

УДК 519.876.5

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-14>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ НА ОСНОВІ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ І НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВА

Подскребко Олександр Сергійович,

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри інтелектуальних технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: 0000-0001-5282-4691

Іванченко Надія Олександрівна,

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри статистики, інформаційно-аналітичних систем і демографії
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: 0000-0002-7289-3587

Кудін Володимир Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інтелектуальних технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: 0009-0005-9071-1213

Самохвалов Юрій Якович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інтелектуальних технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID ID: 0000-0001-5123-1288

У статті запропоновано інтелектуальну модель управління запасами, що інтегрує генетичний алгоритм і нечітку логіку з метою підвищення економічної безпеки промислового підприємства. Генетичний алгоритм виконує пошук глобального оптимуму у великому дискретному просторі рішень, тоді як нечітка логіка трансформує суб'єктивні оцінки ризику зриву постачань ресурсів у формалізовані штрафи, що дає змогу коректно враховувати невизначеність і неповноту даних. Модель містить жорсткі ресурсні, бюджетні та виробничі обмеження, а також налаштовані м'які штрафи за дефіцит продукції, що забезпечує баланс між мінімізацією витрат, виконанням зобов'язань і підтриманням стабільності ланцюга постачання, що напряму впливає на економічну безпеку підприємства.

Експериментальні обчислення на демонстраційному наборі даних (три типи ресурсів, два види продукції) показали, що після 60 поколінь еволюції система забезпечує прибуток понад 37 тис грн із дотриманням усіх обмежень, автоматично оптимізуючи обсяги закупівель і виробництва залежно від ризикового профілю. Аналіз чутливості підтвердив, що невеликі зміни у вагових коефіцієнтах штрафів дають змогу швидко адаптувати модель до різних стратегічних сценаріїв – від агресивного зростання до консервативної політики економії.

Запропонований підхід легко масштабувати, додавання нових ресурсів або товарів не потребує перебудови алгоритму, у цьому разі достатньо оновити вхідні параметри та правила нечіткого висновку. Модель може слугувати ядром цифрового двійника або платформи підтримки прийняття рішень, надаючи менеджерам прозорі аналітичні інструменти для сценарного прогнозування, мінімізації операційних ризиків і зміцнення економічної стійкості підприємства в умовах турбулентного ринку та жорсткої конкуренції.

Ключові слова: генетичний алгоритм, нечітка логіка, управління запасами, економічна безпека, інтелектуальна оптимізація.

Podskrebko Oleksandr, Ivanchenko Nadiia, Kudin Volodymyr, Samokhvalov Yurii. Intelligent model of inventory management based on genetic algorithms and fuzzy logic for improving the economic security of an enterprise

The article presents an intelligent inventory-management model that combines a genetic algorithm with fuzzy logic to enhance the economic security of an industrial enterprise. The genetic algorithm explores a large discrete solution space in search of near-global optima, whereas the fuzzy-logic module converts subjective assessments of supply-

disruption risk into formalized penalties, thereby explicitly accounting for data uncertainty and incompleteness. The model incorporates hard constraints on resources, budget and production capacity, along with tunable soft penalties for product shortages, enabling a balance between cost minimization, contractual fulfilment and supply-chain stability factors that directly influence the enterprise's economic security.

Experimental tests on a demonstration data set (three resource types and two product types) show that, after 60 generations of evolution, the system yields a profit of more than 37 thousand UAH while respecting all constraints and automatically optimizing purchasing and production volumes according to the risk profile. A sensitivity analysis confirms that modest adjustments to penalty weights allow rapid adaptation to strategic scenarios ranging from aggressive growth to conservative austerity.

The proposed approach is readily scalable: adding new resources or products requires only updating the input parameters and fuzzy-inference rules, without restructuring the algorithm. The model can serve as the core of a digital twin or decision-support platform, providing managers with transparent analytical tools for scenario forecasting, operational-risk mitigation and reinforcement of economic resilience in turbulent markets and highly competitive environments.

Keywords: genetic algorithm, fuzzy logic, inventory management, economic security, intelligent optimization.

Вступ. В умовах зростаючої невизначеності, динамічної зміни зовнішніх ринкових впливів, посилення конкуренції та переорієнтації виробничо-логістичних ланцюгів унаслідок інтеграції України у світову економічну систему надзвичайно актуальним стає застосування сучасних інтелектуальних інструментів для підтримки стратегічної стійкості промислових підприємств. Особливої важливості набуває управління запасами як один із ключових чинників забезпечення економічної безпеки підприємства.

У цьому контексті використання генетичних алгоритмів у поєднанні з нечіткою логікою відкриває нові можливості для розв'язання задач оптимізації запасів в умовах невизначеності, неповноти інформації, високих ризиків та мінливих параметрів зовнішнього середовища. Такі підходи дають змогу побудувати адаптивні, гнучкі системи підтримки прийняття рішень, які здатні ефективно реагувати на критичні зміни в ланцюгах постачання та попиту.

Удосконалення систем управління виробничими ресурсами із застосуванням інтелектуальних алгоритмів дає змогу не лише підвищити ефективність операційної діяльності, а й є важливим елементом формування стабільності та підвищення економічної безпеки підприємства у стратегічній перспективі.

Проблемам розроблення та вдосконалення математичних моделей систем управління запасами присвячено роботи таких вітчизняних та зарубіжних учених, як: Т. Росс [1], К. Деб [2], Р. Монцка [3], М. Пішваї [4], В. Крістіянополлер [5], Дж. Дуарте [6], Д. Янг [7], Р. Аккорсі [8], І. Чен [9], О. Лавданська [10], Ф. Аклан [11] та ін.

Але, незважаючи на значний обсяг публікацій, слід зазначити, що питання, пов'язані із застосуванням сучасних інтелектуальних інструментів для підтримки стратегічної стійкості підприємств, які дадуть змогу підвищити ефективність і обґрунтованість прийняття

управлінських рішень в умовах невизначеності, не отримали достатнього розвитку.

Метою статті є розроблення оптимізаційної моделі системи управління запасами, яка ґрунтується на застосуванні генетичних алгоритмів та елементів нечіткої логіки, що дасть змогу підвищити якість прийняття управлінських рішень, удосконалити стратегію управління запасами, оцінити можливі наслідки зриву поставок та сприятиме зміцненню економічної безпеки підприємства.

Результати. Управління запасами є одним із ключових елементів логістичної системи підприємства, що безпосередньо впливає на ефективність виробничих процесів, витрати, рівень обслуговування клієнтів, а також на економічну стійкість та економічну безпеку суб'єкта господарювання. У сучасних умовах високої динаміки попиту, зростаючої нестабільності постачань, геополітичної невизначеності та обмеженої точності вхідної інформації класичні аналітичні методи оптимізації часто виявляються недостатньо гнучкими та малоефективними для забезпечення стабільного функціонування підприємства [3].

Для забезпечення економічної безпеки підприємства зростає практична значущість застосування інтелектуальних підходів, зокрема генетичних алгоритмів та нечіткої логіки, які дають змогу моделювати системи управління запасами з урахуванням невизначеності, неповноти даних і багатокритеріальності прийняття рішень. Генетичні алгоритми забезпечують ефективний пошук наближеного глобального оптимуму у складних, нелінійних просторах рішень, тоді як нечітка логіка дає змогу враховувати експертні оцінки, лінгвістичні змінні та нечіткі правила управління. Синергія цих підходів створює основу для побудови гнучких, адаптивних моделей, здатних підвищити якість управлінських рішень і знизити ризики, пов'язані зі зривами постачання та нерациональним використанням ресурсів [10].

Генетичні алгоритми належать до класу еволюційних стохастичних методів оптимізації, які засновані на принципах природного добору та біологічної еволюції. Зазначений клас методів зарекомендував себе як ефективний інструмент пошуку глобальних екстремумів, який є достатньо ефективним у задачах із великою кількістю змінних, обмежень або сильно нерівномірним ландшафтом цільової функції. Особливістю генетичних алгоритмів є моделювання процесу адаптації популяції рішень до середовища через механізми відбору, схрещування (кросоверу), мутації та оцінювання придатності (fitness). Подібного роду інструменти застосовуються переважно у разі, коли традиційні методи (лінійне програмування, градієнтний спуск) не дають задовільного результату через нелінійність, дискретність або складність цільової функції [2; 9].

Таким чином, у контексті управління запасами та забезпечення економічної безпеки підприємства генетичні алгоритми дають змогу [2; 12]:

- оптимізувати рівень запасів з урахуванням численних чинників (витрати, терміни постачання, попит, обмеження складських площ);

- знаходити наближено оптимальні рішення в умовах нелінійності цільової функції;

- моделювати динамічні та стохастичні процеси без необхідності жорсткої формалізації.

Завдяки гнучкості, масштабованості та здатності працювати з розмитими або частковими даними генетичні алгоритми є потужним інструментом для підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, особливо в таких критичних сферах, як забезпечення економічної безпеки підприємства [9; 13].

У контексті управління запасами, де ключову роль відіграють як виробничо-економічні параметри, так і чинники ризику, виникає потреба у побудові економіко-математичної моделі, що дає змогу враховувати множину обмежень і невизначеностей. З огляду на це, доцільно формалізувати задачу оптимізації, яка враховує витрати, доходи, логістичні та ресурсні обмеження підприємства, а також рівень ризику постачання. Така модель може бути ефективно реалізована за допомогою генетичних алгоритмів у поєднанні з елементами нечіткої логіки [4; 10; 11].

Нижче подано постановку задачі оптимального управління ресурсами з урахуванням ризиків та обмежень, притаманних виробничому процесу. Насамперед уведемо необхідні змінні та параметри моделі.

Позначимо:

x_i – кількість закуплених одиниць ресурсу R_i , де $i = 1, \dots, n$;

y_j – фактична кількість виготовлених одиниць продукції P_j , де $j = 1, \dots, m$;

a_j – кількість одиниць ресурсу R_i , необхідна для виготовлення однієї одиниці продукції з набору P_j ;

u_i, h_i – відповідно ціна закупівлі та вартість зберігання одиниці ресурсу R_i ;

s_i – ціна реалізації одиниці продукції P_j ;

d_i – очікуваний попит на продукцію P_j ;

r_i – рівень ризику зриву постачання ресурсу R_i , де $r \in [0, 1]$;

$p(r)$ – штраф за ризик недопостачання ресурсу R_i , визначений на основі нечіткої логіки. Усього передбачено три рівні [low, medium, high];

γ_j – вартість утраченої вигоди або штраф за дефіцит продукції P_j ;

B – бюджет підприємства, тобто кількість грошових одиниць, передбачених на реалізацію виробничого плану;

S – місткість складу для зберігання закуплених ресурсів;

C – максимальна виробнича потужність, тобто кількість продукції, яку підприємство може виготовити з урахуванням наявних обмежень.

Оскільки головною метою будь-якого економічного об'єкта є отримання прибутку, цілком логічним є формулювання цільової функції оптимізаційної моделі як функції, спрямованої на максимізацію прибутку.

Таким чином, цільова функція має такий вигляд:

$$\max_{x_i, y_j} Z = \sum_{j=1}^m y_j \cdot s_j - \sum_{i=1}^n x_i \cdot (u_i + h_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot u_i \cdot \frac{p_i(r_i)}{100} - \sum_{j=1}^m \gamma_j \cdot \max(0, d_j - y_j).$$

Наведена цільова функція має чотири складники, а саме: дохід від реалізації продукції, витрати, які пов'язані із закупівлею та зберіганням, штраф за ризик постачання, тобто модель почне уникати ризикованих постачальників, навіть якщо вартість ресурсу у інших постачальників вища, а також ураховується штраф за дефіцит продукції, що дає змогу зважувати наслідки дефіциту, тобто незадоволення попиту.

Немаловажним є зазначення обмежень, які становлять один із ключових елементів будь-якої оптимізаційної моделі. Обмеження визначають допустиму область рішень, ураховуючи наявні ресурси, виробничі потужності, логістичні, економічні та технічні чинники.

Таким чином, обмеження запропонованої оптимізаційної такі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m a_{ij} \cdot y_j \leq x_i, \forall i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n x_i \cdot (u_i + h_i) \leq B \\ \sum_{i=1}^n x_i \leq S \\ \sum_{j=1}^m y_j \leq C \\ x_i \geq 0, y_j \geq 0, \forall i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \end{array} \right.$$

Слід звернути увагу, що система обмежень має п'ять складників, а саме: ресурсні обмеження на виробництво, бюджетне обмеження, складське обмеження, обмеження на максимально можливе виробництво продукції та обмеження невід'ємності змінних.

Запропонована математична модель дає змогу чітко формалізувати завдання оптимального управління запасами на підприємстві з урахуванням ризиків зриву поставок та потенційного дефіциту готової продукції, тобто це можна трактувати як репутаційні ризики, можливість втрати клієнтів, недоотриману винагороду. Проте для практичної перевірки, демонстрації працездатності та оцінки ефективності розробленої моделі необхідною є її програмна реалізація. Із цією метою розроблено

демонстраційний приклад коду на мові програмування Python, яка є одним із провідних сучасних інструментів у сфері аналізу даних, оптимізаційного моделювання та машинного навчання.

Для реалізації моделі застосовано як найбільш поширені бібліотеки, такі як Pandas, Numpy, Matplotlib, так і спеціалізовані бібліотеки Python – DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) та Scikit-Fuzzy. Вибір бібліотеки DEAP зумовлений її високою ефективністю, гнучкістю та зручністю для реалізації складних оптимізаційних алгоритмів, зокрема генетичних алгоритмів, які були використані для пошуку оптимального рішення задачі. Scikit-Fuzzy, своєю чергою, є однією з найбільш популярних бібліотек для реалізації нечітких моделей та систем нечіткого виводу, тому саме вона була використана для моделювання невизначеності та ризику поставок ресурсів, що дало змогу адекватно оцінити штрафи у разі зриву поставок через нечітку логіку.

Під час програмної реалізації було враховано можливість двох сценаріїв роботи моделі: з урахуванням дефіциту продукції та без нього. Завдяки використанню гнучкої структури коду користувач має змогу легко змінювати налаштування моделі залежно від реальних умов і завдань. Окрім того, у реалізації враховано

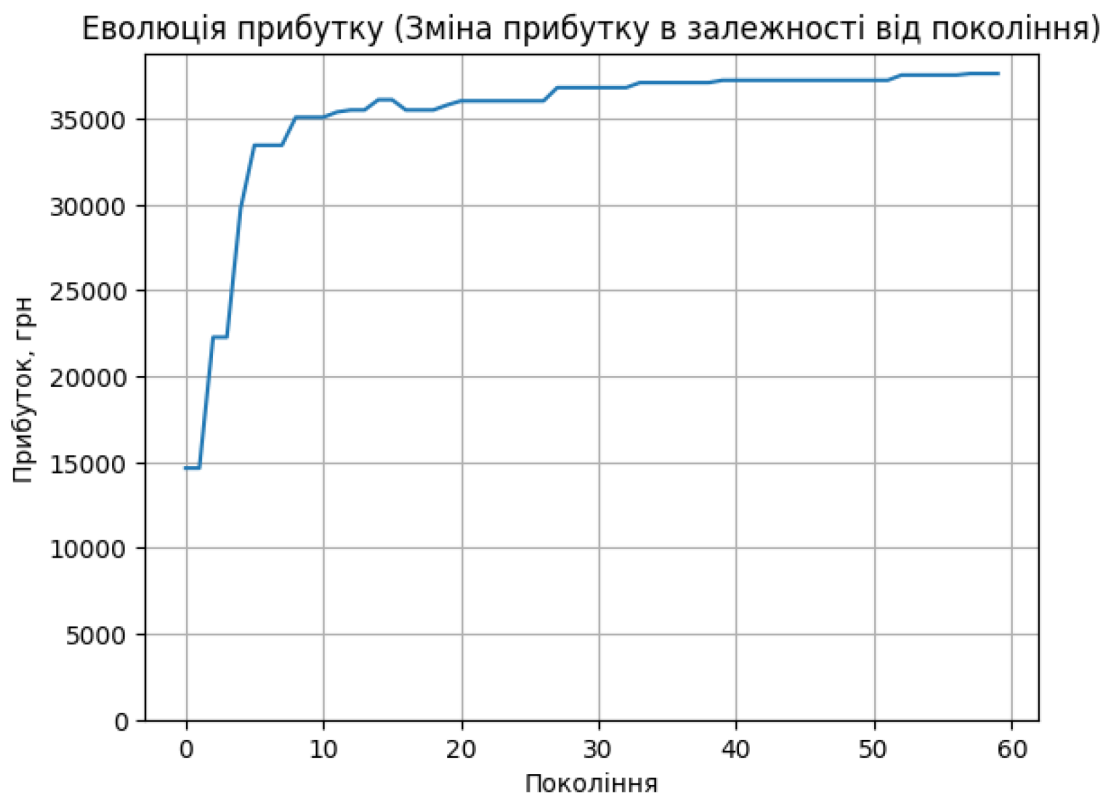


Рис. 1. Результат програмної реалізації запропонованої оптимізаційної моделі

особливості економічних параметрів (ціна закупівлі, ціна продажу, витрати на зберігання), ресурсних обмежень (бюджет, складські потужності, виробнича спроможність) і штрафних санкцій, що робить модель максимально наближеною до реальних умов функціонування сучасних підприємств.

Таким чином, за результатами симуляції роботи запропонованої оптимізаційної моделі, яка передбачала виготовлення двох видів продукції із використанням трьох видів ресурсів, після 60 поколінь генетичного алгоритму було отримано такі результати: оптимальний прибуток становив 37 628,69 грн, необхідний обсяг ресурсів – відповідно 431 од., 248 од. та 316 од., а кількість виготовленої продукції – 127 од. першого виду та 59 од. другого. Водночас слід наголосити, що розроблена модель має гнучкі налаштування, які дають змогу адаптувати її до будь-якої кількості ресурсів і продукції відповідно до реальних потреб підприємства.

Варто підкреслити, що врахування фактору задоволення попиту є принципово важливим аспектом моделі, оскільки дає змогу об'єктивно оцінювати потенційні наслідки дефіциту продукції, такі як репутаційні ризики, утрата клієнтів або недоотриманий прибуток. Проте проведені експерименти показали, що застосовувані штрафні санкції за дефіцит потребують обережного налаштування. Надмірно високі штрафи

можуть значно знизити маржинальність продукції або призвести до її повної відсутності, що негативно позначиться на економічній ефективності запропонованих рішень.

Висновки. Таким чином, у роботі побудовано комплексну математичну модель та досліджено можливості щодо її програмної реалізації. Запропоновано модель управління запасами підприємства враховує ризики і невизначеності поставок ресурсів, а також можливий дефіцит готової продукції. Використання генетичних алгоритмів у поєднанні з нечіткою логікою дало змогу сформулювати гнучке і водночас практично орієнтоване рішення, яке забезпечує високу адаптивність до змін у зовнішньому середовищі та внутрішніх умовах діяльності підприємства.

Практична реалізація моделі підтвердила її працездатність і дала змогу оцінити потенційну економічну ефективність рішень щодо управління запасами. Запропонована модель може бути рекомендована до практичного використання на підприємствах, що прагнуть підвищити рівень економічної безпеки, знизити витрати та мінімізувати ризики господарської діяльності. Подальший розвиток моделі може бути спрямований на деталізацію економічних чинників, розширення сценаріїв застосування, а також інтеграцію додаткових інструментів прийняття управлінських рішень.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ross T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications* (4th edition). Wiley. 2016. 580 p.
2. Deb K. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley. 2001. 536 p.
3. Monczka R. M., Handfield R. B., Giunipero L. C. Patterson J. L. *Purchasing and Supply Chain Management* (6th edition). Cengage Learning. 2015. 888 p.
4. Pishvae M. S., Razmi J. Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8). 2012. 3433–3446 p. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.007>
5. Kristjanpoller W. R., Michell K. V. A stock market risk forecasting model through integration of switching regime, ANFIS and GARCH techniques. *Applied Soft Computing*, Volume 67, 2018. Pages 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.055>
6. Duarte J. J., Montenegro González S., Cruz, J. C. Predicting stock price falls using news data: Evidence from the Brazilian market. *Computational Economics*, 57. (2021). P. 311–340.
7. Yang D., Lu D. Forecasting stock market volatility via causal reasoning *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, 8. 2023. P. 3305–3322 <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.01131>
8. Accorsi R., Manzini R., Maranesi F. A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*. 2014. Volume 65, Issue 1. P. 175–186.
9. Chen Y., Chen H. Analysis and Modeling of Supply Chain Management of Fresh Products Based on Genetic Algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(1). (2022), P. 405–414. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01447-7>
10. Lavdanska O. Нечіткі моделі управління запасами: проблеми, аналіз, розвиток. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. 24–31.
11. Aqlan F., Lam S. A fuzzy-based integrated framework for supply chain risk assessment. *International Journal of Production Economics*. 161. 2015. 54–63. DOI: [10.1016/j.ijpe.2014.11.013](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.013)

12. Gülmez B. GA-Attention-Fuzzy-Stock-Net: An optimized neuro-fuzzy system for stock market price prediction with genetic algorithm and attention mechanism. *Heliyon*, Volume 11, Issue 3. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42393>
13. Lam W. H., Lam W. S., Lee P. F. A Bibliometric Analysis of a Genetic Algorithm for Supply Chain Agility. *Mathematics*. 2024, 12. P. 1199. <https://doi.org/10.3390/math12081199>

REFERENCES:

1. Ross, T. J. (2016). Fuzzy Logic with Engineering Applications (4th edition). Wiley, 580.
2. Deb, K. (2001). Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Wiley, 536.
3. Monczka, R. M., Handfield, R. B., Giunipero, L. C., & Patterson, J. L. (2015). *Purchasing and Supply Chain Management* (6th edition). Cengage Learning, 888.
4. Pishvaei, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433–3446. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.007>
5. Werner Kristjanpoller R., & Kevin Michell V. (2018). A stock market risk forecasting model through integration of switching regime, ANFIS and GARCH techniques, *Applied Soft Computing*, Volume 67, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.055>
6. Duarte, J. J., Montenegro González, S., & Cruz, J.C. (2021). Predicting stock price falls using news data: Evidence from the Brazilian market. *Computational Economics*, 57, 311–340.
7. D. Yang, D. Lu (2023). Forecasting stock market volatility via causal reasoning *Appl. Math. Nonlinear Sci.*, 8, 3305–3322 DOI: <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.01131>
8. Accorsi, R., Manzini, R., & Maranesi, F. (2014) A decision-support system for the design and management of warehousing systems. *Computers in Industry*, Volume 65, Issue 1, 175–186.
9. Chen, Y., & Chen, H. (2022). Analysis and Modeling of Supply Chain Management of Fresh Products Based on Genetic Algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 13(1), 405–414 DOI: <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01447-7>
10. Lavdanska, O. (2012). Nechitki modeli upravlinnya zapasamy: problemy, analiz, rozvytok [Fuzzy inventory management models: problems, analysis, development]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 24–31. [in Ukrainian]
11. Aqlan, Faisal, & Lam Sarah. (2015). A fuzzy-based integrated framework for supply chain risk assessment. *International Journal of Production Economics*. 161. 54–63. 10.1016/j.ijpe.2014.11.013
12. Burak Gülmez (2025). GA-Attention-Fuzzy-Stock-Net: An optimized neuro-fuzzy system for stock market price prediction with genetic algorithm and attention mechanism, *Heliyon*, Volume 11, Issue 3, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42393>
13. Lam, W. H., Lam, W. S., & Lee, P. F. (2024). A Bibliometric Analysis of a Genetic Algorithm for Supply Chain Agility. *Mathematics*, 12, 1199. <https://doi.org/10.3390/math12081199>