЯКЩО – ТО». Такий підхід дозволяє врахувати фактори, які не можуть бути достатньо точно описані класичними математичними методами, зокрема рівень критичності невідповідностей, професійний досвід персоналу або складність виконання випробувань.

Результати інтелектуального аналізу даних та нечіткого логічного виведення інтегруються в єдиний показник ризику, який використовується як інформаційна основа для підтримки прийняття управлінських рішень. Залежно від отриманого рівня ризику система формує рекомендації щодо необхідності реалізації коригувальних або запобіжних заходів, посилення контролю окремих процесів, проведення додаткових перевірок або технічного обслуговування обладнання.

Запропонована модель принципово відрізняється від існуючих підходів до оцінювання ризиків насамперед комплексною інтеграцією технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки в межах єдиної системи підтримки прийняття управлінських рішень. У запропонованій моделі результати інтелектуального аналізу даних не замінюють експертне оцінювання, а інтегруються з ним, що забезпечує більш повне врахування специфіки функціонування випробувальної лабораторії та підвищує обґрунтованість прийнятих управлінських рішень.

Важливим теоретичним підґрунтям запропонованого підходу є положення теорії нечітких множин та теорії можливостей, розвинуті у працях D. Dubois та H. Prade [10]. На відміну від загальнотеоретичних підходів до формалізації невизначеності, запропонована модель орієнтована на практичне застосування у діяльності випробувальних лабо-

раторій. Це досягається за рахунок використання модульної архітектури, що дає змогу адаптувати окремі функціональні компоненти моделі до змін інформаційного середовища без зміни її загальної структури.

Істотною особливістю запропонованої моделі є реалізація механізму адаптивного оновлення параметрів оцінювання ризиків. У запропонованій моделі зазначені параметри можуть уточнюватися на основі результатів аналізу накопичених даних, що створює передумови для реагування на зміни умов функціонування випробувальної лабораторії.

Ще однією особливістю запропонованої моделі є орієнтація на забезпечення пояснюваності процесу прийняття управлінських рішень. На відміну від моделей, у яких результати роботи алгоритмів штучного інтелекту мають характер «чорної скриньки», використання механізмів нечіткого логічного виведення дозволяє простежити логіку формування інтегральної оцінки ризику та обґрунтувати рекомендації щодо вибору управлінських дій. Це має особливе значення для діяльності випробувальних лабораторій, де кожне управлінське рішення має бути документально підтверджено, відтворено та відповідати вимогам системи менеджменту якості.

Таким чином, на відміну від відомих моделей синтезу технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки, запропонований підхід забезпечує комплексне поєднання адаптивного аналізу історичних даних, формалізації експертних знань, інтегрованого оцінювання ризиків і формування інтерпретованих управлінських рекомендацій. Саме така інтеграція створює передумови для підвищення ефективності систем підтримки прийняття рішень у діяльності випробувальних лабораторій.

Для підтвердження можливості практичного застосування запропонованої моделі її апробацію проведено шляхом сценарного моделювання типових управлінських ситуацій, характерних для діяльності випробувальної лабораторії. Використання сценарного моделювання дозволило оцінити функціонування окремих модулів системи та простежити логіку формування управлінських рішень без втручання у реальні виробничі процеси. Сформовані сценарії базувалися на узагальнених процесах оцінювання ризиків, характерних для функціонування сучасних випробувальних лабораторій (рис. 2).

Як показано на рис. 2, сценарне моделювання розпочинається з формування інформаційної бази щодо технічного стану обладнання. Надалі модуль

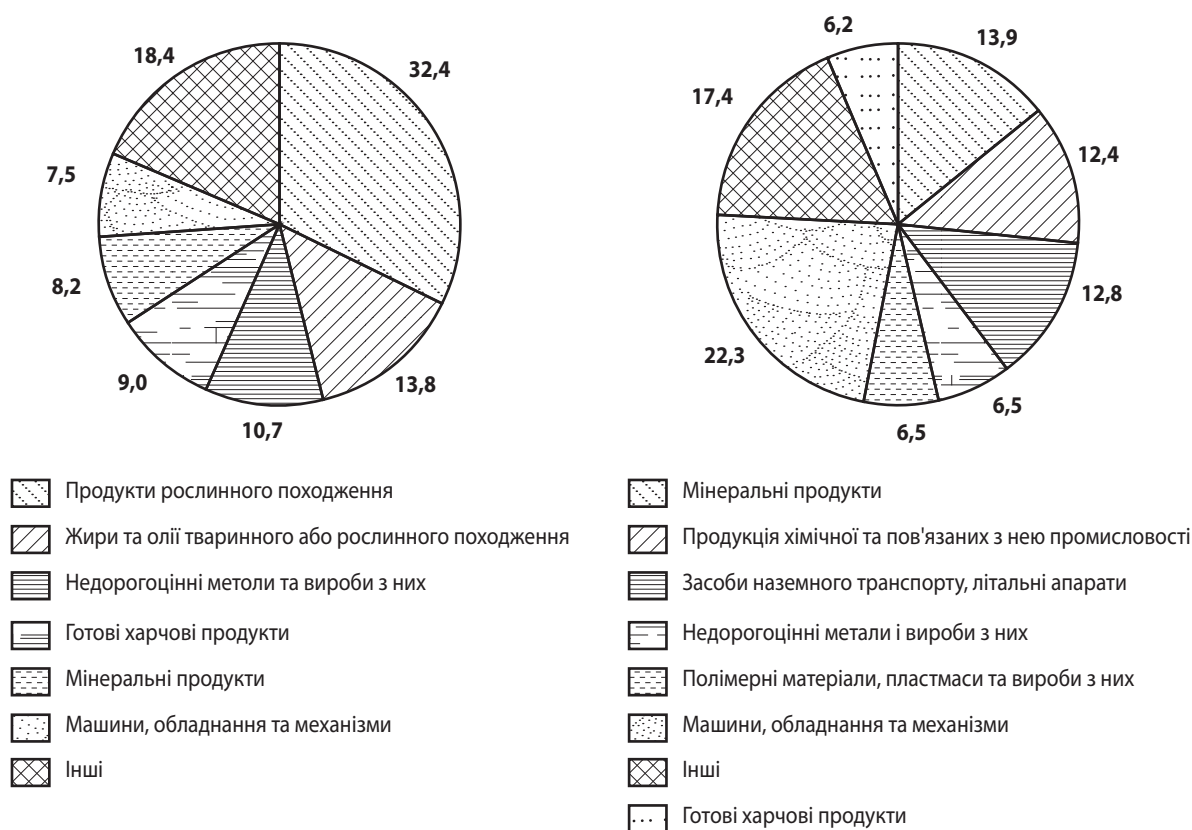


Рис. 2. Сценарне моделювання роботи запропонованої моделі оцінювання ризиків у випробувальній лабораторії

Джерело: розроблено авторами.

штучного інтелекту здійснює аналіз накопичених даних, визначає закономірності виникнення відмов та формує прогноз розвитку ризикової ситуації. Паралельно блок нечіткого логічного виведення виконує формалізацію експертних оцінок технічного стану обладнання шляхом використання лінгвістичних змінних і системи продукційних правил. Результати роботи обох модулів інтегруються в єдиний показник ризику, який використовується для формування рекомендацій щодо подальшої експлуатації обладнання.

На першому етапі моделювання модуль штучного інтелекту здійснював аналіз накопичених даних щодо експлуатації аналогічного обладнання, включаючи інформацію про періодичність відмов, результати калібрування, виконані ремонти та попередні випадки виникнення невідповідностей. На основі виявлених закономірностей формувалася прогноз імовірності виникнення ризикової ситуації за подальшої експлуатації обладнання. Одночасно блок нечіткого логічного виведення виконував формалізацію експертних оцінок технічного стану обладнання та визначав інтегральний рівень операційного ризику шляхом застосування системи продукційних правил.

Отримані результати обох модулів інтегрували в єдиний показник ризику, який використовували для формування управлінської рекомендації. За результатами моделювання система рекомендувала реалізацію превентивних заходів, спрямованих на мінімізацію можливих ризиків, зокрема, посилення технічного контролю, проведення позапланового технічного обслуговування або заміну обладнання залежно від інтегрального рівня ризику. Такий підхід забезпечує поєднання результатів інтелектуального аналізу даних із експертними знаннями, що підвищує обґрунтованість прийняття управлінських рішень та зменшує вплив суб'єктивного фактору.

Проведене сценарне моделювання підтвердило працездатність запропонованої моделі та продемонструвало її можливість використання як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень у діяльності випробувальних лабораторій.

На відміну від наявних підходів, модель забезпечує комплексне використання історичних даних, експертних оцінок та механізмів нечіткого логічного виведення, що дозволяє більш повно враховувати невизначеність ризикового середовища та підвищувати достовірність оцінювання ризиків.

ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати підтверджують сучасну тенденцію до інтеграції методів нечіткої логіки та технологій штучного інтелекту в системах оцінювання ризиків. На відміну від традиційних підходів, що ґрунтуються переважно на експертних оцінках або статистичному аналізі, сучасні моделі забезпечують комплексне врахування кількісних і якісних показників та підвищують обґрунтованість управлінських рішень [1; 5; 9]. Подібного висновку дійшли Mousavi S. A., Seiti H., Hafezalkotob A., Asian S., Mobarra R., які зазначають, що інтеграція нечітких моделей із системами підтримки прийняття рішень сприяє більш ефективному ранжуванню альтернатив в умовах невизначеності [5].

Результати дослідження узгоджуються з положеннями теорії нечітких множин, сформульованими D. Dubois та H. Prade, відповідно до яких використання нечітких множин і теорії можливостей дозволяє формалізувати експертні знання та зменшити вплив невизначеності під час оцінювання ризиків [10]. Запропонована у статті модель розвиває зазначений підхід шляхом поєднання механізму нечіткого логічного висновку з алгоритмами штучного інтелекту, що забезпечує не лише інтерпретованість результатів, а й адаптацію моделі до змін інформаційного середовища.

Водночас результати проведеного дослідження доповнюють сучасні роботи, присвячені використанню багатокритеріальних методів оцінювання ризиків [9; 11]. Якщо наявні моделі переважно орієнтовані на підтримку прийняття рішень у виробничій, екологічній або інженерній сферах, то запропонований підхід адаптований до особливостей функціонування випробувальних лабораторій. При цьому враховуються результати внутрішніх аудитів, метрологічного забезпечення, контролю обладнання, експертних оцінок і вимог системи менеджменту якості, що розширює сферу практичного застосування моделі.

Оригінальність авторського підходу полягає у розробленні комплексної архітектури системи підтримки прийняття управлінських рішень, яка інтегрує можливості штучного інтелекту щодо аналізу історичних даних із механізмами нечіткого логічного виведення для формалізації експертних знань. На відміну від існуючих моделей, запропонований підхід орієнтований на практичне застосування у випробувальних лабораторіях та забезпечує формування інтерпретованих рекомендацій щодо управління ризиками в умовах неповної інформації.

Водночас дослідження має певні обмеження. Представлена модель апробована шляхом сценарного моделювання типових управлінських ситуацій, що дозволило оцінити її функціональні можливості, однак не дає підстав для кількісної оцінки ефективності в реальних умовах функціонування випробувальної лабораторії. Крім того, у дослідженні не розглядалися питання оптимізації алгоритмів машинного навчання та порівняння ефективності різних моделей штучного інтелекту, які можуть бути предметом подальших досліджень.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження розроблено модель оцінювання ризиків для підтримки прийняття управлінських рішень, яка ґрунтується на синтезі технологій штучного інтелекту та нечіткої логіки. На основі аналізу сучасних наукових підходів встановлено, що існуючі моделі, незважаючи на їхню високу ефективність у розв'язанні окремих завдань, не забезпечують комплексної інтеграції механізмів інтелектуального аналізу даних, формалізації експертних знань та адаптивного налаштування параметрів оцінювання ризиків.

Запропонована модель забезпечує послідовне поєднання аналізу історичних даних засобами штучного інтелекту з використанням нечіткого логічного виведення для оброблення експертних оцінок і формування інтегральної оцінки ризику. Проведене сценарне моделювання підтвердило можливість практичного застосування моделі під час вирішення типових управлінських завдань, пов'язаних з оцінюванням технічного стану обладнання та вибором заходів щодо мінімізації операційних ризиків.

Одержані результати розширюють сучасні підходи до побудови систем підтримки прийняття управлінських рішень шляхом розроблення інтегрованої моделі оцінювання ризиків, яка поєднує можливості технологій штучного інтелекту для аналізу історичних даних із механізмами нечіткого логічного виведення для формалізації експертних знань. На відміну від існуючих моделей, запропонований підхід забезпечує комплексне використання кількісної та якісної інформації, адаптивне оновлення параметрів оцінювання ризиків і формування інтерпретованих управлінських рекомендацій для діяльності випробувальних лабораторій.

Практичними рекомендаціями є доцільність поетапного впровадження запропонованої моделі в інформаційні системи випробувальних лабораторій, використання її як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень

під час внутрішніх аудитів, оцінювання технічного стану обладнання та планування коригувальних і запобіжних заходів. Для керівників лабораторій це створює можливість підвищити об'єктивність оцінювання ризиків і забезпечити більш ефективний розподіл ресурсів.

Перспективним напрямом подальших досліджень є проведення повномасштабної апробації запропонованої моделі в умовах функціонування реальних випробувальних лабораторій, розширення переліку факторів ризику, інтеграція сучасних алгоритмів машинного навчання та розроблення програмного забезпечення для автоматизації процесів оцінювання ризиків і підтримки прийняття управлінських рішень. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Гармідер Л. Д., Коротка Л. І., Бажан С. А., Аниськевич Д. В. The application of fuzzy sets theory in the methodological approach to assessing personnel risks of an enterprise. *Academy Review*. 2024. № 1 (60). С. 192–205.
DOI: <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2024-1-60-14>
2. Нечаєва І., Дончик Д. Використання технології «Краватка-метелик» (BowTie) в практиці оцінки ризиків. *Економіка та суспільство*. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-51>
3. Кузьменко О. О., Віткін Л. М. Розроблення математичної моделі на основі нечіткої логіки для визначення ризику в діяльності випробувальної лабораторії. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2024. № 1 (73). С. 188–194.
DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2024-73-188-194>
4. Хавіна І. П., Гнусов Ю. В., Можаяв О. О. Застосування нечіткої логіки для оцінки ризиків автоматизованих систем. *Застосування інформаційних технологій у правоохоронній діяльності: матеріали Круглого столу* (Харків, 14 груд. 2023 р.). Харків : ХНУВС, 2023. С. 71–73. URL: <https://dspace.univd.edu.ua/handle/123456789/19414>
5. Mousavi S. A., Seiti H., Hafezalkotob A., Asian S., Mobarra R. Application of risk-based fuzzy decision support systems in new product development: an R-VIKOR approach. *Applied Soft Computing*. 2021. Vol. 109. Article 107456.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107456>
6. ANSI/ISA-62443-3-2-2020. Security for industrial automation and control systems – Part 3-2: security risk assessment for system design. URL: <https://www.isa.org/products/ansi-isa-62443-3-2-2020-security-for-industrial-a>
7. Bian L. Design of computer network security defense system based on artificial intelligence and neural network. *Wireless Personal Communications*. 2023.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10721-9>

8. Chen S.-M., Sanguansat K. Analyzing fuzzy risk based on a new fuzzy ranking method between generalized fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38(3). P. 2163–2171.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.002>
9. Cinar U., Cebi S., Kahraman C. A hybrid risk assessment method for mining sector based on QFD, fuzzy inference system, and AHP. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2020. Vol. 39(5). P. 6047–6058.
DOI: <https://doi.org/10.3233/JIFS-189078>
10. Dubois D., Prade H. The treatment of uncertainty in knowledge-based systems using fuzzy sets and possibility theory. *International Journal of Intelligent Systems*. 1988. Vol. 3 (2). P. 141–165.
DOI: <https://doi.org/10.1002/int.4550030204>
11. Pamučar D., Behzad M., Božanić D., Behzad M. Designing a fuzzy decision support framework for assessing solid waste management in the South European region. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29 (28). P. 42862–42882.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18891-y>
12. Sakalli A., Kumbasar T., Mendel J. M. Towards systematic design of general type-2 fuzzy logic controllers: analysis, interpretation, and tuning. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021. Vol. 29. No. 2. P. 226–239.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.3016034>
13. Testik O. M., Unlu E. T. Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories. *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. Vol. 39 (2). P. 575–589.
DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3198>
14. Petry F. E., Yager R. R. Interval-valued fuzzy sets aggregation and evaluation approaches. *Applied Soft Computing*. 2022. Vol. 124. Article 108887.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108887>
15. Siami M., Naderpour M., Ramezani F., Lu J. Risk assessment through big data: an autonomous fuzzy decision support system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2024. Vol. 25. No. 8. P. 9016–9027.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3392959>

REFERENCES

- Bian L. (2023). Design of computer network security defense system based on artificial intelligence and neural network. *Wireless Personal Communications*. <https://doi.org/10.1007/s11277-023-10721-9>
- Chen S.-M. & Sanguansat K. (2011). Analyzing fuzzy risk based on a new fuzzy ranking method between generalized fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2163–2171. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.002>
- Cinar U., Cebi S. & Kahraman C. (2020). A hybrid risk assessment method for mining sector based on QFD,

- fuzzy inference system, and AHP. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 5(39), 6047–6058. <https://doi.org/10.3233/JIFS-189078>
- Dubois D. & Prade H. (1988). The treatment of uncertainty in knowledge-based systems using fuzzy sets and possibility theory. *International Journal of Intelligent Systems*, 2(3), 141–165. <https://doi.org/10.1002/int.4550030204>
- Harmider L. D., Korotka L. I., Bazhan S. A. & Aniskevych D. V. (2024). The application of fuzzy sets theory in the methodological approach to assessing personnel risks of an enterprise. *Academy Review*, 1 (60), 192–205. <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2024-1-60-14>
- isa.org. (2020). ANSI/ISA-62443-3-2-2020. Security for industrial automation and control systems – Part 3-2: security risk assessment for system design. <https://www.isa.org/products/ansi-isa-62443-3-2-2020-security-for-industrial-a>
- Khavina I. P., Hnusov Yu. V. & Mozhaiev O. O. (2023). Zastosuvannya nechitkoi lohiky dlia otsinky ryzykiv avtomatyzovanykh system [Application of fuzzy logic for risk assessment of automated systems]. *Zastosuvannya informatsiynykh tekhnolohii u pravookhoronni diialnosti: materialy Kruhloho stolu (Kharkiv, 14 hrud. 2023 r.)* [Application of Information Technologies in Law Enforcement Activity: Proceedings of the Round Table (Kharkiv, Dec. 14, 2023)] (pp. 71–73). Kharkiv: KhNUVS. <https://dspace.univd.edu.ua/handle/123456789/19414>
- Kuzmenko O. O. & Vitkin L. M. (2024). Rozroblennia matematychnoi modeli na osnovi nechitkoi lohiky dlia vyznachennia ryzyku v diialnosti vyprobuvalnoi laboratorii [Development of a mathematical model based on fuzzy logic to determine risk in the activity of a testing laboratory]. *Vcheni zapysky Universytetu «KROK»*, 1 (73), 188–194. <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2024-73-188-194>
- Mousavi S. A., Seiti H., Hafezalkotob A., Asian S. & Mobarra R. (2021). Application of risk-based fuzzy decision support systems in new product development: an R-VIKOR approach. *Applied Soft Computing*, 109, Article 107456. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107456>
- Nechaieva I. & Donchyk D. (2021). Vykorystannia tekhnolohii «Kravotka-metelyk» (BowTie) v praktytsi otsinky ryzykiv [Use of BowTie technology in the practice of risk assessment]. *Ekonomika ta suspilstvo*, 33. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-51>
- Pamučar D., Behzad M., Božanić D. & Behzad M. (2022). Designing a fuzzy decision support framework for assessing solid waste management in the South European region. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(29), 42862–42882. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18891-y>
- Petry F. E. & Yager R. R. (2022). Interval-valued fuzzy sets aggregation and evaluation approaches. *Applied Soft Computing*, 124, Article 108887. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108887>
- Sakalli A., Kumbasar T. & Mendel J. M. (2021). Towards systematic design of general type-2 fuzzy logic controllers: analysis, interpretation, and tuning. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2(29), 226–239. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.3016034>
- Siami M., Naderpour M., Ramezani F. & Lu J. (2024). Risk assessment through big data: an autonomous fuzzy decision support system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(25), 9016–9027. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3392959>
- Testik O. M. & Unlu E. T. (2023). Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories. *Quality and Reliability Engineering International*, 2(39), 575–589. <https://doi.org/10.1002/qre.3198>

Дослідження не отримувало зовнішнього фінансування. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Під час підготовки рукопису автори використовували ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5) для структурування тексту та мовного редагування окремих фрагментів статті. Усі наукові положення, результати дослідження, інтерпретація отриманих результатів і остаточний зміст рукопису перевірені авторами, які несуть повну відповідальність за його достовірність.

Стаття надійшла до редакції / Received: 27.07.2026
Статтю прийнято до публікації / Accepted: 12.08.2026
Оприлюднено / Published: 08.10.2026