

**Вінничук Олена Юріївна**

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри економіко-математичного моделювання,  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5354-3429>

**Готинчан Тетяна Іванівна**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри математичного моделювання,  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3964-444X>

**Івасюк Галина Петрівна**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри математичного моделювання,  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4381-3071>

**Фратавчан Тоня Михайлівна**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри математичного моделювання,  
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1076-0794>

## **ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКУ БАНКРУТСТВА ВИРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ**

У статті розроблено економіко-математичну модель оцінювання ризику банкрутства виробничих підприємств в умовах воєнного стану на основі апарату нечіткої логіки Мамдані. Запропонований підхід передбачає комплексне врахування фінансових, виробничих, маркетингових, кадрових, енергетичних та воєнно-економічних чинників шляхом їх агрегування в інтегральні показники з використанням вагових коефіцієнтів. Така структура дає змогу врахувати взаємозалежність ключових аспектів функціонування підприємства та зменшити вплив окремих невизначених параметрів на результати оцінювання. На основі експертного оцінювання сформовано базу нечітких правил, що забезпечує визначення рівня ризику банкрутства та ступенів належності підприємства до відповідних лінгвістичних термів. Проведено апробацію моделі на експертних даних, результати якої підтвердили її практичну придатність для підтримки прийняття управлінських рішень щодо своєчасного виявлення загроз фінансової неспроможності та оцінювання потенційної стійкості підприємства в умовах нестабільного зовнішнього середовища.

**Ключові слова:** математичне моделювання, інтегральні показники, експертні оцінки, нечітка логіка, нечіткий висновок Мамдані, ризик банкрутства, виробниче підприємство, ймовірісно-статистичні методи, статистичний аналіз, підтримка прийняття управлінських рішень.

**Olena Vinnychuk**

*PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor  
of the Department of Economic and Mathematical Modeling,  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*

**Tetiana Hotynchan**

*PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling,  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*

**Halyna Ivasiuk**

*PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling,  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*



**Tonia Fratavchan**

*PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling,  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*

## **ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF BANKRUPTCY RISK FOR MANUFACTURING ENTERPRISES BASED ON FUZZY LOGIC UNDER MARTIAL LAW**

The article presents an economic and mathematical model for assessing the bankruptcy risk of manufacturing enterprises under martial law based on the Mamdani fuzzy logic approach. The relevance of the study is determined by the increasing uncertainty of the business environment caused by military actions, which significantly reduces the predictive capability of traditional bankruptcy forecasting models. Unlike conventional approaches, the proposed model integrates financial, production, marketing, and military-economic factors, allowing a comprehensive assessment of the financial sustainability of enterprises under crisis conditions. The methodology is based on constructing a system of integral indicators obtained through the normalization and weighted aggregation of individual performance indicators. Weight coefficients are determined using expert evaluation, ensuring that the relative importance of each factor is considered in the integrated assessment. The fuzzy inference system includes linguistic variables, membership functions, and a compact knowledge base consisting of seven fuzzy production rules that implement the Mamdani inference algorithm. The model enables the determination of the degree of membership of an enterprise to the linguistic terms «low», «medium», and «high» bankruptcy risk, followed by defuzzification using the centroid method to obtain an integral risk assessment. The proposed model was tested on representative examples of manufacturing enterprises, demonstrating its ability to identify different levels of bankruptcy risk and to provide a more flexible interpretation of assessment results compared with traditional threshold-based methods. The use of fuzzy logic makes it possible to account for uncertainty, incomplete information, and expert knowledge, which are inherent characteristics of enterprise management under martial law. The practical significance of the research lies in the possibility of applying the proposed model as the mathematical basis for intelligent decision support systems aimed at monitoring financial stability, identifying early signs of financial distress, and supporting managerial decision-making regarding bankruptcy prevention. The developed approach is characterized by adaptability and can be extended by incorporating additional indicators, refining the fuzzy rule base, and integrating machine learning techniques to improve the accuracy and flexibility of bankruptcy risk assessment in future research.

**Keywords:** economic and mathematical modelling; integral indicators; expert evaluation; fuzzy logic; Mamdani fuzzy inference; bankruptcy risk; manufacturing enterprise; probabilistic and statistical methods; statistical analysis; decision support systems.

**Постановка проблеми.** Трансформаційні процеси в глобальній та національній економіці, що супроводжуються високою волатильністю ринків, макроекономічною нестабільністю, зміною логістичних ланцюгів і форс-мажорними чинниками, висувають підвищені вимоги до систем забезпечення фінансово-економічної безпеки суб'єктів господарювання. За таких умов важливим напрямом превентивного антикризового управління є своєчасна діагностика ризику неплатоспроможності й банкрутства підприємств, оскільки пізнє виявлення ознак фінансового дистресу обмежує можливості ефективної санації та спричиняє значні фінансові втрати для підприємств, кредиторів, інвесторів і держави [11; 15].

Особливої актуальності проблема оцінювання ризику банкрутства набуває для виробничих підприємств України, діяльність яких в умовах воєнного стану зазнає впливу численних внутрішніх і зовнішніх ризиків. Порушення логістичних ланцюгів, перебої в енергозабезпеченні, інфляційні процеси, дефіцит трудових ресурсів, нестабільність ринків збуту та обмежений доступ до фінансових ресурсів ускладнюють стабільне функціонування підприємств і підвищують імовірність кризових явищ.

Традиційні економетричні моделі прогнозування банкрутства, засновані на дискримінантному аналізі та логістичній регресії, не завжди дають змогу врахувати невизначеність і неповноту економічної інформації, нелінійні взаємозв'язки між показниками та вплив зовнішніх чинників. Фінансова звітність переважно відображає ретроспективний стан підприємства, що може знижувати прогностичну здатність детермінованих моделей.

З огляду на це актуальним є розроблення економіко-математичних моделей, здатних комплексно враховувати фінансові, виробничі, маркетингові та воєнно-економічні чинники в умовах невизначеності. Одним із перспективних підходів є використання апарату нечіткої логіки, який забезпечує формалізацію експертних знань, інтеграцію кількісних і якісних показників та підвищує обґрунтованість управлінських рішень щодо оцінювання ризику банкрутства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема прогнозування ризику банкрутства підприємств є предметом численних наукових досліджень. Значний внесок у розвиток методів діагностики фінансової неспроможності зробили Е. Альтман [1], Р. Таффлер [7; 8], Г. Спрінгейт [6], моделі яких ґрун-

туються на використанні дискримінантного аналізу та фінансових коефіцієнтів. Вагомий внесок у розвиток вітчизняних підходів до оцінювання фінансового стану підприємств належить О. Терещенку, О. Копилук [11; 15].

Сучасні умови функціонування підприємств описуються високим рівнем невизначеності та відповідно обмежує можливості застосування класичних детермінованих моделей. Відповідно до цього дедалі більшого поширення набувають підходи, засновані на теорії нечітких множин та нечіткій логіці, започаткованій Л. Заде та розвинутій у працях сучасних дослідників [7]. Використання нечіткої логіки дає змогу інтегрувати кількісні фінансові показники з якісними експертними оцінками, враховувати невизначеність економічного середовища та підвищувати достовірність результатів оцінювання ризику банкрутства [14]. Доцільність використання нечіткої логіки для прогнозування банкрутства підтверджують дослідження Т. Короля та А. Короді, які розробили модель нечіткого логічного висновку на основі фінансових показників і їх динаміки та довели її ефективність для раннього прогнозування ризику банкрутства підприємств [4]. У дослідженні [13] запропоновано застосування нечіткої логіки як альтернативи традиційним статистичним методам прийняття рішень. Автори показали, що використання функцій належності, бази нечітких правил та алгоритму Мамдані дає змогу ефективніше враховувати невизначеність, неповноту інформації та експертні знання, забезпечуючи більшу гнучкість і пояснюваність моделей оцінювання ризику порівняно з класичними підходами.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Попри активне дослідження цієї проблематики у сучасному науковому дискурсі, більшість існуючих моделей орієнтована переважно на аналіз фінансових показників і не враховує комплексного впливу виробничих, маркетингових та воєнно-економічних чинників, які суттєво визначають результати діяльності українських підприємств в умовах воєнного стану. Крім того, використання жорстких порогових значень фінансових коефіцієнтів не дозволяє адекватно відобразити невизначеність та нечіткість економічної інформації, що знижує достовірність результатів оцінювання. Це зумовлює необхідність розроблення інтегрованої економіко-математичної моделі, яка поєднуватиме систему інтегральних показників із механізмом нечіткого логічного висновку для комплексного оцінювання ризику банкрутства виробничих підприємств.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, більшість існуючих моделей орієнтована переважно на аналіз фінансових показників і не враховує комплексного впливу виробничих, маркетингових та воєнно-економічних чинників, які суттєво визначають результати діяльності українських підприємств в умовах воєнного стану. Крім того,

використання жорстких порогових значень фінансових коефіцієнтів не дозволяє адекватно відобразити невизначеність та нечіткість економічної інформації, що знижує достовірність результатів оцінювання. Це зумовлює необхідність розроблення інтегрованої економіко-математичної моделі, яка поєднуватиме систему інтегральних показників із механізмом нечіткого логічного висновку для комплексного оцінювання ризику банкрутства виробничих підприємств.

**Метою дослідження** є розроблення економіко-математичної моделі оцінювання ризику банкрутства виробничих підприємств в умовах воєнного стану на основі системи інтегральних показників та експертної бази знань, реалізованої із застосуванням алгоритму нечіткого логічного висновку Мамдані.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Оцінювання ризику банкрутства підприємства в умовах воєнного стану потребує комплексного врахування взаємопов'язаних факторів, що характеризують його фінансовий стан, ефективність виробничої діяльності, реалізацію продукції та вплив зовнішнього середовища. На відміну від традиційних моделей, заснованих переважно на фінансових коефіцієнтах, запропонований підхід інтегрує фінансові, виробничі, маркетингові, логістичні, кадрові, енергетичні та воєнно-економічні чинники в єдину систему оцінювання, що дає змогу врахувати невизначеність функціонування підприємств України та підвищити адекватність оцінки ризику банкрутства.

Вибір нечіткої логіки зумовлений необхідністю моделювання процесів, для яких характерні невизначеність, неповнота інформації та відсутність чітких меж між рівнями ризику. Нечіткий підхід дає змогу поєднати точні числові значення з лінгвістичними оцінками («низький», «середній», «високий») за допомогою теорії нечітких множин, функцій належності та нечіткого логічного висновку [12].

Теоретичною основою запропонованої моделі є теорія нечітких множин Л. Заде, яка забезпечує математичний апарат для опису нечітких і неповних даних [9]. Її використання дає змогу формалізувати експертні знання за допомогою лінгвістичних змінних, функцій належності та продукційних правил, що є важливим для оцінювання ризику банкрутства підприємств в умовах мінливого зовнішнього середовища. Доцільність застосування нечітких моделей підтверджується дослідженням [12], результати якого засвідчують їх здатність враховувати невизначеність фінансових показників і підвищувати якість оцінювання ризику неплатоспроможності.

У дослідженні використано алгоритм нечіткого логічного висновку Мамдані, який дає змогу поєднати кількісні показники з експертними знаннями, сформулювати базу правил типу «ЯКЩО–ТО» та отримати інтегральну оцінку ризику банкрутства шляхом дефазифікації. Це забезпечує гнучкість моделі та її адаптивність до змін економічного середовища.

Побудова моделі передбачає визначення системи вхідних і вихідної змінних, що характеризують фінансовий стан підприємства, ефективність його функціонування та вплив зовнішнього середовища. Вихідною змінною є інтегральний рівень ризику банкрутства, який інтерпретується за лінгвістичними термами «низький», «середній» і «високий».

З урахуванням специфіки діяльності виробничих підприємств в умовах воєнного стану систему вхідних змінних сформовано на основі чотирьох груп факторів.

Фінансові фактори описують фінансову стійкість підприємства та його платоспроможність. До цієї групи належать обсяг кредитної заборгованості, поточні платежі за кредитами, показники ліквідності, рентабельність, величина грошового потоку, частка власного капіталу, дебіторська та кредиторська заборгованість [1-8; 10-12; 14; 15].

Виробничі фактори відображають ефективність використання виробничих ресурсів і стабільність виробничого процесу: рівень завантаження виробничих потужностей, собівартість продукції, продуктивність праці, рівень браку, забезпеченість підприємства сировиною і матеріалами [2-5; 10-12; 14; 15].

Маркетингові фактори характеризують ринкову діяльність підприємства та його конкурентоспроможність. До них належать обсяг реалізації продукції, темпи зростання продажів, витрати на маркетингові заходи, ефективність рекламних кампаній, частка ринку та рівень диверсифікації клієнтської бази [1-8; 10-12; 15].

Воєнно-економічні фактори враховують специфічні ризики функціонування підприємств в умовах воєнного стану. До цієї групи віднесено ризик пошкодження виробничих потужностей, перебої електропостачання, наявність резервних джерел енергоживлення, логістичні ризики постачання сировини та збуту продукції, кадровий дефіцит, ризик втрати ринків збуту, валютні коливання, інфляційні процеси, зміну вартості енергоносіїв і доступність кредитних ресурсів [2; 3; 5].

**Побудова математичної моделі інтегральних показників.** Оскільки обрані фактори мають різну економічну природу та неоднаковий вплив на ризик банкрутства, їх агрегують у систему інтегральних показників. Для цього всі часткові показники попередньо нормуються до інтервалу  $[0;1]$ , після чого інтегральні показники визначаються як зважена сума нормованих складових:

$$X_j = \sum_{i=1}^{n_j} p_{ij} x_{ij},$$

де  $X_j$  –  $j$ -й інтегральний показник (фінансова стійкість, кредитне навантаження тощо);  $n_j$  – кількість складових  $j$ -го інтегрального показника;  $x_{ij}$  –  $i$ -та складова  $j$ -го інтегрального показника;  $p_{ij}$  – ваговий коефіцієнт впливу цієї складової, при-

чому  $p_{ij} > 0, \sum_{i=1}^{n_j} p_{ij} = 1$ . Показники  $p_{ij}$  інтерпретуються як вагові коефіцієнти (частки впливу), які виставляє сам дослідник, а у випадку ймовірнісних оцінок як ймовірність впливу. Зокрема, якщо вплив усіх складових інтегрального показника однаковий, то  $p_{ij} = \frac{1}{n_j}$ , й інтегральний показник формується як

$$X_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}.$$

Враховуючи запропоновану структуру моделі, сформовано дев'ять інтегральних показників, які характеризують внутрішній стан виробничого підприємства та вплив зовнішнього середовища. Основні характеристики інтегральних показників наведено в табл. 1.

Після формування системи інтегральних показників вони використовуються як вхідні змінні економіко-математичної моделі оцінювання ризику банкрутства виробничого підприємства. Кожний інтегральний показник агрегує сукупність нормованих часткових показників, що характеризують окрему складову діяльності підприємства або вплив зовнішнього середовища. Такий підхід забезпечує комплексне врахування різномірних факторів та створює основу для подальшого застосування апарату нечіткої логіки.

Загальна структура моделі оцінювання ризику банкрутства може бути представлена у вигляді  $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9)$ , де функція  $f(\cdot)$  реалізується за допомогою апарату нечіткої логіки. Зазначимо, що перші п'ять факторів описують внутрішній стан підприємства, а фактори  $X_6 - X_9$  враховують специфічні ризики функціонування українських підприємств в умовах воєнного стану.

Побудова моделі оцінювання ризику банкрутства підприємства на основі апарату нечіткої логіки потребує формалізації якісних знань експертів щодо впливу ключових факторів на фінансовий стан підприємства. Оскільки запропонована модель враховує дев'ять інтегральних показників, кожен із яких характеризується нечіткими лінгвістичними термами («низький», «середній», «високий»), на початковому етапі моделювання необхідно сформувати базу експертних оцінок. Саме вона забезпечує визначення рівня кожного показника для конкретного підприємства та слугує інформаційною основою для побудови бази нечітких правил, виконання нечіткого висновку за методом Мамдані та подальшого визначення рівня ризику банкрутства.

Для формування вхідних даних моделі було розроблено таблицю експертних оцінок (табл. 2), яка містить оцінювання всіх дев'яти інтегральних показників за тривірневою лінгвістичною шкалою.

Таблиця 1

Інтегральні показники оцінювання ризику банкрутства та їх складові

| Інтегральний показник                      | Економічний зміст                                                     | Основні складові                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фінансова стійкість<br>$X_1$               | Характеризує фінансову незалежність та платоспроможність підприємства | $X_1 = p_1 \tilde{K}_{авт} + p_2 \tilde{K}_{лікв} + p_3 \tilde{K}_{ман}$ ,<br>де $\tilde{K}_{авт}$ – коефіцієнт автономії; $\tilde{K}_{лікв}$ – коефіцієнт поточної ліквідності; $\tilde{K}_{ман}$ – коефіцієнт маневреності власного капіталу.                                                           |
| Кредитне навантаження<br>$X_2$             | Відображає здатність підприємства обслуговувати кредитні зобов'язання | $X_2 = p_1 \tilde{L} + p_2 \tilde{P} + p_3 \tilde{D}$ ,<br>де $\tilde{L}$ – нормована частка кредитної заборгованості в активах; $\tilde{P}$ – нормоване відношення платежів за кредитом до чистого грошового потоку; $\tilde{D}$ – нормований коефіцієнт боргового навантаження.                         |
| Прибутковість діяльності<br>$X_3$          | Характеризує ефективність фінансово-господарської діяльності          | $X_3 = p_1 \tilde{R}_s + p_2 \tilde{R}_a + p_3 \tilde{R}_e$ ,<br>де $\tilde{R}_s$ – нормована рентабельність продажів; $\tilde{R}_a$ – нормована рентабельність активів; $\tilde{R}_e$ – нормована рентабельність власного капіталу.                                                                      |
| Виробнича ефективність<br>$X_4$            | Оцінює ефективність використання виробничих ресурсів                  | $X_4 = p_1 \tilde{K}_{зав} + p_2 \tilde{P}_{np} + p_3 (1 - \tilde{K}_{бр})$ ,<br>де $\tilde{K}_{зав}$ – нормоване завантаження виробничих потужностей; $\tilde{P}_{np}$ – нормована продуктивність праці; $\tilde{K}_{бр}$ – нормований рівень браку.                                                     |
| Ефективність реалізації продукції<br>$X_5$ | Характеризує результативність збутової діяльності                     | $X_5 = p_1 \tilde{S} + p_2 \tilde{G}_s + p_3 \tilde{M}_s$ ,<br>де $\tilde{S}$ – нормований обсяг реалізації (виручка від реалізації продукції); $\tilde{G}_s$ – темп зростання продажів; $\tilde{M}_s$ – частка ринку.                                                                                    |
| Логістична стійкість<br>$X_6$              | Відображає надійність логістичного забезпечення                       | $X_6 = p_1 \tilde{L}_s + p_2 \tilde{L}_r + p_3 \tilde{L}_a$ ,<br>де $\tilde{L}_s$ – нормований показник надійності постачання; $\tilde{L}_r$ – нормований показник стабільності логістичних маршрутів; $\tilde{L}_a$ – нормований показник забезпеченості альтернативними маршрутами.                     |
| Енергетична безпека<br>$X_7$               | Характеризує стійкість енергозабезпечення                             | $X_7 = p_1 \tilde{E}_s + p_2 \tilde{E}_r + p_3 \tilde{E}_a$ ,<br>де $\tilde{E}_s$ – нормований показник стабільності електропостачання; $\tilde{E}_r$ – нормований показник забезпеченості резервними джерелами енергії; $\tilde{E}_a$ – нормований показник енергетичної автономності;                   |
| Кадрова стійкість<br>$X_8$                 | Відображає забезпеченість підприємства персоналом                     | $X_8 = p_1 \tilde{H}_s + p_2 (1 - \tilde{H}_t) + p_3 \tilde{H}_k$ ,<br>де $\tilde{H}_s$ – нормований показник укомплектованості персоналом; $\tilde{H}_t$ – нормований показник плинності кадрів; $\tilde{H}_k$ – нормований показник забезпеченості ключових посад.                                      |
| Воєнно-економічний ризик<br>$X_9$          | Характеризує вплив зовнішнього середовища                             | $X_9 = p_1 (1 - \tilde{W}_s) + p_2 (1 - \tilde{W}_i) + p_3 (1 - \tilde{W}_c) + p_4 (1 - \tilde{W}_m)$ ,<br>де $\tilde{W}_s$ – нормований безпековий ризик; $\tilde{W}_i$ – нормований інфляційний ризик; $\tilde{W}_c$ – нормований валютний ризик; $\tilde{W}_m$ – нормований ризик втрати ринків збуту. |

Джерело: сформовано авторами на основі [2; 3; 5; 10; 14]

Таблиця 2

Експертні коефіцієнти впливу складових інтегральних показників

| Інтегральний показник             | Складові                                       | Коефіцієнт впливу $p_i$ |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------|
| Фінансова стійкість               | Коефіцієнт автономії                           | 0,40                    |
|                                   | Коефіцієнт поточної ліквідності                | 0,35                    |
|                                   | Коефіцієнт маневреності власного капіталу      | 0,25                    |
| Кредитне навантаження             | Частка кредитної заборгованості                | 0,40                    |
|                                   | Частка платежів за кредитом у грошовому потоці | 0,35                    |
|                                   | Коефіцієнт боргового навантаження              | 0,25                    |
| Прибутковість діяльності          | Рентабельність продажів                        | 0,40                    |
|                                   | Рентабельність активів                         | 0,35                    |
|                                   | Рентабельність власного капіталу               | 0,25                    |
| Виробнича ефективність            | Завантаження виробничих потужностей            | 0,40                    |
|                                   | Продуктивність праці                           | 0,35                    |
|                                   | Рівень якості продукції (або рівень браку)     | 0,25                    |
| Ефективність реалізації продукції | Обсяг реалізації                               | 0,40                    |
|                                   | Темп зростання продажів                        | 0,35                    |
|                                   | Частка ринку                                   | 0,25                    |
| Логістична стійкість              | Надійність постачання                          | 0,40                    |
|                                   | Стабільність логістичних маршрутів             | 0,35                    |
|                                   | Альтернативні маршрути постачання              | 0,25                    |
| Енергетична безпека               | Стабільність електропостачання                 | 0,45                    |
|                                   | Резервні джерела енергії                       | 0,35                    |
|                                   | Енергетична автономність                       | 0,20                    |
| Кадрова стійкість                 | Укомплектованість персоналом                   | 0,40                    |
|                                   | Плинність кадрів                               | 0,35                    |
|                                   | Забезпеченість ключових посад                  | 0,25                    |
| Воєнно-економічний ризик          | Безпекові ризики                               | 0,35                    |
|                                   | Інфляційні ризики                              | 0,20                    |
|                                   | Валютні ризики                                 | 0,20                    |
|                                   | Ризик втрати ринків збуту                      | 0,25                    |

Джерело: сформовано авторами на основі експертних оцінок та результатів аналізу діяльності виробничих підприємств

Нечіткий висновок формалізується з використанням методу Мамдані [9] і за наявності таких 7 правил:

Правило 1 (мінімальний ризик банкрутства): Висока (Фінансова стійкість)  $\wedge$  Низьке (Кредитне навантаження)  $\wedge$  Висока (Прибутковість діяльності)  $\wedge$  Висока (Виробнича ефективність)  $\wedge$  Висока (Ефективність реалізації продукції)  $\wedge$  Висока (Логістична стійкість)  $\wedge$  Висока (Енергетична безпека)  $\wedge$  Висока (Кадрова стійкість)  $\wedge$  Низький (Воєнно-економічний ризик)  $\rightarrow$  Низький (Ризик банкрутства).

Правило 2 (фінансова криза): Низька (Фінансова стійкість)  $\wedge$  Високе (Кредитне навантаження)  $\wedge$  Низька (Прибутковість діяльності)  $\rightarrow$  Високий (Ризик банкрутства).

Правило 3 (виробничо-маркетингова криза): Низька (Виробнича ефективність)  $\wedge$  Низька (Ефективність реалізації продукції)  $\rightarrow$  Високий (Ризик банкрутства).

Правило 4 (критичний воєнно-операційний вплив): Низька (Логістична стійкість)  $\wedge$  Низька

(Енергетична безпека)  $\wedge$  Низька (Кадрова стійкість)  $\wedge$  Високий (Воєнно-економічний ризик)  $\rightarrow$  Високий (Ризик банкрутства).

Правило 5 (стійке підприємство в умовах війни): Висока (Фінансова стійкість)  $\wedge$  Висока (Прибутковість діяльності)  $\wedge$  Висока (Логістична стійкість)  $\wedge$  Висока (Енергетична безпека)  $\wedge$  Висока (Кадрова стійкість)  $\wedge$  Високий (Воєнно-економічний ризик)  $\rightarrow$  Середній (Ризик банкрутства).

Правило 6 (типовий стан підприємства): Середня (Фінансова стійкість)  $\wedge$  Середнє (Кредитне навантаження)  $\wedge$  Середня (Прибутковість діяльності)  $\wedge$  Середня (Виробнича ефективність)  $\wedge$  Середня (Ефективність реалізації продукції)  $\wedge$  Середня (Логістична стійкість)  $\wedge$  Середня (Енергетична безпека)  $\wedge$  Середня (Кадрова стійкість)  $\wedge$  Середній (Воєнно-економічний ризик)  $\rightarrow$  Середній (Ризик банкрутства).

Правило 7 (комбінований негативний сценарій): Середня (Фінансова стійкість)  $\wedge$  Низька (Прибутковість діяльності)  $\wedge$  Низька (Виробнича ефективність)  $\wedge$

Високий (Воєнно-економічний ризик) → Високий (Ризик банкрутства).

Ці 7 правил утворюють компакту експертну базу знань, яка охоплює: сприятливий сценарій, фінансову кризу, виробничо-маркетингову кризу, воєнно-операційну кризу, стійке функціонування в умовах війни, типовий середній стан підприємства та комбінований негативний сценарій.

Оскільки у межах системи нечіткого висновок вибрано лінгвістичні терми «низький», «середній» та «високий», то достатньо трикутних функцій належності. У випадку нормалізованих множин значень  $[0;1]$  за точки розбиття візьмемо  $0; 1/4; 2/4; 3/4; 1$ .

Низький:

$$\mu_{\text{Низька}}(K) = \begin{cases} 1, & K \leq 1/4; \\ 4(2/4 - K), & 1/4 < K < 2/4; \\ 0, & K \geq 2/4. \end{cases}$$

Середній:

$$\mu_{\text{Середня}}(K) = \begin{cases} 0, & K \leq 1/4; \\ 4(K - 1/4), & 1/4 < K < 2/4; \\ 4(3/4 - K), & 2/4 \leq K < 3/4; \\ 0, & K \geq 3/4. \end{cases}$$

Високий:

$$\mu_{\text{Висока}}(K) = \begin{cases} 0, & K \leq 2/4; \\ 4(K - 2/4), & 2/4 < K < 3/4; \\ 1, & K \geq 3/4. \end{cases}$$

З метою перевірки працездатності запропонованої моделі виконано оцінювання ризику банкрутства двох виробничих підприємств. Для кожного підприємства попередньо обчислено інтегральні показники за дев'ятьма критеріями. Отримані значення використовуються як вхідні змінні системи нечіткого логічного виведення Мамдані для визначення інтегрального рівня ризику банкрутства.

Таблиця 3

Нормалізовані дані складових інтегральних показників

| Інтегральний показник             | Складові                                       | Підприємство 1 | Підприємство 2 |
|-----------------------------------|------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Фінансова стійкість               | Коефіцієнт автономії                           | 0,72           | 0,22           |
|                                   | Коефіцієнт поточної ліквідності                | 0,65           | 0,25           |
|                                   | Коефіцієнт маневреності власного капіталу      | 0,61           | 0,31           |
| Кредитне навантаження             | Частка кредитної заборгованості                | 0,45           | 0,85           |
|                                   | Частка платежів за кредитом у грошовому потоці | 0,39           | 0,69           |
|                                   | Коефіцієнт боргового навантаження              | 0,42           | 0,92           |
| Прибутковість діяльності          | Рентабельність продажів                        | 0,58           | 0,38           |
|                                   | Рентабельність активів                         | 0,63           | 0,33           |
|                                   | Рентабельність власного капіталу               | 0,60           | 0,3            |
| Виробнича ефективність            | Завантаження виробничих потужностей            | 0,76           | 0,36           |
|                                   | Продуктивність праці                           | 0,68           | 0,28           |
|                                   | Рівень браку                                   | 0,29           | 0,27           |
| Ефективність реалізації продукції | Обсяг реалізації                               | 0,62           | 0,62           |
|                                   | Темп зростання продажів                        | 0,55           | 0,35           |
|                                   | Частка ринку                                   | 0,57           | 0,27           |
| Логістична стійкість              | Надійність постачання                          | 0,52           | 0,22           |
|                                   | Стабільність логістичних маршрутів             | 0,49           | 0,29           |
|                                   | Альтернативні маршрути постачання              | 0,46           | 0,16           |
| Енергетична безпека               | Стабільність електропостачання                 | 0,62           | 0,2            |
|                                   | Резервні джерела енергії                       | 0,55           | 0,38           |
|                                   | Енергетична автономність                       | 0,63           | 0,23           |
| Кадрова стійкість                 | Укомплектованість персоналом                   | 0,67           | 0,47           |
|                                   | Плинність кадрів                               | 0,39           | 0,59           |
|                                   | Забезпеченість ключових посад                  | 0,59           | 0,49           |
| Воєнно-економічний ризик          | Безпекові ризики                               | 0,6            | 0,7            |
|                                   | Інфляційні ризики                              | 0,35           | 0,35           |
|                                   | Валютні ризики                                 | 0,3            | 0,3            |
|                                   | Ризик втрати ринків збуту                      | 0,55           | 0,85           |

Джерело: сформовано та розраховано авторами на основі експертних оцінок

Таблиця 4

Значення інтегральних показників

| Інтегральний показник             | Підприємство 1 | Підприємство 2 |
|-----------------------------------|----------------|----------------|
| Фінансова стійкість               | 0,668          | 0,253          |
| Кредитне навантаження             | 0,4215         | 0,8115         |
| Прибутковість діяльності          | 0,6025         | 0,3425         |
| Виробнича ефективність            | 0,7195         | 0,4245         |
| Ефективність реалізації продукції | 0,583          | 0,438          |
| Логістична стійкість              | 0,4945         | 0,2295         |
| Енергетична безпека               | 0,5975         | 0,269          |
| Кадрова стійкість                 | 0,629          | 0,454          |
| Воєнно-економічний ризик          | 0,5225         | 0,7275         |

Джерело: сформовано та розраховано авторами

За даними з таблиці 3, використовуючи формули з таблиці 1, отримано значення інтегральних показників (табл. 4).

На основі отриманих значень інтегральних показників для кожного критерію визначаємо ступені належності до відповідних лінгвістичних термів «низький», «середній» та «високий» за допомогою функцій належності. Сформовані значення ступенів належності використовуємо як вхідні дані системи нечіткого логічного виведення Мамдані.

На наступному етапі, відповідно до алгоритму Мамдані, визначаємо ступінь активації (спрацювання) кожного нечіткого правила. Після цього виконуємо імплікацію, тобто обрізання функції належності вихідного терму відповідно до сили спрацювання правила, а далі – агрегацію, у процесі якої результати всіх активованих правил об'єднуємо в одну результуючу нечітку множину вихідної змінної «Ризик банкрутства».

Таблиця 5

Ступені належності результуючої нечіткої множини ризику банкрутства після агрегації правил

| Терми    | Підприємство 1 | Підприємство 2 |
|----------|----------------|----------------|
| низький  | 0              | 0              |
| середній | 0,122          | 0              |
| високий  | 0              | 0,63           |

Джерело: сформовано та розраховано авторами

На етапі дефазифікації використовується формула методу центру ваги  $R = \frac{\int_0^1 x \mu(x) dx}{\int_0^1 \mu(x) dx}$ , в якій  $R$  описує рівень ризику банкрутства. Інтеграл апроксимуємо дискретною сумою:  $R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$ .

У результаті обчислень отримуємо значення  $R$  для першого підприємства:  $R = \frac{0,549}{1,098} = 0,5$  та відповідає

лінгвістичному терму «середній ризик банкрутства», що свідчить про наявність окремих факторів ризику, однак фінансовий стан підприємства загалом можна вважати задовільним. Аналогічно обчислюємо значення  $R$  для другого підприємства:  $R = \frac{4,4885}{5,61} = 0,8$ , що відповідає лінгвістичному терму «високий ризик банкрутства», що свідчить про значну ймовірність виникнення фінансової неспроможності підприємства за умови збереження поточного стану.

Результати апробації підтвердили працездатність запропонованої моделі та можливість її практичного застосування для оцінювання ризику банкрутства виробничих підприємств. Алгоритм Мамдані дає змогу визначити інтегральний рівень ризику й ступені належності підприємства до лінгвістичних термів результуючої нечіткої множини, забезпечуючи гнучку інтерпретацію результатів та основу для інтелектуальних систем підтримки управлінських рішень.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження отримано такі основні результати: 1) розроблено економіко-математичну модель оцінювання ризику банкрутства виробничих підприємств в умовах воєнного стану, яка базується на використанні апарату нечіткої логіки Мамдані; 2) удосконалено підхід до оцінювання ризику банкрутства шляхом комплексного врахування фінансових, виробничих, маркетингових та воєнно-економічних чинників, що забезпечує більш повне відображення умов функціонування підприємств у період воєнного стану; 3) запропоновано механізм агрегування показників на основі інтегральних факторів, що забезпечує зменшення розмірності моделі без втрати інформативності; 4) сформовано базу знань у вигляді семи нечітких правил, яка реалізує алгоритм нечіткого логічного виведення Мамдані та дозволяє визначати як інтегральний рівень ризику банкрутства, так і ступені належності підприємства до відповідних лінгвістичних термів; 5) апробовано запропоновану модель, що підтвердило її практичну придатність для оцінювання та моніторингу ризику банкрутства виробничих підприємств.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням запропонованої моделі, удосконаленням бази нечітких правил, її адаптацією до особливостей окремих галузей економіки та інтеграцією методів машинного навчання для підвищення точності й адаптивності оцінювання ризику банкрутства.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Терещенко О. О. Дискримінантний аналіз у діагностиці банкрутства підприємств. *Фінанси України*. 2003. № 4. С. 133–140. URL: <http://finukr.org.ua/>
2. Копилук О. І., Музичка О. М. Фінансова санація та банкрутство підприємств : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2012. 352 с. URL: <https://cul.com.ua/>
3. Altman E. I. Financial Ratios, Discriminant Analysis and the Prediction of Corporate Bankruptcy. *The Journal of Finance*. 1968. Vol. 23, No. 4. P. 589–609. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1968.tb00843.x>.
4. Taffler R. J., Tisshaw H. J. Going, going, gone – four factors which predict-bankruptcy. *Accountancy*. 1977. Vol. 88, No. 1003. P. 50–54. URL: [https://www.researchgate.net/publication/292415152\\_Going\\_going\\_gone\\_Four\\_factors\\_which\\_predict\\_bankruptcy](https://www.researchgate.net/publication/292415152_Going_going_gone_Four_factors_which_predict_bankruptcy)
5. Taffler R. J. The assessment of company solvency and performance using a statistical model. *Accounting and Business Research*. 1983. Vol. 13, No. 52. P. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1080/00014788.1983.9729767>.
6. Springate G. L. V. Computer-based corporate prediction models: A discriminant analysis approach. *Unpublished MBA Research Project*, Simon Fraser University, 1978. 104 p.
7. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
8. Радецька Л. П. Моделювання фінансової стійкості підприємства із застосуванням теорії нечітких множин. *Економіка та держава*. 2019. № 5. С. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2019.5.82>.
9. Korol T., Korodi A. An Evaluation of Effectiveness of Fuzzy Logic Model in Predicting the Business Bankruptcy. *Romanian Journal of Economic Forecasting*. 2011. Vol. 14, No. 3. P. 92–107. URL: [https://www.ipe.ro/rjef/rjef3\\_11/rjef3\\_2011p92-107.pdf](https://www.ipe.ro/rjef/rjef3_11/rjef3_2011p92-107.pdf)
10. Поповський С. В., Волков В. Е. Використання нечіткої логіки як альтернативи класичним підходам в системі автоматизованого прийняття рішень кредитних організацій. *Інформатика. Культура. Техніка*. 2025. Т. 2. С. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.38>
11. Матвійчук А. В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка : монографія. Київ : КНЕУ, 2011. 439 с.
12. Бідюк П. І., Вертелецький В. В., Жирова А. О. Аналіз ризику банкрутства підприємств з використанням чітких та нечітких моделей. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2015. № 12. С. 477–490. URL: <https://ev.fmm.kpi.ua/article/view/44165>
13. Halder A., Kannadhasan M. Energy uncertainty and corporate bankruptcy risk: International evidence // *Energy Economics*. 2025. Vol. 151. Article 108908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108908>
14. Roy T., Bhuiyan R. A., Ahmed S. U., Abdullah M. *Geopolitical conflict and firm bankruptcy risk*. Finance Research Letters. 2024. Vol. 68. Article 106005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106005> .
15. Knopf J., Lalova K. *Predicting Bankruptcy: Ask the Employees*. 2025. Electronic Journal. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4399476>.

### REFERENCES

1. Altman E. I. Financial Ratios, Discriminant Analysis and the Prediction of Corporate Bankruptcy. *The Journal of Finance*. 1968. Vol. 23, No. 4. P. 589–609. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1968.tb00843.x>.
2. Halder A., Kannadhasan M. Energy Uncertainty and Corporate Bankruptcy Risk: International Evidence. *Energy Economics*. 2025. Vol. 151. Article 108908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108908>.
3. Knopf J., Lalova K. Predicting Bankruptcy: Ask the Employees. *SSRN Electronic Journal*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4399476>.
4. Korol T., Korodi A. An Evaluation of Effectiveness of Fuzzy Logic Model in Predicting the Business Bankruptcy. *Romanian Journal of Economic Forecasting*. 2011. Vol. 14, No. 3. P. 92–107. Available at: [https://www.ipe.ro/rjef/rjef3\\_11/rjef3\\_2011p92-107.pdf](https://www.ipe.ro/rjef/rjef3_11/rjef3_2011p92-107.pdf).
5. Roy T., Bhuiyan R. A., Ahmed S. U., Abdullah M. Geopolitical Conflict and Firm Bankruptcy Risk. *Finance Research Letters*. 2024. Vol. 68. Article 106005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106005>.
6. Springate G. L. V. *Computer-based Corporate Prediction Models: A Discriminant Analysis Approach*. Unpublished MBA Research Project. Simon Fraser University, 1978. 104 p.
7. Taffler R. J. The Assessment of Company Solvency and Performance Using a Statistical Model. *Accounting and Business Research*. 1983. Vol. 13, No. 52. P. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1080/00014788.1983.9729767>.
8. Taffler R. J., Tisshaw H. J. Going, Going, Gone – Four Factors Which Predict Bankruptcy. *Accountancy*. 1977. Vol. 88, No. 1003. P. 50–54. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/292415152\\_Going\\_going\\_gone\\_Four\\_factors\\_which\\_predict\\_bankruptcy](https://www.researchgate.net/publication/292415152_Going_going_gone_Four_factors_which_predict_bankruptcy).
9. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
10. Bidiuk P. I., Vereteletskyi V. V., Zhyrova A. O. Analiz ryzyku bankrutstva pidpriemstv z vykorystanniam chitkykh ta nechitkykh modelei. *Ekonomicnyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut"*. 2015. No. 12. P. 477–490. Available at: <https://ev.fmm.kpi.ua/article/view/44165>.
11. Kopyliuk O. I., Muzychka O. M. *Finansova sanatsiia ta bankrutstvo pidpriemstv*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury, 2012. 352 p. Available at: <https://cul.com.ua/>.

12. Matviichuk A. V. *Shtuchnyi intelekt v ekonomitsi: neironni merezhi, nechitka lohika*. Kyiv: KNEU, 2011. 439 p.
13. Popovskiy S. V., Volkov V. E. Vykorystannia nechitkoi lohiky yak alternatyvy klasychnym pidkhodam v systemi avtomatyzovanooho pryiniattia rishen kredytnykh orhanizatsii. *Informatyka. Kultura. Tekhnika*. 2025. Vol. 2. P. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.38>.
14. Radetska L. P. Modeliuvannia finansovoi stiikosti pidpriemstva iz zastosuvanniam teorii nechitkykh mnozhyn. *Ekonomika ta derzhava*. 2019. No. 5. P. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2019.5.82>.
15. Tereshchenko O. O. Dyskryminantnyi analiz u diahnostytsi bankrutstva pidpriemstv. *Finansy Ukrainy*. 2003. No. 4. P. 133–140. Available at: <http://finukr.org.ua/>.

Дата надходження статті: 02.07.2026

Дата прийняття статті до публікації: 12.08.2026

Дата публікації статті: 28.08.2026