

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Факультет інформаційних технологій
(факультет)

Кафедра системного аналізу та управління
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

Здобувача вищої освіти _____ Іванішина Марія Іванівна
академічної групи _____ 124-21-2
спеціальності _____ 124 Системний аналіз
за освітньо-професійною програмою _____ Системний аналіз

на тему: «Розробка системи оцінювання і раціонального вибору постачальників ресурсів для мережі виробничих підприємств»

| Керівники | Прізвище, ініціали | Оцінка за шкалою | | Підпис |
|------------------------------|---|------------------|---------------|--------|
| | | рейтинговою | інституційною | |
| кваліфікаційної роботи | <i>к.т.н., доц. Коряшкіна Л. С.</i> | | | |
| розділів: | 3 | | | |
| Інформаційно- аналітичний | <i>к.т.н., доц. Коряшкіна Л. С.</i> | | | |
| Спеціальний розділ | <i>к.т.н., доц. Коряшкіна Л. С.</i> | | | |
| Рецензент | | | | |
| Нормоконтролер | <i>к.ф.-м.н., доц. Хом'як Т.В.</i> | | | |

Дніпро
2025

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

Системного аналізу та управління
(повна назва)

_____ к.т.н., доц. Желдак Т.А.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«_____» _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ступеня бакалавра

здобувачу вищої освіти Іванішиній М.І. академічної групи 124- 21-2
спеціальності: 124 Системний аналіз

за освітньо-професійною програмою Системний аналіз

на тему «Розробка системи оцінювання і раціонального вибору
постачальників ресурсів для мережі виробничих підприємств»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від
17.05.2025 р. №163-с

| Розділ | Зміст | Терміни виконання |
|--|---|-------------------------|
| 1. Інформаційно-аналітичний розділ | <i>Проаналізувати структуру об'єкта дослідження. Визначити предметну область дослідження та проблему, що розв'язується. Обґрунтувати методи виконання поставлених завдань</i> | 10.01.2025 – 01.03.2025 |
| 2. Спеціальний розділ | <i>Розроблено систему оцінювання та раціонального вибору постачальників на основі реальних логістичних даних із використанням методів CRITIC, SAW, ARAS і GRA-TOPSIS.</i> | 01.03.2025 – 01.05.2025 |
| 3. Експериментально-аналітичний розділ | <i>Провести ранжування постачальників, здійснено порівняльний аналіз методів і визначено трійку найбільш ефективних альтернатив.</i> | 01.05.2025 – 31.05.2025 |

Завдання видано _____

(підпис)

доц. Коряшкіна Л. С.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі: 06.12.2024 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії: 09.06.2025 р.

Прийнято до виконання _____

(підпис студента)

Івнішина М. І.

(прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 57 с., 15 рис., 1 табл., 4 додатки, 28 джерел.

Об'єктом дослідження є процес прийняття рішень щодо вибору постачальників у логістичній системі сучасного виробничого підприємства.

Предмет дослідження – методи багатокритеріального оцінювання постачальників на основі кількісних параметрів ефективності та ризиків.

Метою даної кваліфікаційної роботи є забезпечення об'єктивності і підвищення обґрунтованості рішення про вибір постачальників ресурсів шляхом побудови системи їх ранжування із використанням методів багатокритеріального аналізу.

Методи дослідження: CRITIC, SAW, ARAS і GRA-TOPSIS, принципи програмування на мові Python.

В *інформаційно–аналітичному розділі* наведено аналіз об'єкту дослідження та ключових проблем на ньому. Описано алгоритми реалізації методів багатокритеріального аналізу в контексті вибору постачальників..

У *спеціальному розділі* сформульовано задачу оцінювання постачальників на основі реальних логістичних даних, обґрунтовано вибір семи ключових критеріїв та методу CRITIC для визначення їхніх ваг. Створено програмний модуль для автоматизованого ранжування альтернатив за методами SAW, ARAS і GRA-TOPSIS.

У *експериментально-аналітичному* представлено результати ранжування постачальників за трьома методами, підтверджено узгодженість оцінок і стабільність трійки лідерів.

Практична цінність отриманих результатів роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи для об'єктивного вибору постачальників, що сприяє підвищенню ефективності логістики, зниженню витрат і ризиків. Рішення є масштабованим і придатним для різних галузей.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз, CRITIC, SAW, ARAS, GRA-TOPSIS, постачальники, логістика, Python.

ABSTRACT

Explanatory note: 57 pages, 15 figures, 1 table, 4 appendices, 28 references.

The object of the research is the decision-making process for selecting suppliers in the logistics systems of modern manufacturing enterprises.

The subject of the research is the methodology of multi-criteria supplier evaluation based on quantitative indicators of performance and risk.

The aim of this qualification work is to ensure objectivity and improve the justification of supplier selection decisions by building a system for their ranking using multi-criteria analysis methods.

Research methods: CRITIC, SAW, ARAS, and GRA-TOPSIS, programming principles in Python.

The information-analytical section provides an analysis of the research object and key issues. It also describes the algorithms for implementing multi-criteria analysis methods in the context of supplier selection.

In the special section, the supplier evaluation problem is formulated based on real logistics data, the selection of seven key evaluation criteria is justified, and the CRITIC method is applied to determine their weights. A software module was developed to automate the ranking of alternatives using SAW, ARAS, and GRA-TOPSIS methods.

The experimental-analytical section presents the results of supplier ranking by all three methods, confirms the consistency of evaluations, and highlights the stable top three suppliers.

The practical value of the results lies in the possibility of implementing the developed system for objective supplier selection, contributing to increased logistics efficiency, reduced costs, and risk mitigation. The solution is scalable and suitable for various industries.

Keywords: multi-criteria analysis, CRITIC, SAW, ARAS, GRA-TOPSIS, suppliers, logistics, Python.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ | 8 |
| 1.1 Роль, критерії та класифікація постачальників у логістичних системах 8 | |
| 1.2 Огляд наукової літератури з проблеми розробки системи оцінювання і раціонального вибору постачальників ресурсів для мережі виробничих підприємств..... | 9 |
| 1.3 Методологічні основи вибору постачальників на основі MCDM- підходів..... | 11 |
| 1.3.1 Метод CRITIC | 11 |
| 1.3.2 Метод ARAS | 13 |
| 1.3.3 Метод SAW | 15 |
| 1.3.4 Метод GRA-TOPSIS | 16 |
| Висновок до розділу 1 | 21 |
| РОЗДІЛ 2. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ | 22 |
| 2.1 Характеристика вхідних даних | 22 |
| 2.2 Постановка задачі | 23 |
| 2.3 Обґрунтування включення параметрів до моделі в якості критеріїв | 26 |
| 2.4 Вибір програмного середовища та особливості реалізації | 27 |
| Висновок до розділу 2..... | 31 |
| РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ | 32 |
| 3.1 Визначення ваг критеріїв методом CRITIC..... | 32 |
| 3.2 Ранжування постачальників методами SAW та ARAS | 33 |
| 3.3 Ранжування постачальників методом GRA-TOPSIS | 35 |
| 3.4 Аналіз і порівняння результатів..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Висновок до розділу 3..... | 42 |
| ВИСНОВКИ | 43 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 45 |
| ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи | 48 |
| ДОДАТОК Б. Відгук керівника кваліфікаційної роботи | 49 |
| ДОДАТОК В. Блоксхема GRA-TOPSIS-методу..... | 50 |
| ДОДАТОК Г. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ | 51 |

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах глобалізації, нестабільності ринку та зростання вимог до ефективності логістичних процесів, особливого значення набуває раціональне управління ланцюгами постачання. Для виробничих підприємств своєчасне та надійне забезпечення ресурсами є ключовою умовою стабільної роботи, зниження витрат і підтримки конкурентних переваг.

Вибір постачальників на основі багатьох взаємопов'язаних факторів потребує застосування обґрунтованих підходів до прийняття рішень. Саме тому актуальним є використання математичних методів багатокритеріального аналізу, які забезпечують об'єктивність, прозорість і адаптивність вибору. Застосування інструментів програмної реалізації на базі Python дозволяє автоматизувати оцінювання, підвищити точність розрахунків та адаптувати систему до реальних виробничо-логістичних задач.

Задання. Побудова автоматизованої системи оцінювання постачальників на основі реального набору даних, що включає обґрунтування вибору релевантних критеріїв, розрахунок їхньої вагомості методом CRITIC, а також застосування багатокритеріальних методів SAW, ARAS і GRATOPSIS для ранжування альтернатив. Отримані результати буде зіставлено для оцінки узгодженості методів та обґрунтованого вибору постачальників.

Метою даної кваліфікаційної роботи є забезпечення об'єктивності і підвищення обґрунтованості рішення про вибір постачальників ресурсів шляхом побудови системи їх ранжування із використанням методів багатокритеріального аналізу.

Об'єктом дослідження є процес прийняття рішень щодо вибору постачальників у логістичній системі сучасного виробничого підприємства.

Предмет дослідження – методи багатокритеріального оцінювання постачальників на основі кількісних параметрів ефективності та ризиків.

Методи дослідження. У роботі використано метод CRITIC для визначення ваг критеріїв на основі внутрішньої варіативності та кореляційної залежності між показниками, методи SAW та ARAS для багатокритеріального ранжування альтернатив, а також GRA-TOPSIS з використанням експертних оцінок, синхронізованих із результатами CRITIC. Обчислювальні операції та візуалізацію результатів реалізовано мовою Python із використанням відповідних бібліотек: pandas, numpy, matplotlib.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні автоматизованої моделі оцінювання постачальників, яка поєднує різні методи багатокритеріального аналізу в єдиному середовищі Python. Запропоновано адаптований підхід до застосування експертних ваг без залучення самих експертів, що підвищує об'єктивність і практичність рішення.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої системи у виробничих компаніях для об'єктивного оцінювання постачальників, підвищення ефективності управління постачанням, зниження витрат, мінімізації ризиків та забезпечення стабільності логістичного ланцюга. Рішення є масштабованим і може бути адаптоване для підприємств різних галузей.

РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Роль, критерії та класифікація постачальників у логістичних системах

Постачальники відіграють ключову роль у формуванні ефективної системи матеріального забезпечення підприємства, оскільки саме вони впливають на стабільність виробничого циклу, витрати та якість продукції. У контексті логістичних систем постачальник виступає не лише джерелом сировини, комплектуючих або послуг, а й повноцінним стратегічним партнером, що забезпечує адаптивність і конкурентоспроможність підприємства [1].

Сутність постачальницької функції полягає в безперебійному, своєчасному та якісному задоволенні потреб підприємства у матеріальних ресурсах. Наявність надійного постачальника дозволяє мінімізувати виробничі простої, зменшити витрати на запасання та транспортування, а також підвищити гнучкість виробництва [2, с. 106–108].

Згідно з Feldmann & Olhager, ступінь доступності та якість логістичної інформації, що передається від постачальника, безпосередньо впливають на ефективність операційного планування та контролю [3].

У сучасних умовах постачальники мають відповідати не лише традиційним вимогам щодо ціни, якості й термінів, а й критеріям екологічної відповідальності, цифрової сумісності (наприклад, EDI/ERP-системи), стійкості до ризиків та участі в інноваціях [4]. Також підприємства все частіше будують довгострокові партнерства, орієнтовані на спільне створення цінності.

1.2 Огляд наукової літератури з проблеми розробки системи оцінювання і раціонального вибору постачальників ресурсів для мережі виробничих підприємств

Проблема вибору постачальників ресурсів є однією з центральних у сучасному управлінні ланцюгами постачання. Вибір впливає не лише на витрати й якість продукції, а й на гнучкість, інноваційність, стійкість до ризиків та загальну конкурентоспроможність підприємства. Наукова література пропонує широкий спектр моделей, від простих експертних оцінок до складних гібридних підходів на базі багатокритеріального прийняття рішень (MCDM).

Одним із найпростіших і водночас популярних методів є SAW (Simple Additive Weighting), який ґрунтується на нормалізації показників та обчисленні зважених сум. Цей метод зручно реалізовувати, особливо у випадках, коли вже відомі ваги критеріїв. У роботі Jaberidoost et al. [12, с. 210–211] було продемонстровано застосування SAW у фармацевтичному секторі, а у праці Akdemir & Şimşek [12, с. 206–209] запропоновано поєднання SAW з методом CRITIC, що дозволяє об'єктивно обчислити ваги критеріїв на основі варіаційності та кореляційної незалежності.

Для врахування нечіткої або неповної інформації активно застосовується GRA (Grey Relational Analysis), який оцінює ступінь подібності між критеріями та ідеальним рішенням. У поєднанні з методом TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) формується гібридна модель GRA-TOPSIS, яка дозволяє одночасно врахувати сірі коефіцієнти та відстані до ідеального/антиідеального рішень. У статті Stević et al. [25, с. 14–17] наведено докладну реалізацію такого підходу з використанням реальних логістичних даних.

Ще один ефективний інструмент – ARAS (Additive Ratio Assessment), який порівнює альтернативи відносно оптимальної. У праці Akdemir & Şimşek

[12, с. 209] ARAS використовується для оцінки фінансової ефективності компанії на основі зваженої нормалізованої матриці.

Варто також зазначити, що в умовах високої невизначеності сучасного середовища особливої популярності набувають гібридні моделі, які комбінують суб'єктивні (експертні) та об'єктивні (статистичні) джерела даних [3, с. 2; 25, с. 2]. Зокрема, у статті [21, с. 11с] запропоновано поєднання FMEA, GRA та TOPSIS для оцінювання ризиків у сфері переробки електронних відходів, що може бути релевантним і для оцінки екологічної складової вибору постачальників.

Окремо варто згадати про методи на основі аналізу ризиків, зокрема FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Традиційно цей метод використовує експертні шкали «ймовірність», «наслідки» та «виявлення». У сучасних дослідженнях [3, с. 3–4] пропонується перехід до data-driven FMEA, де ці показники автоматично формуються на основі історичних логістичних даних, таких як частота дефектів, витрати та час постачання. Це дозволяє значно підвищити об'єктивність оцінки ризику.

У більш загальному контексті література також розглядає такі методи, як:

- ANP (Analytic Hierarchy Process) – для побудови ієрархії критеріїв та експертного визначення ваг;
- ANP (Analytic Network Process) – для врахування взаємозв'язків між критеріями;
- EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution) – як альтернатива TOPSIS з фокусом на середнє значення;
- VIKOR – як компромісний метод з балансом між максимізацією корисності та мінімізацією відхилень.

Загалом, тенденції наукових публікацій останніх років свідчать про зростаючу популярність гібридних підходів, які поєднують об'єктивні та суб'єктивні джерела ваг, класичні алгоритми й алгоритми нечіткої логіки,

експертні оцінки й машинне навчання. Це дозволяє формувати адаптивні системи підтримки прийняття рішень у реальному бізнес-середовищі.

1.3 Методологічні основи вибору постачальників на основі MCDM-підходів

У сучасних умовах глобалізації та високої конкуренції ефективний вибір постачальників ресурсів є одним із ключових чинників стабільності та прибутковості виробничих підприємств. У зв'язку з наявністю великої кількості взаємозалежних критеріїв, які характеризують постачальників, задача їх оцінювання та відбору набуває форми багатокритеріальної проблеми. Одним з найбільш доцільних підходів до її вирішення є застосування методів багатокритеріального прийняття рішень (MCDM – Multi-Criteria Decision Making). Ці методи дозволяють об'єктивно враховувати як кількісні, так і якісні показники, забезпечуючи прозоре й обґрунтоване ранжування альтернатив. У цьому підрозділі розглянуто теоретичні та прикладні аспекти застосування MCDM-підходів до задачі вибору постачальників.

1.3.1 Метод CRITIC

Ваги критеріїв можуть визначатися за допомогою різних підходів: суб'єктивних, об'єктивних або комбінації обох. Значення ваг можуть залежати як від властивостей самих критеріїв, так і від суб'єктивних суджень учасників процесу прийняття рішень. Оскільки такі суб'єктивні оцінки можуть призводити до упереджених результатів, у літературі були запропоновані методи, які забезпечують об'єктивну оцінку.

Одним із таких методів є метод CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation), запропонований Diakoulaki та ін. (1995). Цей метод дозволяє об'єктивно визначити вагу кожного критерію, використовуючи

інформацію про кореляцію між критеріями та їх стандартне відхилення [12, с. 206–207].

Процедура визначення вагових коефіцієнтів включає наступні етапи:

Крок 1: Формується матриця рішень, що містить n критеріїв оцінювання та m альтернатив.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (1.1)$$

Крок 2: Кожен критерій у матриці нормалізується залежно від його типу:

- Для вигідних критеріїв (benefit) використовується формула (1.2):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad (1.2)$$

- Для витратних критеріїв (cost) використовується формула (1.3):

$$r_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, \quad (1.3)$$

Крок 3: Обчислюються коефіцієнти кореляції між парами критеріїв за формулою (1.4), що дозволяє оцінити ступінь їх взаємної залежності.

$$p_{ik} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j) \cdot (r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}}; j, k = 1, \dots, n, \quad (1.4)$$

Крок 4: Обчислюється значення c_j , яке характеризує інформаційну значущість кожного критерію.

$$c_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - p_{jk}); j = 1, \dots, n, \quad (1.5)$$

де σ_j – стандартне відхилення критерію j , що обчислюється за формулою (1.6).

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}; i = 1, \dots, m, \quad (1.6)$$

Крок 5: Розраховуються ваги критеріїв w_j за формулою (1.7):

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j}; j = 1, \dots, n, \quad (1.7)$$

У такому випадку критерій з найвищим значенням c_j вважається найбільш значущим відносно інших.

1.3.2 Метод ARAS

Метод ARAS був запропонований Zavadskas і Turskis у 2010 році. Його головна ідея полягає у порівнянні значень корисності альтернатив із оптимальним значенням, яке або задається експертом, або визначається автоматично на основі типу критеріїв [12, с. 209].

Метод складається з таких етапів:

Крок 1. Формування матриці рішень

Як і в інших MCDM-методах, спочатку формується матриця рішень, яка складається з m альтернатив та n критеріїв. Значення x_{ij} вказують на ефективність альтернативи i за критерієм j .

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0n} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}; i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (1.8)$$

Якщо оптимальні значення не задані, вони визначаються автоматично:

- для вигідних критеріїв (benefit) – за максимумом (формула 1.9);

$$x_{0j} = \max_i x_{ij}; i = 0, 1, \dots, m; j = 1, \dots, n, \quad (1.9)$$

- для витратних критеріїв (cost) – за мінімумом (формула 1.10).

$$x_{0j} = \min_i x_{ij}; i = 0, 1, \dots, m; j = 1, \dots, n, \quad (1.10)$$

Крок 2. Нормалізація

Всі значення в матриці перетворюються до інтервалу $[0;1]$:

- для вигідних критеріїв:

$$\overline{x_{ij}} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, \quad (1.11)$$

- для витратних критеріїв:

$$\overline{x_{ij}} = \frac{\frac{1}{x_{ij}}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{x_{ij}}}, \quad (1.12)$$

Крок 3. Врахування ваг критеріїв

Використовуючи ваги, наприклад, отримані за методом CRITIC, формується зважена нормалізована матриця за формулою (1.13):

$$x_{ij} = \overline{x_{ij}} \cdot w_j, \quad (1.13)$$

Крок 4. Обчислення значень оптимальності

Для кожної альтернативи i обчислюється загальна корисність:

$$S_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (1.14)$$

Найкраща альтернатива – та, яка має найбільше значення S_i , найгірша – з найменшим.

Крок 5. Розрахунок ступеня корисності

Визначається відносна ефективність кожної альтернативи:

$$K_i = \frac{S_i}{S_0}, \quad (1.15)$$

де S_0 – максимальне значення S_i серед усіх альтернатив. Ранжування здійснюється за спаданням K_i : чим більше значення – тим краща альтернатива (формула 1.15).

1.3.3 Метод SAW

Метод SAW є одним із найпростіших у реалізації методів багатокритеріального прийняття рішень. У літературі він також відомий як метод оцінювання за зваженою сумою або лінійна комбінація оцінок [12, с. 210]. Він базується на використанні нормалізованих значень критеріїв та відповідних ваг, які можуть бути отримані з інших методів, наприклад CRITIC, АНР, експертного опитування тощо.

У рамках цього дослідження для визначення вагових коефіцієнтів оцінювання постачальників було свідомо обрано метод CRITIC (CRiteria Importance Through Intercriteria Correlation), а не використання експертних оцінок. Це рішення зумовлене кількома ключовими міркуваннями:

По-перше, експертні оцінки є суб'єктивними за своєю природою, що робить результати вразливими до впливу людського чинника, особистого досвіду чи обмежень окремих фахівців. Метод CRITIC, навпаки, забезпечує об'єктивне визначення важливості критеріїв шляхом поєднання інформаційної значущості (дисперсії значень) і взаємозалежності між критеріями (кореляції).

По-друге, саме такий підхід застосовано в дослідженні *Akdemir, Şimşek*, [27], де аналіз фінансової ефективності компанії Amazon.com, Inc. проводився за допомогою гібридної MCDM-моделі. Автори відзначають, що використання CRITIC дозволяє відмовитися від експертного втручання й ґрунтуватися виключно на статистичних властивостях даних, що підвищує надійність та відтворюваність результатів. У зазначеній роботі ваги критеріїв, отримані за методом CRITIC, були інтегровані в методи SAW, ARAS та COPRAS як ключовий елемент зваженої оцінки SAW.

Таким чином, використання методу CRITIC у цьому дослідженні дозволяє забезпечити більш об'єктивну, математично обґрунтовану та повторювану оцінку альтернатив, що є особливо важливим у умовах недостатньої доступності кваліфікованих експертів або потреби в автоматизованій оцінці постачальницьких рішень.

Крок 1. Формування матриці рішень за формулою (1.1).

Крок 2. Нормалізація

Всі значення нормалізуються залежно від типу критерію:

- для вигідних критеріїв:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max X_{ij}}, \quad (1.16)$$

- для витратних критеріїв:

$$r_{ij} = \frac{\min X_{ij}}{X_{ij}}, \quad (1.17)$$

Крок 3. Коефіцієнти ваг, отримані методом CRITIC, використовуються для застосування методу SAW, і на основі рівняння (1.18) формується зважена матриця рішень.

Кожне нормалізоване значення множиться на вагу критерію:

$$W_i \cdot r_{ij}, \quad (1.18)$$

Крок 4. Обчислення зваженої суми

Альтернатива з найвищим S_i вважається найефективнішою. Всі альтернативи ранжуються за спаданням цього значення.

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot r_{ij}, \quad (1.19)$$

1.3.4 Метод GRA-TOPSIS

У сучасних умовах логістичного управління прийняття ефективних рішень потребує урахування багатьох суперечливих критеріїв. Саме тому методи багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) стають основою для побудови моделей оцінювання постачальників. Одним з таких методів є інтегрована модель GRA-TOPSIS, яка поєднує точність геометричного підходу TOPSIS з гнучкістю методу сірої кореляції GRA.

Метод TOPSIS оцінює альтернативи шляхом вимірювання відстані до ідеальних рішень. Проте, коли відстані до позитивно-ідеального та негативно-ідеального рішень є однаковими, метод стає неспроможним розрізнити

переваги альтернатив. Натомість метод сірої кореляції (GRA) аналізує тенденції зміни між альтернативами, дозволяє впорядковувати варіанти та встановлювати взаємозв'язки між фізичними прототипами. Водночас GRA має обмеження: він аналізує лише подібність між альтернативами за тим самим ідеальним фактором, що обмежує його універсальність у задачах прийняття рішень.

З огляду на переваги і недоліки обох методів, у роботі запропоновано інтегровану модель оцінювання постачальників логістичних послуг, що поєднує GRA і TOPSIS. Алгоритм моделі складається з наступних етапів:

Крок 1. Побудова матриці рішень

Формується матриця рішень, де кожен елемент відображає значення критерію j для альтернативи i .

Крок 2. Визначення ваг критеріїв та побудова зваженої матриці

Методи визначення ваги кожного показника включають суб'єктивний метод, об'єктивний метод і комбінований суб'єктивно-об'єктивний метод.

Суб'єктивні методи оцінювання включають метод аналізу ієрархій (АНР) та експертну оцінку, які обмежені уподобаннями осіб, що приймають рішення, їх когнітивним рівнем та досвідом. Серед поширених методів об'єктивного призначення ваг виділяють метод ентропії інформації, метод відхилень і метод нормального розподілу. Вони краще зберігають об'єктивність інформації для прийняття рішень, проте можуть нехтувати суб'єктивною упередженістю осіб, що приймають рішення.

З огляду на переваги та недоліки суб'єктивного й об'єктивного підходів і з метою підвищення надійності вагових коефіцієнтів, зазвичай застосовується їх комбінація.

У науковій роботі для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв використано об'єктивні підходи. Суб'єктивна вага критерію $\bar{\lambda}_j$ задається на основі експертного оцінювання або пріоритетів особи, що приймає рішення (у нашому випадку CRITIC). Такий підхід дозволяє врахувати практичний досвід

і фахові знання експертів, однак може бути схильним до упереджень (формула не подається, оцінка задається напряму).

Об'єктивна вага $\bar{\lambda}_j$ розраховується з використанням методу інформаційної ентропії, що дозволяє визначити ступінь впорядкованості інформації для кожного критерію на основі статистичного розподілу значень. Ентропія критерію j визначається за формулою:

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m c_{ij} \ln c_{ij}, \quad (1.20)$$

Відповідно, ентропійна (об'єктивна) вага визначається як:

$$\bar{\lambda}_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^n (1-H_j)}, \quad (1.21)$$

Комплексна вага λ_j (об'єднання суб'єктивної та об'єктивної) розраховується за формулою:

$$\lambda_j = \frac{\bar{\lambda}_j \lambda_j}{\sum_{j=1}^n \bar{\lambda}_j \lambda_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1.22)$$

Використання такої комбінованої моделі дозволяє поєднати об'єктивність статистичних даних із практичною значущістю експертних суджень, забезпечуючи більш обґрунтоване формування зваженої матриці рішень.

Крок 3. Побудова зваженої матриці рішень.

На основі отриманих ваг формується зважена матриця рішень

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix}; \quad d_{ij} = w_j c_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1.23)$$

Крок 4. Визначення позитивно-ідеального та негативно-ідеального рішень

$$d^+ = (d_1^+, d_2^+, \dots, d_m^+), \quad (1.24)$$

$$d^- = (d_1^-, d_2^-, \dots, d_m^-), \quad (1.25)$$

$$\text{Де } \begin{cases} d_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} d_{ij} \\ d_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} d_{ij} \end{cases};$$

Крок 5. Обчислення евклідових відстаней

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij} - d_j^+)^2}, \quad (1.26)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij} - d_j^-)^2}, \quad (1.27)$$

Крок 6. Обчислення коефіцієнта сірої кореляції кожного плану (альтернативи) відносно ідеального плану: $R = [r_{ij}]_{x \times m}$, де $\rho = 0,5$:

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_i \max_j |d_j^+ - d_{ij}| + \rho \max_i \max_j |d_j^+ - d_{ij}|}{|d_j^+ - d_{ij}| + \rho \max_i \max_j |d_j^+ - d_{ij}|}, \quad (1.28)$$

$$r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |d_j^- - d_{ij}| + \rho \max_i \max_j |d_j^- - d_{ij}|}{|d_j^- - d_{ij}| + \rho \max_i \max_j |d_j^- - d_{ij}|}, \quad (1.29)$$

Крок 7. Обчислення середнього коефіцієнта сірої релевантності

$$g_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^+, \quad (1.30)$$

$$g_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^-, \quad (1.31)$$

Крок 8. Нормалізація відстаней і коефіцієнтів кореляції:

$$D_i^+ = \frac{d_i^+}{\max d_i^+} \quad D_i^- = \frac{d_i^-}{\max d_i^-}, \quad (1.32)$$

$$G_i^+ = \frac{g_i^+}{\max r_i^+} \quad G_i^- = \frac{g_i^-}{\max r_i^-}, \quad (1.33)$$

Крок 9. Обчислення коефіцієнтів близькості TOPSIS і GRA:

$$C_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad (1.34)$$

$$Q_i^+ = \frac{G_i^-}{G_i^+ + G_i^-}, \quad (1.35)$$

$$T_i^+ = \eta C_i^+ + (1 - \eta) Q_i^+, \quad (1.36)$$

де параметр $\eta \in [0,1]$ визначається на розсуд аналітика: наприклад, $\eta=0.5$ забезпечує рівну вагу обом підходам. [18]

Крім того, у додатку В представлено блок-схему запропонованого підходу, що використовується для розв'язання задачі багатокритеріального прийняття рішень комбінованим методом GRA-TOPSIS.

Комбінація методів CRITIC, SAW, ARAS і GRA-TOPSIS забезпечує гнучкий і обґрунтований підхід до задачі вибору постачальника. Метод CRITIC дозволяє виключити суб'єктивність при визначенні ваг і враховує не лише варіативність критеріїв, а й їхню взаємну кореляцію. SAW і ARAS є легко реалізованими і прозорими методами з хорошою інтерпретованістю результатів, що особливо важливо для прийняття управлінських рішень. Водночас GRA-TOPSIS як інтегрована модель дає змогу поєднати переваги двох різних підходів: геометричного (TOPSIS) та аналітико-інформаційного (GRA), що забезпечує стійкість і точність ранжування альтернатив навіть за умов невизначеності.

Таким чином, застосування зазначених методів у сукупності дозволяє здійснити повноцінну, багатогранну оцінку постачальників з урахуванням різних аспектів: економічних, логістичних, якісних і ризикових. Це забезпечує надійність прийнятого рішення і підвищує обґрунтованість вибору найкращої альтернативи.

Висновок до розділу 1

У першому розділі було обґрунтовано актуальність і складність задачі вибору постачальників у логістичних системах, а також проаналізовано сучасні підходи до її розв'язання. У результаті аналізу літературних джерел встановлено, що найбільш ефективними є багатокритеріальні методи оцінювання (MCDM), які дозволяють враховувати широкий спектр економічних, технологічних та якісних показників. Серед них окрему увагу приділено методам CRITIC, SAW, ARAS і GRA–TOPSIS, які відзначаються як високою об'єктивністю, так і можливістю інтеграції суб'єктивних експертних оцінок.

РОЗДІЛ 2. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Характеристика вхідних даних

У межах дослідження використано відкритий набір даних, опублікований на платформі Kaggle, який стосується ланцюга постачання косметичних продуктів стартапу в галузі Fashion & Beauty. Дані охоплюють ключові етапи переміщення товару від постачальників до кінцевих споживачів, що дозволяє комплексно аналізувати ефективність постачальницької мережі.

До характеристик (ознак), представлених у наборі даних, належать:

- Product Type – категорія товару;
- SKU – унікальний ідентифікатор товарної позиції;
- Price – ціна одиниці продукції;
- Availability – доступність товару на складі;
- Number of products sold – кількість реалізованої продукції;
- Revenue generated – отриманий дохід;
- Customer demographics – демографічна інформація про клієнтів;
- Stock levels – рівень залишків на складі;
- Lead times – час виконання замовлення;
- Order quantities – обсяги замовлень;
- Shipping times – терміни доставки;
- Shipping carriers – перевізники;
- Shipping costs – вартість доставки;
- Supplier name – назва постачальника;
- Location – розташування постачальника;
- Lead time – загальний час постачання;
- Production volumes – обсяги виробництва;
- Manufacturing lead time – тривалість виробничого циклу;

- Manufacturing costs – витрати на виробництво;
- Inspection results – результати контролю якості;
- Defect rates – рівень браку;
- Transportation modes – вид транспортування;
- Routes – маршрути постачання;
- Costs – загальні витрати, пов'язані з логістикою.

На рисунку 2.1 нижче наведено фрагмент початкового датасету, отриманого з платформи Kaggle, що використовується в межах дослідження. Таблиця містить ключові змінні, пов'язані з постачанням косметичної продукції: інформацію про товар, обсяги продажів, дохід, строки доставки, дефектність, витрати, географію постачання тощо. Саме з цього масиву даних були відібрані релевантні змінні для побудови матриці рішень у процесі багатокритеріального аналізу.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Product type,SKU,Price,Availability,Number of products sold,Revenue generated,Customer demographics,Stock levels,Lead times,Order quantities,Shipping times,Shipping carriers,Shipping costs,Supplier name,Loca | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | haircare,SKU0,69.80800554211577,55,802,8661.996792392383,Non-binary,58,7,96,4,Carrier B,2.9565721394,0807,Supplier 3,Mumbai,29,215,29,46.27987924050832,Pending,0.22641036084992516,Road,Route 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | skincare,SKU1,14.843523275084339,95,736,7460.900065445849,Female,53,30,37,2,Carrier A,9.7165477143131,Supplier 3,Mumbai,23,517,30,33.61676895373,Pending,4.854068026388706,Road,Route B,503.065 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | haircare,SKU2,11.31968293090566,34,8,9577.74962586873,Unknown,1,10,88,2,Carrier B,8.054479261732155,Supplier 1,Mumbai,12,971,27,30.688019348284204,Pending,4.580592619199229,Air,Route C,141.92 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | skincare,SKU3,61.163343016437736,68,83,7766.836425688233,Non-binary,23,13,59,6,Carrier C,1.7295685635434288,Supplier 5,Kolkata,24,937,18,35.624741397112503,Fail,4.74664862064775,Rail,Route A,254.77 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | skincare,SKU4,4.805496036345893,26,871,2686.505151567447,Non-binary,5,3,56,8,Carrier A,3.8905479158706715,Supplier 1,Delhi,5,414,3,92.06516059871285,Fail,3.145579522833002,Air,Route A,923.4406317 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | haircare,SKU5,1.6999760138659377,87,147,2828.348745975759,Non-binary,90,27,66,3,Carrier B,4.444098864382293,Supplier 4,Bangalore,10,104,17,56.7664755574318,Fail,2.7791935115711617,Road,Route A,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | skincare,SKU6,4.07832863107945,48,65,7823.476559531737,Male,11,15,58,8,Carrier C,3.8807633029520034,Supplier 3,Kolkata,14,314,24,1.0850685695870688,Pending,1.0009106193041357,Sea,Route A,134.3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | cosmetics,SKU7,42.95838438246007,59,426,8496.103813089838,Female,93,17,11,1,Carrier B,2.3483387844177805,Supplier 4,Bangalore,22,564,1,99.46610860359912,Fail,0.3981771868506506,Road,Route C,802 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | cosmetics,SKU8,68.7179674852733,78,150,7517.363210631127,Female,5,10,15,7,Carrier C,3.4047338570830266,Supplier 4,Mumbai,13,769,8,11.423027139565695,Pending,2.7098626911099615,Sea,Route B,50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | skincare,SKU9,64.01573294127854,35,980,4971.145987585558,Unknown,14,27,83,1,Carrier A,7.166645291048216,Supplier 2,Chennai,29,963,23,47.95760163495158,Pending,3.844614478767585,Rail,Route B,995 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | skincare,SKU10,15.707795681912138,11,996,2330.965802091949,Non-binary,51,13,80,2,Carrier C,8.673211211278613,Supplier 5,Kolkata,18,830,5,96.52735278531091,Pass,1.7273139283559424,Road,Route B,8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | skincare,SKU11,90.63545998228867,95,960,6099.944115581452,Female,46,23,60,1,Carrier A,4.523943124316663,Supplier 2,Kolkata,28,362,11,27.592363086663696,Pending,0.02116982137299439,Air,Route A,12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | haircare,SKU12,71.21338907536008,41,336,2873.7414460214413,Unknown,100,30,85,4,Carrier A,1.325274010184522,Supplier 4,Kolkata,3,563,3,32.32128621342403,Fail,2.1612537475559117,Road,Route B,402. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | skincare,SKU13,16.160393317379977,5,249,4052.7384162378667,Male,80,8,48,9,Carrier A,9.537283061108338,Supplier 5,Bangalore,23,173,10,97.82905010117327,Pending,1.6310742300715386,Road,Route B,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | skincare,SKU14,99.17132863862419,26,562,8653.570926469802,Non-binary,54,29,78,5,Carrier B,2.0397701894493316,Supplier 1,Kolkata,25,558,14,5.791436629862989,Pending,0.10068285156509371,Air,Route | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | skincare,SKU15,36.98924492862691,94,469,5442.086785397673,Non-binary,8,9,69,7,Carrier B,2.4220397232752044,Supplier 1,Bangalore,14,580,7,97.12128175147431,Pass,2.264405761198549,Sea,Route B,127. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | skincare,SKU16,7.547172109791272,74,280,6453.797968176285,Female,2,5,78,1,Carrier B,4.191324585705502,Supplier 1,Bangalore,3,399,21,17.10634249785001,Pass,1.012563089258049,Air,Route A,865.52577 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | cosmetics,SKU17,81.46253436923702,82,126,2629.396434845262,Female,45,17,85,9,Carrier C,3.585418958232342,Supplier 1,Chennai,7,453,16,47.679680368355335,Fail,0.10202075491817619,Air,Route C,670.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | haircare,SKU18,36.443627770460935,23,620,9364.673505076173,Unknown,10,10,46,8,Carrier C,4.339224714110709,Supplier 2,Kolkata,18,374,17,27.1079805484392,Pending,2.2319391107292637,Sea,Route A,4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | skincare,SKU19,51.12387008796474,100,187,2553.495584991215,Unknown,48,11,94,3,Carrier A,4.742635882841877,Supplier 4,Chennai,20,694,16,82.37332058799021,Fail,3.6464508654170293,Road,Route C,47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | skincare,SKU20,96.34107243996338,22,320,8128.027696851192,Unknown,27,12,68,6,Carrier A,8.87833465092684,Supplier 1,Chennai,29,309,6,65.68625960848863,Pass,4.231416573534539,Air,Route B,493.8712 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | cosmetics,SKU21,84.89386898495083,60,601,7087.052696357437,Unknown,69,25,7,6,Carrier B,6.037883769218298,Supplier 5,Chennai,19,791,4,61.73572895416093,Pending,0.0186075676310149,Air,Route C,52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | haircare,SKU22,27.67978088650196,55,884,2390.8078665561734,Unknown,71,1,63,10,Carrier A,2.924857601145554,Supplier 5,Kolkata,11,568,29,98.60995724270387,Fail,2.59125473211116,Rail,Route C,205.57 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | cosmetics,SKU23,4.324341185864164,30,391,8858.367571011484,Unknown,84,5,29,7,Carrier A,2.924857601145554,Supplier 5,Kolkata,11,568,29,98.60995724270387,Pending,1.3422915627227339,Rail,Route A,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | haircare,SKU24,4.156308359311108,32,209,9049.077860939897,Male,4,26,2,8,Carrier C,9.741291689284369,Supplier 2,Bangalore,28,447,3,40.382359702924816,Pending,3.691310292628728,Air,Route A,758.724 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | haircare,SKU25,39.629943985092625,73,142,2174.777054350654,Male,82,11,52,3,Carrier C,2.231073681281728,Supplier 4,Kolkata,19,934,23,78.28038311841539,Pending,3.797231211714183,Road,Route B,458. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | haircare,SKU26,97.44694661789282,9,353,3716.493325894037,Male,59,16,48,4,Carrier B,6.507548621078551,Supplier 2,Bangalore,26,171,4,15.972229757181761,Pass,2.119319736724923,Rail,Route A,617.8669 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | cosmetics,SKU27,92.55736081240202,42,352,2686.4572235759833,Unknown,47,9,62,8,Carrier B,7.406759052998074,Supplier 5,Mumbai,25,291,4,10.528245070042162,Fail,2.864667837883373,Sea,Route B,762. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | skincare,SKU28,2.397274705597141,12,394,6117.324615083992,Female,48,15,24,4,Carrier B,8.100973145397031,Supplier 1,Kolkata,16,329,7,39.2928758606575,Pass,3.878098936588488,Road,Route B,764.935 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | cosmetics,SKU29,63.44755918520733,3,253,8318.903194617178,Female,45,5,67,7,Carrier B,8.100973145397031,Supplier 1,Kolkata,16,329,7,39.2928758606575,Pass,3.878098936588488,Road,Route B,764.935 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | haircare,SKU30,8.02285910526393,10,327,2766.34236866089,Male,60,26,35,7,Carrier B,8.954528315318015,Supplier 4,Kolkata,27,806,30,51.634893400109334,Pending,0.9653947053523931,Road,Route C,88 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | skincare,SKU31,50.847390517187,28,168,9655.135102719398,Male,6,17,44,4,Carrier B,2.679609649814065,Supplier 3,Chennai,24,461,8,60.5114566159808,Pending,2.980000066550746,Rail,Route C,609.375 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | skincare,SKU32,79.20993601565672,43,781,9571.550487327819,Unknown,89,13,64,4,Carrier C,6.5991104901238584,Supplier 3,Kolkata,30,737,7,29.692467153749774,Pass,1.946360119386113,Road,Route A,761. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35 | cosmetics,SKU33,64.7954350001556.63.616.5149.9983504080365.Non-binary,4.17.95.9.Carrier C.4.85827050343864.Suoilier 5.Chennai.1.251.23.23.853427512896133.Fail.3.541046012250923.Sea.Route A.371.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рисунок 2.1 – Фрагмент вихідної таблиці для аналізу постачальників [19]

2.2 Постановка задачі

У сучасних умовах високої конкуренції, глобалізації ринків та зростаючих вимог до ефективності постачальницьких процесів, актуальним є завдання розробки раціональних методів оцінювання та вибору

постачальників. Від правильного вибору постачальника залежить стабільність виробництва, своєчасність поставок, фінансова ефективність та рівень обслуговування кінцевого споживача. Саме тому ключовим завданням даного дослідження є побудова прозорої, кількісно обґрунтованої системи ранжування постачальників на основі об'єктивних даних.

Метою дослідження є проведення комплексного багатокритеріального аналізу постачальників ресурсів для виробничого підприємства з подальшим ранжуванням альтернатив і вибором трьох постачальників, які є найбільш привабливими за сукупністю обраних критеріїв.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступну прикладну задачу:

Уявімо, що стартап у сфері Fashion & Beauty, який активно розвиває свою мережу постачань, наймає бізнес-аналітика з метою оптимізувати вибір постачальників. Керівництво компанії надає аналітику таблицю з реальними даними про поточних та потенційних постачальників, сформовану на основі внутрішніх звітів та публічного набору даних із платформи Kaggle. Основна задача полягає у виборі трьох найефективніших постачальників на основі кількісного аналізу їхньої діяльності.

У цьому контексті прикладна задача бізнес-аналітика формулюється наступним чином:

1. Проаналізувати вхідний набір даних, який містить різноманітні параметри постачання: обсяги виробництва, витрати, строки доставки, брак, дохід тощо.
2. Виділити найбільш релевантні показники, які з погляду бізнес-логіки характеризують як фінансову результативність, так і операційну ефективність постачальників. Усього для подальшого аналізу було відібрано сім критеріїв.
3. Об'єктивно оцінити важливість кожного критерію. Для цього використовується метод CRITIC, який враховує не лише варіативність

даних, а й взаємозалежність між показниками. Це дозволяє уникнути впливу суб'єктивних оцінок.

4. Ранжувати постачальників за допомогою трьох різних багатокритеріальних методів:

- SAW (Simple Additive Weighting) – метод суми зважених нормалізованих оцінок;
- ARAS (Additive Ratio Assessment) – метод з використанням відносних переваг альтернатив;
- GRA-TOPSIS – метод, що поєднує сіру реляційну оцінку з аналізом близькості до ідеального рішення. У випадку методу GRA-TOPSIS вагові коефіцієнти критеріїв задаються не на основі окремих експертних опитувань, а сформовані як узгоджені із результатами CRITIC. Таке рішення було прийнято через те, що директор компанії вирішив заощадити кошти та не залучати експертів для проведення суб'єктивного оцінювання. У результаті збережено об'єктивність підходу, але водночас створено можливість імітувати експертну оцінку на основі даних самих критеріїв, що дозволяє порівняти суб'єктивний і об'єктивний підхід до визначення важливості.

5. Провести порівняльний аналіз результатів ранжування, визначити ступінь збігу між методами, а також чутливість системи оцінювання до зміни ваг.

6. На основі зведених результатів обрати трьох постачальників, які демонструють найкращі результати.

Таким чином, сформульована задача має чітку прикладну спрямованість і дозволяє реалізувати системний підхід до вибору постачальників, поєднуючи математичну об'єктивність із практичними бізнес-потребами підприємства

2.3 Обґрунтування включення параметрів до моделі в якості критеріїв

Для багатокритеріального аналізу було обрано сім показників, представлених у таблиці 2.1, які найкраще характеризують постачальника з погляду прибутковості, надійності, своєчасності й ефективності. Вибір базувався як на змістовному аналізі предметної області, так і на узагальнених підходах, представлених у літературі [26], [27], [18].

Таблиця 2.1

Ключові показники для оцінювання постачальників та обґрунтування їх включення до моделі

| № | Показник | Назва у даних | Тип показника | Обґрунтування включення до моделі |
|---|--------------------|-------------------|---------------|---|
| 1 | Дохід від продажів | Revenue generated | Вигідний | Вищий дохід свідчить про успішність продукції та її затребуваність на ринку. Він є ознакою надійного та прибуткового постачальника. |
| 2 | Загальні витрати | Costs | Витратний | Чим нижчі витрати на постачання, тим ефективніше підприємство може використовувати свій бюджет і максимізувати прибуток. |
| 3 | Час виконання | Lead times | Витратний | Швидке виконання замовлень критичне для підтримки безперервності виробництва та задоволення споживчого попиту. |
| 4 | Відсоток браку | Defect rates | Витратний | Високий рівень дефектів підвищує ризики, потребує перевірки, викликає повернення і призводить до втрати довіри. |

Продовження табл. 2.1

| | | | | |
|---|------------------------|---------------------|-----------|---|
| 5 | Обсяги виробництва | Production volumes | Вигідний | Постачальники з більшими виробничими потужностями здатні швидше та гнучкіше реагувати на зміни попиту або термінові поставки. |
| 6 | Час доставки | Shipping times | Витратний | Менший час доставки означає швидшу появу товарів на ринку, що важливо для товарів, чутливих до часу або трендів у Fashion & Beauty. |
| 7 | Витрати на виробництво | Manufacturing costs | Витратний | Нижчі виробничі витрати вказують на ефективну внутрішню організацію постачальника і потенційно дозволяють отримати вигідніші умови для закупівлі. |

Таким чином, система показників охоплює як фінансові (п. 1, 2, 7), що прямо впливають на прибутковість підприємства, так і операційні показники (п. 3–6), які визначають надійність, швидкість та якість постачання. Згідно з підходами [18], при оцінці постачальників важливо враховувати не лише ціни, але й сервісні параметри: строки, стабільність, дефекти, швидкість реакції.

2.4 Вибір програмного середовища та особливості реалізації

У рамках реалізації експериментально-аналітичного етапу дослідження було прийнято рішення використовувати мову програмування Python як основний інструмент для побудови та апробації моделі багатокритеріального оцінювання постачальників логістичних послуг. Актуальність такого вибору зумовлена широким застосуванням Python у сфері аналітики даних, машинного навчання, операційних досліджень та прийняття рішень. Мова

Python є відкритою, має велику кількість бібліотек з потужним математичним та статистичним функціоналом, а також добре інтегрується з різними середовищами візуалізації та автоматизації.

Для написання, налагодження та запуску програмного коду було обрано Visual Studio Code (VS Code) – сучасне кросплатформне інтегроване середовище розробки, що забезпечує швидке написання коду, підтримку розширень, автодоповнення та візуальний контроль версій. VS Code також дозволяє ефективно працювати з Jupyter notebook-файлами та інтегрується з GitHub, що зручно для колективної роботи й ведення проєкту.

У розробленій програмі використано такі основні бібліотеки Python:

- pandas – для обробки табличних даних, формування та агрегування матриці рішень;
- numpy – для виконання векторно-матричних обчислень і реалізації математичних формул;
- tabulate – для форматowanego виведення таблиць у консольному вигляді, що підвищує зручність аналізу результатів;
- matplotlib.pyplot – для побудови графіків, зокрема лінійчатих діаграм, які ілюструють зміну рангів постачальників у різних методах.

Програму можна розділити на 8 логічних етапів. Опишемо логіку кожного етапу.

Етап 1. Завантаження та попередня обробка даних

На початковому етапі за допомогою функції `pd.read_csv(...)` виконується імпорт даних із CSV-файлу, який містить ключові показники діяльності постачальників. Після цього за допомогою методу `rename(...)` проводиться локалізація назв колонок українською мовою відповідно до обраних критеріїв оцінювання. Групування даних за постачальником (`groupby(...)`) дозволяє обчислити середні значення по кожному з критеріїв, що усуває вплив аномальних значень і забезпечує агреговану оцінку.

Етап 2. Побудова матриці рішень та її нормалізація

На основі відфільтрованих даних формується матриця рішень `decision_matrix`, де рядки відповідають постачальникам, а стовпці – критеріям. Далі виконується нормалізація кожного критерію залежно від його типу (вигідний або витратний). Для вигідних критеріїв значення масштабуються до інтервалу $[0;1]$ за формулою мін-макс нормалізації. Для витратних — застосовується зворотна нормалізація. Результатом є нормалізована матриця `norm_matrix`, що готова до подальшого аналізу.

Етап 3. Обчислення ваг критеріїв методом CRITIC

На наступному етапі реалізується метод CRITIC, який дозволяє об'єктивно визначити вагу кожного критерію. Спершу обчислюється стандартне відхилення (`std()`) для кожного показника, що характеризує варіативність. Потім формується матриця кореляцій (`corr()`) між критеріями. На основі цих двох компонентів визначається інформаційна значущість s_j кожного критерію за формулою (1.5). Після цього значущості нормалізуються, утворюючи ваги w_j , які використовуються у всіх трьох методах прийняття рішень.

Етап 4. Реалізація методу SAW

Метод SAW реалізовано шляхом створення окремої нормалізованої матриці `norm_saw`, після чого обчислюється зважена матриця (`weighted_saw = norm_saw * w_j`). Для кожного постачальника підсумовуються значення по всіх критеріях, що дає інтегральну оцінку. На її основі визначається ранг постачальника.

Етап 5. Реалізація методу ARAS

У методі ARAS спершу формується нормалізована матриця `norm_aras`, в якій вигідні критерії нормалізуються класично, а витратні – через обернені значення. Після застосування ваг формується зважена матриця `weighted_aras`. Підсумкова ефективність кожного постачальника обчислюється як сума

зважених нормалізованих значень, яка потім нормується відносно найкращої ($K_i = S_i / K_0$).

Етап 6. Реалізація інтегрованого методу GRA-TOPSIS

Метод GRA-TOPSIS включає кілька підетапів:

1. Визначення позитивно- та негативно-ідеальних альтернатив (`ideal_best`, `ideal_worst`).
2. Обчислення евклідової відстані до кожного ідеалу (`D_plus`, `D_minus`).
3. Обчислення коефіцієнтів сірої кореляції (`r_plus`, `r_minus`) та відповідних середніх значень (`R_plus`, `R_minus`).
4. Обчислення двох часткових індексів: TOPSIS (через `C_scores`) та GRA (`GRA_scores`).
5. Побудова інтегрального індексу `GRA_TOPSIS` як середнього між ними (за умовчанням $\eta = 0.5$), що дозволяє ранжувати постачальників з урахуванням обох підходів.

Етап 7. Аналіз чутливості до параметра η

Особлива увага приділяється чутливості інтегрального методу до вагового параметра η , що задає баланс між TOPSIS і GRA. У межах $[0.0; 1.0]$ з кроком 0.2 обчислюються ранжування постачальників для кожного значення η . Отримані результати зберігаються у таблиці `ranking_df`, яка наочно демонструє стабільність або варіативність позицій.

Етап 8. Візуалізація результатів

Для зручності аналізу реалізовано побудову лінійчатої діаграми, що демонструє зміни рангів постачальників за кожним методом: SAW, ARAS, GRA-TOPSIS. Графік створюється за допомогою бібліотеки `matplotlib`, а на осі Y інвертується порядок, щоб найкращі ранги відображались у верхній частині діаграми.

Висновок до розділу 2

У другому розділі дипломної роботи було сформульовано прикладну задачу вибору найкращих постачальників на основі багатокритеріального підходу. Проведено характеристику вхідного набору даних, що охоплює ключові параметри логістичної діяльності, та виділено сім показників, які найбільш повно відображають фінансову та операційну ефективність. Обґрунтовано застосування об'єктивного методу CRITIC для визначення ваг критеріїв, що дозволяє уникнути суб'єктивних викривлень. Задачу ранжування постачальників сформовано як задачу агрегованої оцінки альтернатив у присутності суперечливих критеріїв. Для реалізації було обрано мову програмування Python у середовищі Visual Studio Code, що забезпечує гнучкість розробки, доступ до потужних аналітичних бібліотек та автоматизацію розрахунків. Реалізовано алгоритми трьох методів прийняття рішень: SAW, ARAS і GRA-TOPSIS, включно з етапами нормалізації, зважування та побудови рейтингу. Підсумком розділу стало створення повноцінної програмної системи.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Визначення ваг критеріїв методом CRITIC

Крок 1: Формується матриця рішень, що містить n критеріїв оцінювання та m альтернатив.

♦ Матриця рішень (X):

| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
|----------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Постачальник 1 | 5834.41 | 574.85 | 16.78 | 1.8 | 501.67 | 6.07 | 45.25 |
| Постачальник 2 | 5703.06 | 515.03 | 16.23 | 2.36 | 641.14 | 5.5 | 41.62 |
| Постачальник 3 | 6519.73 | 468.8 | 14.33 | 2.47 | 533.13 | 5.2 | 43.63 |
| Постачальник 4 | 4803.83 | 521.81 | 17.0 | 2.34 | 653.11 | 5.56 | 62.71 |
| Постачальник 5 | 6130.19 | 536.02 | 14.72 | 2.67 | 521.17 | 6.22 | 44.77 |

Рисунок 3.1 – Матриця рішень

Крок 2: Кожен критерій у матриці нормалізується залежно від його типу:

♦ Нормалізована матриця (CRITIC):

| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
|----------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Постачальник 1 | 0.6006 | 0.0 | 0.0833 | 1.0 | 0.0 | 0.1449 | 0.8278 |
| Постачальник 2 | 0.5241 | 0.5641 | 0.2898 | 0.3512 | 0.9209 | 0.7065 | 1.0 |
| Постачальник 3 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.2316 | 0.2078 | 1.0 | 0.9046 |
| Постачальник 4 | 0.0 | 0.5001 | 0.0 | 0.3806 | 1.0 | 0.6522 | 0.0 |
| Постачальник 5 | 0.773 | 0.3661 | 0.8542 | 0.0 | 0.1288 | 0.0 | 0.8508 |

Рисунок 3.2 – Нормалізована матриця (CRITIC)

Крок 3: Обчислюються коефіцієнти кореляції між парами критеріїв за формулою (1.4), що дозволяє оцінити ступінь їх взаємної залежності.

♦ Матриця коефіцієнтів кореляції між нормалізованими критеріями:

| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
|--------------------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Отриманий дохід | 1.0 | 0.3168 | 0.8438 | -0.2202 | -0.739 | 0.0103 | 0.8389 |
| Витрати | 0.3168 | 1.0 | 0.5991 | -0.6239 | 0.2605 | 0.8457 | 0.0657 |
| Час виконання замовлення | 0.8438 | 0.5991 | 1.0 | -0.6779 | -0.4907 | 0.1341 | 0.533 |
| Рівень браку | -0.2202 | -0.6239 | -0.6779 | 1.0 | -0.192 | -0.1785 | -0.0308 |
| Обсяги виробництва | -0.739 | 0.2605 | -0.4907 | -0.192 | 1.0 | 0.4849 | -0.5216 |
| Терміни доставки | 0.0103 | 0.8457 | 0.1341 | -0.1785 | 0.4849 | 1.0 | -0.0934 |
| Витрати на виробництво | 0.8389 | 0.0657 | 0.533 | -0.0308 | -0.5216 | -0.0934 | 1.0 |

Рисунок 3.3 – Матриця коефіцієнтів кореляції між нормалізованими критеріями (CRITIC)

Крок 4: Обчислюється значення c_j , яке характеризує інформаційну значущість кожного критерію.

Крок 5: Розраховуються ваги критеріїв w_j за формулою (1.7):

У такому випадку критерій з найвищим значенням c_j вважається найбільш значущим відносно інших.

| ♦ Результати CRITIC-методу: | | | | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------|-------------------------|--------------------------|------------|--|
| Критерій | Тип критерію | Середнє знач. | Ст. відхилення σ | Інформ. значущість c_j | Вага w_j | |
| Отриманий дохід | Вигідний | 0.5795 | 0.372 | 0.263 | 0.1135 | |
| Витрати | Витратний | 0.4861 | 0.3609 | 0.2339 | 0.1009 | |
| Час виконання замовлення | Витратний | 0.4455 | 0.4551 | 0.3289 | 0.1419 | |
| Рівень браку | Витратний | 0.3927 | 0.3711 | 0.42 | 0.1812 | |
| Обсяги виробництва | Вигідний | 0.4515 | 0.4713 | 0.4847 | 0.2091 | |
| Терміни доставки | Витратний | 0.5007 | 0.4159 | 0.285 | 0.123 | |
| Витрати на виробництво | Витратний | 0.7166 | 0.4061 | 0.3021 | 0.1304 | |

Рисунок 3.4 – Результати CRITIC-методу

3.2 Ранжування постачальників методами SAW та ARAS

Метод ARAS складається з таких етапів:

Крок 1. Формування матриці рішень (рис. 3.1)

Крок 2. Нормалізація

| ♦ Нормалізована матриця (ARAS): | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
| Постачальник 1 | 0.2012 | 0.1813 | 0.1876 | 0.2536 | 0.176 | 0.1872 | 0.2059 |
| Постачальник 2 | 0.1967 | 0.2023 | 0.1939 | 0.1936 | 0.2249 | 0.2067 | 0.2239 |
| Постачальник 3 | 0.2249 | 0.2223 | 0.2196 | 0.1855 | 0.1871 | 0.2187 | 0.2135 |
| Постачальник 4 | 0.1657 | 0.1997 | 0.1851 | 0.1957 | 0.2291 | 0.2047 | 0.1486 |
| Постачальник 5 | 0.2114 | 0.1944 | 0.2138 | 0.1716 | 0.1829 | 0.1827 | 0.2081 |

Рисунок 3.5 – Нормалізована матриця (метод ARAS)

Крок 3. Врахування ваг критеріїв

Використовуючи ваги, наприклад, отримані за методом CRITIC, формується зважена нормалізована матриця за формулою (1.13):

| ♦ Зважена нормалізована матриця (ARAS): | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
| Постачальник 1 | 0.0228 | 0.0183 | 0.0266 | 0.046 | 0.0368 | 0.023 | 0.0268 |
| Постачальник 2 | 0.0223 | 0.0204 | 0.0275 | 0.0351 | 0.047 | 0.0254 | 0.0292 |
| Постачальник 3 | 0.0255 | 0.0224 | 0.0312 | 0.0336 | 0.0391 | 0.0269 | 0.0278 |
| Постачальник 4 | 0.0188 | 0.0202 | 0.0263 | 0.0355 | 0.0479 | 0.0252 | 0.0194 |
| Постачальник 5 | 0.024 | 0.0196 | 0.0303 | 0.0311 | 0.0382 | 0.0225 | 0.0271 |

Рисунок 3.6 – Зважена нормалізована матриця (метод ARAS)

Крок 4. Обчислення значень оптимальності

Крок 5. Розрахунок ступеня корисності

♦ Результати ARAS:

| | S _i | K _i | Ранг |
|----------------|----------------|----------------|------|
| Постачальник 2 | 0.207 | 1.0 | 1.0 |
| Постачальник 3 | 0.2066 | 0.998 | 2.0 |
| Постачальник 1 | 0.2004 | 0.968 | 3.0 |
| Постачальник 4 | 0.1932 | 0.9331 | 4.0 |
| Постачальник 5 | 0.1929 | 0.9319 | 5.0 |

Рисунок 3.5 – Результати (метод ARAS)

Метод SAW

Крок 1. Формування матриці рішень за формулою (1.1) рисунку 3.1.

Крок 2. Нормалізація

♦ Нормалізована матриця (SAW):

| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
|----------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Постачальник 1 | 0.8949 | 0.8155 | 0.8543 | 1.0 | 0.7681 | 0.8561 | 0.9198 |
| Постачальник 2 | 0.8747 | 0.9102 | 0.8833 | 0.7634 | 0.9817 | 0.9455 | 1.0 |
| Постачальник 3 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0.7315 | 0.8163 | 1.0 | 0.9539 |
| Постачальник 4 | 0.7368 | 0.8984 | 0.8431 | 0.7716 | 1.0 | 0.936 | 0.6637 |
| Постачальник 5 | 0.9403 | 0.8746 | 0.9736 | 0.6767 | 0.798 | 0.8357 | 0.9297 |

Рисунок 3.6 – Нормалізована матриця (метод SAW)

Крок 3. Коефіцієнти ваг, отримані методом CRITIC, використовуються для застосування методу SAW, і на основі рівняння (1.18) формується зважена матриця рішень.

♦ Зважена матриця рішень (SAW):

| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
|----------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Постачальник 1 | 0.1016 | 0.0823 | 0.1212 | 0.1812 | 0.1606 | 0.1053 | 0.1199 |
| Постачальник 2 | 0.0993 | 0.0919 | 0.1253 | 0.1383 | 0.2053 | 0.1163 | 0.1304 |
| Постачальник 3 | 0.1135 | 0.1009 | 0.1419 | 0.1326 | 0.1707 | 0.123 | 0.1244 |
| Постачальник 4 | 0.0836 | 0.0907 | 0.1196 | 0.1399 | 0.2091 | 0.1151 | 0.0865 |
| Постачальник 5 | 0.1067 | 0.0883 | 0.1381 | 0.1226 | 0.1669 | 0.1028 | 0.1212 |

Рисунок 3.7 – Зважена матриця (метод SAW)

Крок 4. Обчислення зваженої суми

Альтернатива з найвищим S_i вважається найефективнішою. Всі альтернативи ранжуються за спаданням цього значення.

Результати SAW:

| | SAW_Score | Ранг |
|----------------|-----------|------|
| Постачальник 3 | 0.9069 | 1.0 |
| Постачальник 2 | 0.9067 | 2.0 |
| Постачальник 1 | 0.8721 | 3.0 |
| Постачальник 5 | 0.8466 | 4.0 |
| Постачальник 4 | 0.8445 | 5.0 |

Рисунок 3.8 – Результати (метод SAW)

3.3 Ранжування постачальників методом GRA-TOPSIS

Для уникнення впливу суб'єктивності та підвищення об'єктивності дослідження, визначення ваг обраних критеріїв здійснюється за допомогою методу CRITIC, що враховує як інформаційну насиченість кожного критерію (через його дисперсію), так і взаємну залежність критеріїв (через кореляційні зв'язки). Такий підхід відповідає рекомендаціям досліджень [27], де підкреслюється важливість автоматизованих, статистично обґрунтованих методів для розв'язання задач прийняття рішень.

З метою прийняття обґрунтованого управлінського рішення було визначено набір критеріїв оцінювання постачальників, сформований експертами:

Крок 1. Формування матриці рішень (рис.3.1).

Крок 2. Визначення ваг оціночних показників та побудова зваженої нормалізованої матриці рішень

Для побудови вагової структури оціночних показників було використано комбінацію суб'єктивного й об'єктивного підходів.

Семеро експертів надали свої суб'єктивні оцінки значущості семи критеріїв. На основі цих оцінок було побудовано вектор суб'єктивних ваг:

$$\omega^{\rightarrow} = (0.1135, 0.1009, 0.1419, 0.1812, 0.2091, 0.123, 0.1304)$$

Паралельно було застосовано ентропійний метод для обчислення об'єктивних ваг на основі нормалізованої матриці рішень. Вектор об'єктивних ваг має вигляд:

$$\omega^{\rightarrow}=(0.1006, 0.1166, 0.1955, 0.1534, 0.1979, 0.1466, 0.0894)$$

Згідно з рівнянням (8), комбіновані ваги для кожного критерію були розраховані як нормалізований добуток відповідних суб'єктивних та об'єктивних ваг:

$$\omega^{\rightarrow}=(0.0762, 0.0785, 0.1852, 0.1856, 0.2762, 0.1204, 0.0778)$$

Ці комбіновані ваги було використано для побудови зваженої нормалізованої матриці рішень шляхом множення кожного елемента нормалізованої матриці на відповідну вагу критерію. В результаті отримано матрицю, що зображенв на рис. 3.9.

Зведена таблиця ваг критеріїв:

| Критерій | Об'єктивна вага (ентропія) | Суб'єктивна вага (CRITIC) | Комбінована вага |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------|
| Отриманий дохід | 0.1006 | 0.1135 | 0.0762 |
| Витрати | 0.1166 | 0.1009 | 0.0785 |
| Час виконання замовлення | 0.1955 | 0.1419 | 0.1852 |
| Рівень браку | 0.1534 | 0.1812 | 0.1856 |
| Обсяги виробництва | 0.1979 | 0.2091 | 0.2762 |
| Терміни доставки | 0.1466 | 0.123 | 0.1204 |
| Витрати на виробництво | 0.0894 | 0.1304 | 0.0778 |

Рисунок 3.9 – Зведена таблиця ваг критеріїв (метод GRA-TOPSIS)

Зважена нормалізована матриця рішень:

| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
|----------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| Постачальник 1 | 0.0458 | 0.0 | 0.0154 | 0.1856 | 0.0 | 0.0174 | 0.0644 |
| Постачальник 2 | 0.04 | 0.0443 | 0.0537 | 0.0652 | 0.2544 | 0.085 | 0.0778 |
| Постачальник 3 | 0.0762 | 0.0785 | 0.1852 | 0.043 | 0.0574 | 0.1204 | 0.0704 |
| Постачальник 4 | 0.0 | 0.0393 | 0.0 | 0.0707 | 0.2762 | 0.0785 | 0.0 |
| Постачальник 5 | 0.0589 | 0.0288 | 0.1582 | 0.0 | 0.0356 | 0.0 | 0.0662 |

Рисунок 3.10 – Зважена нормалізована матриця рішень (метод GRA-TOPSIS)

Крок 3. Визначення позитивно-ідеальної та негативно-ідеальної альтернативи

Згідно з рівняннями (1.9) та (1.10), для кожного критерію визначаються:

- позитивно-ідеальна альтернатива: максимальне значення серед усіх альтернатив;
- негативно-ідеальна альтернатива: мінімальне значення серед усіх альтернатив.

На основі отриманої зваженої нормалізованої матриці, було обчислено:

| ♦ Позитивно-ідеальні значення (Z+): | | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------|---------|--------------------------|--------------|--------------------|------------------|------------------------|
| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
| 0 | 0.0762 | 0.0785 | 0.1852 | 0.1856 | 0.2762 | 0.1204 | 0.0778 |
| ● Негативно-ідеальні значення (Z-): | | | | | | | |
| | Отриманий дохід | Витрати | Час виконання замовлення | Рівень браку | Обсяги виробництва | Терміни доставки | Витрати на виробництво |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Рисунок 3.11 –Позитивно-ідеальні та негативно-ідеальні значення (метод GRA-TOPSIS)

Як видно з рисунку 3.11, усі негативно-ідеальні значення дорівнюють нулю, що є наслідком використання нормалізованих та зважених значень, де мінімальні значення автоматично стають нульовими при відповідній трансформації (наприклад, для витратних критеріїв — чим менше, тим краще). У свою чергу, позитивно-ідеальні значення різні для кожного критерію та залежать від поєднання нормалізації та вагових коефіцієнтів. Наприклад:

- Найбільший внесок має критерій "Обсяги виробництва" (0.2762), що свідчить про його високу вагу та значимість у формуванні ідеального постачальника.
- "Час виконання замовлення" та "Рівень браку" також мають високі значення у $Z+$, що свідчить їх критичне значення для логістичних процесів.
- Найменший внесок серед позитивних значень має "Отриманий дохід" (0.0762), що пояснюється меншою комбінаційною вагою цього критерію у поточній моделі.

Таким чином, сформовані вектори є основою для подальшого обчислення евклідових відстаней до ідеального та анти-ідеального рішень, що

дозволяє кількісно оцінити наближеність кожної альтернативи до оптимального варіанту.

Крок 4. Обчислення евклідової відстані та ступеня сірої кореляції

На основі побудованої зваженої нормалізованої матриці рішень було виконано розрахунок наступних характеристик для кожної альтернативи.

◆ Зведена таблиця (TOPSIS + GRA):

| | d+ | d- | D+ | D- | g+ | g- | G+ | G- |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Постачальник 1 | 0.3507 | 0.2031 | 1 | 0.6808 | 0.6748 | 0.8067 | 0.8105 | 1 |
| Постачальник 2 | 0.1898 | 0.2978 | 0.5412 | 0.9982 | 0.7571 | 0.649 | 0.9093 | 0.8045 |
| Постачальник 3 | 0.2613 | 0.2662 | 0.7452 | 0.8923 | 0.8326 | 0.625 | 1 | 0.7747 |
| Постачальник 4 | 0.2504 | 0.2983 | 0.7139 | 1 | 0.6862 | 0.773 | 0.8242 | 0.9582 |
| Постачальник 5 | 0.3324 | 0.187 | 0.9479 | 0.6268 | 0.6726 | 0.7809 | 0.8079 | 0.968 |

Рисунок 3.12 – Зведена таблиця (метод GRA-TOPSIS)

Крок 5. Інтегральна близькість та аналіз чутливості

У цьому кроці виконується розрахунок інтегрального індексу GRA-TOPSIS для кожної альтернативи з використанням різних значень коефіцієнта переваги η , $\eta \in [0, 1]$ визначає відносну важливість методу TOPSIS у порівнянні з методом GRA. З метою дослідження чутливості моделі до зміни ваги між методами було протестовано сім значень η : 0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8 та 1.0.

Для кожного значення η було обчислено вектор T_i , а далі — відсортовано альтернативи за спаданням інтегрального індексу. Результати ранжування наведено на рис. 3.13.

Результати ранжування альтернатив залежно від η :

| | η | Постачальник1 | Постачальник2 | Постачальник3 | Постачальник4 | Постачальник5 |
|---|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | 0 | 5 | 2 | 1 | 3 | 4 |
| 1 | 0.2 | 5 | 2 | 1 | 3 | 4 |
| 2 | 0.4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 3 | 0.5 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 4 | 0.6 | 4 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| 5 | 0.8 | 4 | 1 | 3 | 2 | 5 |
| 6 | 1 | 4 | 1 | 3 | 2 | 5 |

Рисунок 3.13 – Результати ранжування альтернатив залежно від η (метод GRA-TOPSIS)

3.4 Аналіз і порівняння результатів

На заключному етапі дослідження було проведено порівняльний аналіз результатів, отриманих за трьома різними методами багатокритеріального оцінювання: SAW (Simple Additive Weighting), ARAS (Additive Ratio Assessment) та GRA-TOPSIS. Метою цього етапу є виявлення узгодженості між методами, оцінка чутливості моделі до зміни вагових параметрів, а також вибір найкращих постачальників.

Метод SAW продемонстрував, що найвищу інтегральну оцінку отримав Постачальник 3, який показав найкращу сукупну нормалізовану ефективність за всіма критеріями. Незначно поступився йому Постачальник 2, який посів друге місце. Постачальник 1 зайняв стабільну третю позицію, у той час як постачальники 4 і 5 показали найменшу ефективність.

У свою чергу, метод ARAS, що базується на співвідношенні ефективності кожної альтернативи до еталонної, визначив Постачальника 2 як беззаперечного лідера ($K_i=1.0$). Постачальник 3 знову опинився серед фаворитів, посівши друге місце з незначним відривом ($K_i=0.998$). Третє місце залишилося за Постачальником 1, що підтверджує стабільність його позиції. Постачальники 4 і 5, як і у випадку SAW, зайняли останні місця.

Найбільш комплексним виявився метод GRA-TOPSIS, який враховує як відстань до ідеального рішення (TOPSIS), так і ступінь подібності до еталона за сірими реляційними коефіцієнтами (GRA). Цей метод також дозволяє дослідити чутливість системи ранжування до зміни вагового параметра η , який регулює пріоритет між TOPSIS та GRA. Результати ранжування методом GRA-TOPSIS демонструють помірну чутливість моделі до зміни параметра η . Зокрема, Постачальник 3 займає перше місце при низьких значеннях η (0.0 і 0.2), що свідчить про її високий рівень схожості з ідеальним рішенням відповідно до критерію сірої кореляції. Проте зі зростанням η , починаючи з $\eta = 0.4$, Постачальник 3 поступається позицією Постачальник 2, яка стабільно займає перше місце при $\eta \geq 0.4$. Це свідчить про її перевагу за евклідовими метриками TOPSIS.

Постачальник 1, яка на початку посідає останнє п'яте місце, дещо покращує своє положення при зростанні η , але залишається однією з найменш конкурентних. Постачальник 5 зберігає стабільно низькі позиції незалежно від значення η , що свідчить про її слабку відповідність як критеріям TOPSIS, так і GRA. Постачальник 4 демонструє відносну стабільність і посідає середні місця протягом усього інтервалу η .

Таким чином, отримані результати підтверджують стійкість моделі GRA-TOPSIS до зміни вагових пріоритетів між методами TOPSIS та GRA. Це дозволяє рекомендувати модель як гнучкий і надійний інструмент для підтримки прийняття рішень у задачах вибору постачальника логістичних послуг.

Результати ранжування за різних значень η свідчать про відносну стабільність позицій Постачальників 2 і 3, які чергуються на перших місцях залежно від домінуючого підходу. При низьких значеннях η (тобто GRA-пріоритет) першість належить Постачальнику 3, тоді як при зростанні η лідером стає Постачальник 2. Постачальник 1 стабільно зберігає третю позицію в усіх трьох методах. Постачальники 4 і 5 виявляються найменш

конкурентоспроможними незалежно від обраного методу, що підтверджує їх низьку ефективність за сукупністю критеріїв.

Отримані результати свідчать про високий ступінь узгодженості між методами. Незважаючи на використання різних математичних підходів, усі три методи виявили схожі тенденції в оцінюванні постачальників. Така кореляція результатів підвищує достовірність висновків і свідчить про об'єктивність обраної методології.

З огляду на сукупні оцінки, до трійки найкращих постачальників входять Постачальники 1, 2 та 3. Для наочності побудовано **лінійну діаграму** (рис. 3.14), яка демонструє зміну рангів постачальників залежно від обраного методу. Графік підтверджує стабільність позицій лідерів (Постачальник 1, 2, 3) та аутсайдерів.

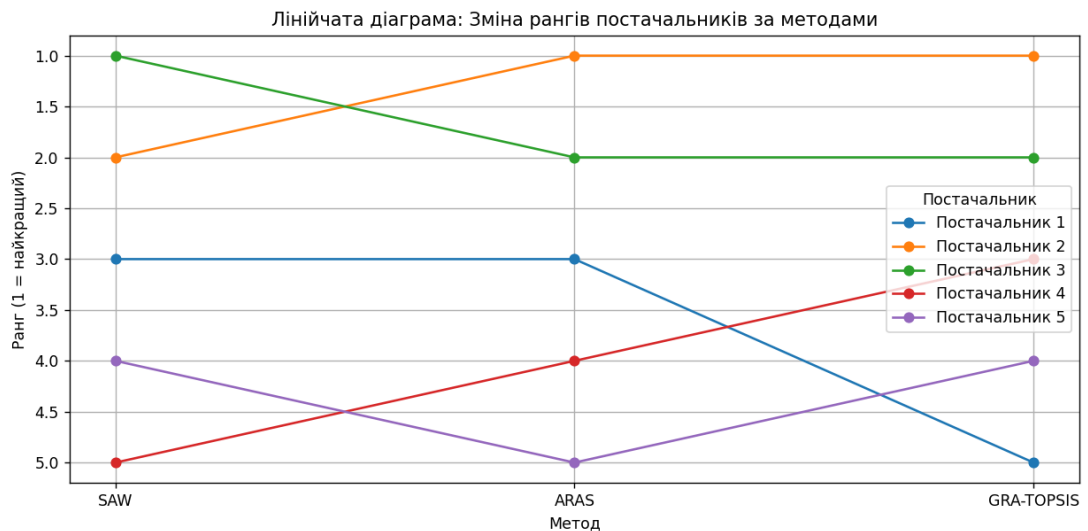


Рисунок 3.14 – Зміна рангів постачальників за методами

Висновок до розділу 3

У даному розділі було проведено експериментально-аналітичну перевірку моделі оцінювання постачальників логістичних послуг на основі реального набору даних. Було реалізовано три методи багатокритеріального прийняття рішень: SAW, ARAS і GRA-TOPSIS, які дозволили здійснити ранжування альтернатив за сукупністю економічних та операційних показників. Для забезпечення об'єктивності оцінювання вагові коефіцієнти критеріїв були визначені за допомогою методу CRITIC.

Результати аналізу показали високий рівень узгодженості між методами, що свідчить про надійність обраного підходу. Незалежно від методу, до трійки найкращих постачальників стабільно входили Постачальники 1, 2 і 3. Постачальники 4 і 5 посіли останні місця, що свідчить про їх низьку відповідність очікуваним вимогам. Отримані результати є обґрунтованими та можуть слугувати надійною основою для прийняття управлінських рішень. Отже, побудована модель продемонструвала практичну придатність до вирішення прикладної задачі вибору постачальників у сфері логістики.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було реалізовано комплексний підхід до побудови системи оцінювання та раціонального вибору постачальників ресурсів для мережі виробничих підприємств. Основну увагу зосереджено на поєднанні сучасних інструментів математичного моделювання, методів багатокритеріального аналізу та засобів обробки даних для забезпечення прозорості та обґрунтованості управлінських рішень.

У першому розділі здійснено критичний огляд наукових джерел, присвячених методам оцінювання та вибору постачальників. Проаналізовано переваги та обмеження класичних підходів, зокрема методу FMEA, а також сучасних інтегрованих моделей прийняття рішень на основі MCDM (Multi-Criteria Decision-Making). Визначено актуальні напрями розвитку систем оцінювання постачальників у контексті цифровізації та переходу до об'єктивних і формалізованих критеріїв. На основі огляду сформульовано загальні вимоги до побудови ефективної моделі: багатокритеріальність, об'єктивність, масштабованість та адаптивність до змін середовища.

У другому розділі поставлено прикладну задачу вибору найкращих постачальників для логістичної мережі, яка реалізується як задача агрегованого оцінювання альтернатив у присутності суперечливих критеріїв. Проведено детальний аналіз вхідного набору даних, що містить реальні логістичні показники. На основі бізнес-логіки виділено сім ключових критеріїв, що охоплюють як фінансову ефективність (дохід, витрати, виробничі витрати), так і операційні показники (час доставки, брак, обсяги тощо). Об'єктивне визначення ваг реалізовано за допомогою методу CRITIC, який враховує варіативність і кореляційні залежності між критеріями. Для реалізації обчислень обрано мову Python у середовищі Visual Studio Code. Розроблено програмний модуль, який автоматизує весь процес: від нормалізації матриці рішень до виведення ранжування трьома методами –

SAW, ARAS і GRA-TOPSIS. Окремо реалізовано модуль аналізу чутливості для оцінки впливу параметра η в інтегрованому методі GRA-TOPSIS.

У третьому розділі наведено результати практичного застосування трьох моделей багатокритеріального аналізу. Проведено обчислення інтегральних оцінок постачальників та побудовано ранжування за кожним методом. Отримані результати демонструють високу узгодженість між методами SAW, ARAS і GRA-TOPSIS, що свідчить про стабільність і достовірність моделі. Проведено візуалізацію результатів у вигляді лінійчатих графіків, які наочно ілюструють позиції постачальників у різних методиках. Особливу увагу приділено аналізу впливу параметра η на позиції альтернатив у GRA-TOPSIS. Встановлено, що Постачальники 2 і 3 стабільно демонструють найкращі результати за більшістю сценаріїв, що дозволяє рекомендувати їх до стратегічного партнерства. Постачальник 1 також входить до трійки лідерів, що підтверджує його конкурентоспроможність. Постачальники 4 і 5 систематично демонструють нижчі результати, незалежно від методу, що свідчить про їх відносно слабку ефективність.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що розроблена система оцінювання є ефективним інструментом підтримки прийняття рішень для логістичного менеджменту. Система оцінювання демонструє високу точність, масштабованість та здатність до інтеграції в практику управління постачальницькими ланцюгами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шматько Н.М., Кармінська-Белоброва М.В. Аналіз сучасних методів та підходів до управління ризиками на підприємстві.
2. Соляник О.М., Осиненко О.В. Практичні аспекти застосування ABC-аналізу у логістичному управлінні // Вісник СумДУ. Серія: Економіка. – 2009. – № 2. – С. 105–112.
3. Сучасний менеджмент: моделі, стратегії, технології: матеріали XVIII Всеукр. щоріч. студент. наук.-практ. конф. – Одеса: ОРІДУ НАДУ, 2017. – 352 с.
4. Feldmann A., Olhager J. Integration of operations planning and control: the impact of information availability and quality on performance // Computers in Industry. – 2008. – Vol. 58(5). – P. 405–421.
5. Seiti H. et al. A risk-based fuzzy evidential framework for FMEA analysis under uncertainty // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2018. – Vol. 35. – P. 1419–1430.
6. Indirajith M., Sukumar T.R. Implementation of FMEA to Enhance CNC Productivity // IJERT. – 2024. – Vol. 13(4).
7. Dong Q., Yuan Y. Data-driven robust supplier selection and order allocation under carbon emission // Int. Trans. Oper. Res. – 2025. – Vol. 32. – P. 1119–1145.
8. Bandy D. et al. Integrated supply chain risk management via operational and financial tools // Int. J. Production Research. – 2014. – Vol. 52(7). – P. 2007–2025.
9. Kmiecik R. et al. ABC Analysis as a Method of Evaluating Suppliers in Industry 4.0 // Operations Research and Decisions. – 2019. – No. 3. – P. 21–41.
10. Станжицький О.М., Таран Є.Ю., Гординський Л.Д. Основи математичного моделювання. – Київ: КУ, 2006. – 246 с.
11. Роїк О.М., Шиян А.А., Нікіфорова Л.О. Системний аналіз.

12. Akdemir B., Şimşek M. Financial Performance Evaluation via Hybrid MCDM // Istanbul Business Research. – 2023. – Vol. 52(1). – P. 204–212.
13. Вітлінський В.В. Моделювання економіки. – К.: КНЕУ, 2003. – 408 с.
14. Скорук О.В. Оптимізаційні методи і моделі. – Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки, 2023. – 273 с.
15. Бондаренко О.В. та ін. Метаевристичні алгоритми. – НТУ "ХПІ", 2023.
16. Akanbi O.A. et al. A Machine-Learning Approach to Phishing Detection. – 2015.
17. Ćirović G., Pamučar D. (Eds.). Multiple-Criteria Decision Making. – MDPI, 2022. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2816-8>
18. Selection of Logistics Service Provider for the E-Commerce Companies in Pakistan Based on Integrated GRA-TOPSIS Approach Muhammad Hamza Naseem *, Jiaqi Yang and Ziquan Xiang
19. Supply Chain Analysis Dataset. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/harshsingh2209/supply-chain-analysis/data>
20. Кваліфікаційна робота бакалавра [Електронний ресурс] : методичні рекомендації для здобувачів ступеня бакалавра освітньо-професійної програми «Системний аналіз» зі спеціальності 124 Системний аналіз / уклад.: Т.А. Желдак, Т.В. Хом'як, А.В. Малієнко ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. – 32 с.
21. Li X. Personal Information Security Risk Assessment for E-Waste Recycling using Fuzzy–GRA–TOPSIS and FMEA. – 2024.
22. Shi H. et al. A new linguistic preference relation-based approach for FMEA // Information Sciences. – 2022. – Vol. 610. – P. 977–993.
23. Chaudhuri A. et al. Supply chain risk assessment during new product development // Group Decision & Negotiation.
24. Filz M.-A. et al. Data-driven FMEA to enhance maintenance planning.
25. Stević Ž., Pamučar D. et al. Integrated fuzzy AHP–GRA–TOPSIS for 3PL under COVID-19 // Axioms. – 2021. – 10(2), 54.

26. Nuengphasuk, M.; Samanchuen, T. Selection of logistics service provider for e-commerce using AHP and TOPSIS: A case study of SMEs in Thailand. In Proceedings of the 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON), Bangkok, Thailand, 11–13 December 2019; pp. 1–5.
27. Akdemir B., Şimşek M. Financial Performance Evaluation via Hybrid MCDM // Istanbul Business Research. – 2023. – Vol. 52(1). – P. 204–212.
28. Гриценко С. І. Г 858 Проектування логістичних систем: навч. посіб. / С. І. Гриценко, С. В. Смерічевська, Л. В. Савченко. – К.: НАУ, 2024. – 407с.

ДОДАТОК А. Відомість матеріалів кваліфікаційної роботи

| № з/п | Позначення | | | | Найменування | Кількість аркушів | Примітки | | |
|-----------|-----------------|----------|--------|------|---|---------------------------|---------------------|---------|--|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | Документація | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | САУ.КР.25.25.ПЗ | | | | Пояснювальна записка | 57 | Формат А4 | | |
| 5 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | Демонстраційний матеріал | 15 | Презентація на CD-R | | |
| 7 | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | Копія роботи | 1 | Диск CD-R | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | |
| | | | | | САУ.КР.25.25.ДА.ПЗ. | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Змін. | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата | | | | | |
| Розроб. | ПІБ | | | | Матеріали кваліфікаційної роботи | Літ. | Аркуш | Аркушів | |
| К. розд. | ПІБ | | | | | | | | |
| Керівн. | ПІБ | | | | | НТУ «ДП», 12; 124-21-2 | | | |
| Н.контр. | ПІБ | | | | | | | | |
| Зав. каф. | ПІБ | | | | | | | | |

ДОДАТОК Б. Відгук керівника кваліфікаційної роботи

Відгук на кваліфікаційну роботу бакалавра студента(ки) групи 124 – 21 – 2 спеціальності 124 Системний аналіз

Тема кваліфікаційної роботи: _____

Обсяг кваліфікаційної роботи _____ стор.

Мета кваліфікаційної роботи: _____

Актуальність теми _____

Тема кваліфікаційної роботи безпосередньо пов'язана з об'єктом діяльності бакалавра спеціальності 124 Системний аналіз, оскільки _____

Виконані в кваліфікаційній роботі завдання відповідають вимогам ступеня бакалавра. Оригінальність наукових рішень полягає в _____

Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи полягає в _____

Висновки підтверджують можливість використання результатів роботи в _____

Оформлення пояснювальної записки та демонстраційного матеріалу до неї виконано згідно з вимогами. Роботу виконано самостійно, відповідно до завдання та у повному обсязі (*в разі невідповідності – вказати*)

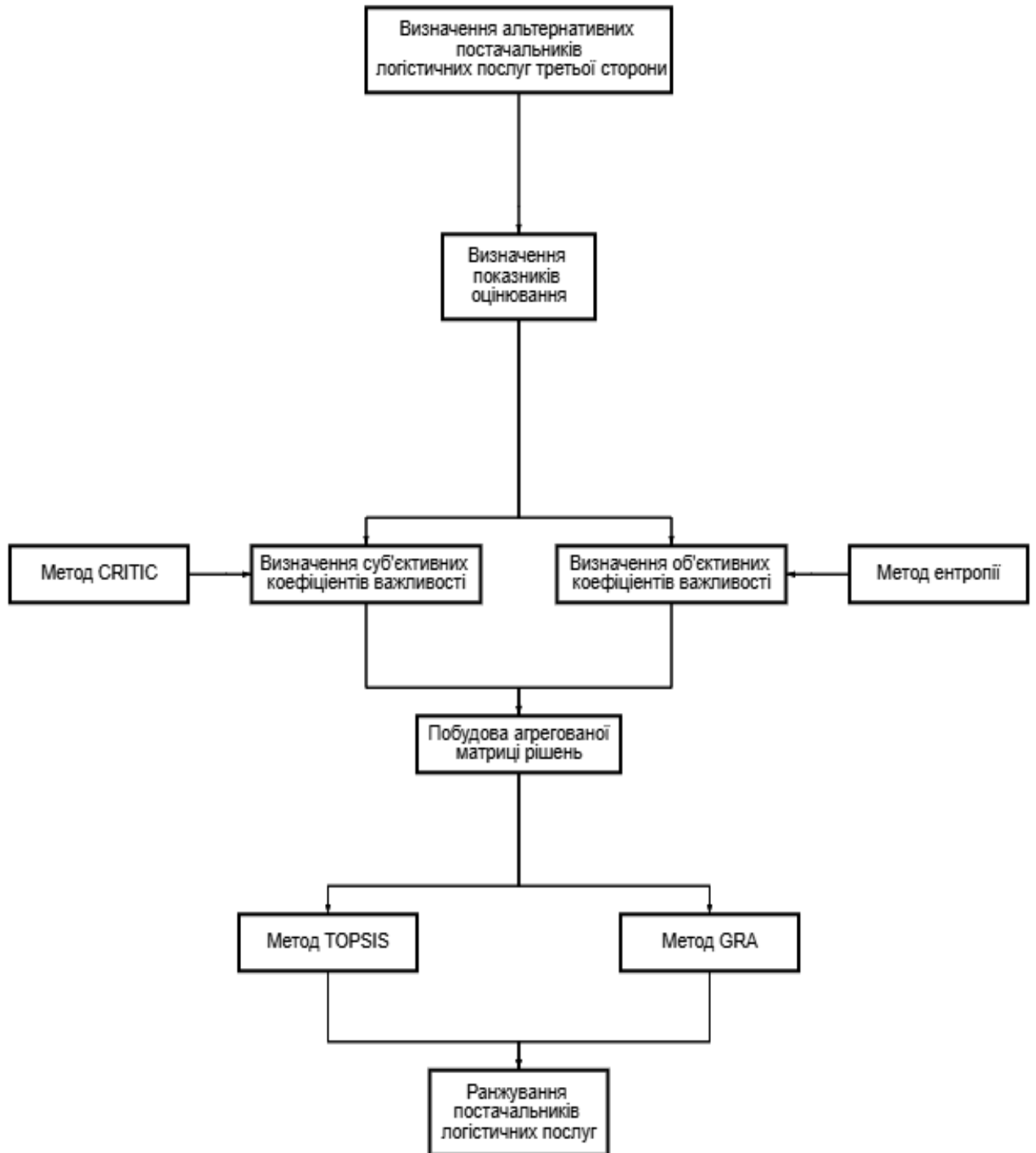
У роботі відзначено такі недоліки: _____

Кваліфікаційна робота в цілому заслуговує оцінки: _____

З урахуванням висловлених зауважень автор (не) заслуговує присвоєння освітньої кваліфікації «бакалавр з системного аналізу».

Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра,
науковий ступінь, вчене звання, посада _____ / ППБ

ДОДАТОК В. Блоксхема GRA-TOPSIS-методу



ДОДАТОК Г. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ

```

pandas as pd
import numpy as np
from tabulate import tabulate
from numpy.linalg import norm
import matplotlib.pyplot as plt
# Завантаження даних ===
df =
pd.read_csv(r"C:\Users\Админ\AppData\Local\Programs\Python\Python310\supply_chain
_data.csv")

# Визначення критеріїв ===
criteria_ua = {
    'Отриманий дохід': 1,
    'Витрати': 0,
    'Час виконання замовлення': 0,
    'Рівень браку': 0,
    'Обсяги виробництва': 1,
    'Терміни доставки': 0,
    'Витрати на виробництво': 0
}

# Перейменування стовпців
df = df.rename(columns={
    'Revenue generated': 'Отриманий дохід',
    'Costs': 'Витрати',
    'Lead times': 'Час виконання замовлення',
    'Defect rates': 'Рівень браку',
    'Production volumes': 'Обсяги виробництва',
    'Shipping times': 'Терміни доставки',
    'Manufacturing costs': 'Витрати на виробництво'
})

# Матриця рішень
selected_columns = list(criteria_ua.keys())
decision_matrix = df.groupby("Supplier name")[selected_columns].mean().dropna()
supplier_labels = [f"Постачальник {i+1}" for i in range(len(decision_matrix))]
decision_matrix.index = supplier_labels

print("\n❏ Матриця рішень (X):")
print(tabulate(decision_matrix.round(2), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# Нормалізація за формулами
norm_matrix = pd.DataFrame(index=decision_matrix.index)
for col, is_benefit in criteria_ua.items():
    x = decision_matrix[col]
    if is_benefit:
        norm_matrix[col] = (x - x.min()) / (x.max() - x.min())
    else:

```

```

        norm_matrix[col] = (x.max() - x) / (x.max() - x.min())

print("\n❏ Нормалізована матриця (CRITIC):")
print(tabulate(norm_matrix.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# Обчислення стандартного відхилення  $\sigma_j$ 
sigma = norm_matrix.std()

# Обчислення коефіцієнтів кореляції між парами критеріїв
corr_matrix = norm_matrix.corr()

# Обчислення інформаційної значущості  $c_j$ 
n = len(criteria_ua)
c_j = sigma * (1 - corr_matrix.sum()) / n

# Розрахунок ваг  $w_j$ 
w_j = c_j / c_j.sum()

print("\n❏ Матриця коефіцієнтів кореляції між нормалізованими критеріями:")
print(tabulate(corr_matrix.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))
# Виведення таблиці результатів ===

result_table = pd.DataFrame({
    'Тип критерію': ['Вигідний' if v == 1 else 'Витратний' for v in
criteria_ua.values()],
    'Середнє знач.': norm_matrix.mean().round(4),
    'Ст. відхилення  $\sigma$ ': sigma.round(4),
    'Інформ. значущість  $c_j$ ': c_j.round(4),
    'Вага  $w_j$ ': w_j.round(4)
})
result_table.index.name = 'Критерій'

print("\n❏ Результати CRITIC-методу:")
print(tabulate(result_table, headers='keys', tablefmt='pretty'))
# === ARAS ===
# Нормалізація ARAS
norm_aras = pd.DataFrame(index=decision_matrix.index)
for col, is_benefit in criteria_ua.items():
    x = decision_matrix[col]
    if is_benefit:
        norm_aras[col] = x / x.sum()
    else:
        norm_aras[col] = (1 / x) / (1 / x).sum()

print("\n❏ Нормалізована матриця (ARAS):")
print(tabulate(norm_aras.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# Зважена нормалізована матриця
weighted_aras = norm_aras * w_j

```

```

print("\n Зважена нормалізована матриця (ARAS):")
print(tabulate(weighted_aras.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# Підсумкові значення S_i
Si = weighted_aras.sum(axis=1)

# Розрахунок ефективності
K0 = Si.max()
Ki = Si / K0

ranking = Ki.rank(ascending=False).astype(int)

# Підсумкова таблиця
aras_result = pd.DataFrame({
    "S_i": Si.round(4),
    "K_i": Ki.round(4),
    "Ранг": ranking
}, index=supplier_labels)

print("\n Результати ARAS:")
print(tabulate(aras_result.sort_values("Ранг"), headers='keys',
tablefmt='pretty'))

# Нормалізація
norm_saw = pd.DataFrame(index=decision_matrix.index)
for col, is_benefit in criteria_ua.items():
    x = decision_matrix[col]
    if is_benefit:
        norm_saw[col] = x / x.max()
    else:
        norm_saw[col] = x.min() / x

print("\n Нормалізована матриця (SAW):")
print(tabulate(norm_saw.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))
# Зважена нормалізована матриця
weighted_saw = norm_saw * w_j

print("\n Зважена матриця рішень (SAW):")
print(tabulate(weighted_saw.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# Обчислення S_i та ранжування
Si = weighted_saw.sum(axis=1)
ranking = Si.rank(ascending=False).astype(int)

saw_result = pd.DataFrame({
    "SAW_Score": Si.round(4),
    "Ранг": ranking
}, index=supplier_labels)

```

```

print("\n❏ Результати SAW:")
print(tabulate(saw_result.sort_values("Ранг"), headers='keys',
tablefmt='pretty'))

print("\n❏ Нормалізована матриця (без ваг):")
print(tabulate(norm_matrix.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# Суб'єктивні ваги (метод CRITIC) ===
correlation_matrix = norm_matrix.corr()
std_devs = norm_matrix.std()
n = len(criteria_ua)
Cj = std_devs * (1 - correlation_matrix.sum() / n)
subjective_weights = Cj / Cj.sum()

# Об'єктивні ваги (метод ентропії) ===
P = norm_matrix.div(norm_matrix.sum(axis=0), axis=1)
epsilon = 1e-12
E = -(P * np.log(P + epsilon)).sum(axis=0) / np.log(len(norm_matrix))
d = 1 - E
objective_weights = d / d.sum()

# Комбіновані ваги ===
combined_weights = subjective_weights * objective_weights
combined_weights /= combined_weights.sum()

# Вивід таблиці ваг ===
weight_table = pd.DataFrame({
    'Об'єктивна вага (ентропія)': objective_weights.round(4),
    'Суб'єктивна вага (CRITIC)': subjective_weights.round(4),
    'Комбінована вага': combined_weights.round(4)
})
weight_table.index.name = 'Критерій' # підпис індексу

print("\n❏ Зведена таблиця ваг критеріїв:")
print(tabulate(weight_table, headers='keys', tablefmt='pretty'))

weighted_matrix = norm_matrix * combined_weights.values # кожен стовпець * вага
критерію

print("\n❏ Зважена нормалізована матриця рішень:")
print(tabulate(weighted_matrix.round(4), headers='keys', tablefmt='pretty'))
# === GRA-TOPSIS ===
weighted_matrix = norm_matrix * combined_weights
ideal_best = weighted_matrix.max()
ideal_worst = weighted_matrix.min()

print("\n❏ Позитивно-ідеальні значення (Z+):")

```

```

print(tabulate(pd.DataFrame(ideal_best).T.round(4), headers='keys',
tablefmt='pretty'))

print("\n● Негативно-ідеальні значення (Z-):")
print(tabulate(pd.DataFrame(ideal_worst).T.round(4), headers='keys',
tablefmt='pretty'))

D_plus = weighted_matrix.apply(lambda row: norm(row - ideal_best), axis=1)
D_minus = weighted_matrix.apply(lambda row: norm(row - ideal_worst), axis=1)
C_scores = D_minus / (D_plus + D_minus)

rho = 0.5
delta_plus = abs(weighted_matrix - ideal_best)
delta_min = delta_plus.min().min()
delta_max = delta_plus.max().max()
r_plus = (delta_min + rho * delta_max) / (delta_plus + rho * delta_max)

delta_minus = abs(weighted_matrix - ideal_worst)
r_minus = (delta_min + rho * delta_max) / (delta_minus + rho * delta_max)

R_plus = r_plus.mean(axis=1)
R_minus = r_minus.mean(axis=1)
D_plus_norm = D_plus / D_plus.max()
D_minus_norm = D_minus / D_minus.max()
G_plus_norm = R_plus / R_plus.max()
G_minus_norm = R_minus / R_minus.max()

summary_table = pd.DataFrame({
    'd+': D_plus.round(4),
    'd-': D_minus.round(4),
    'D+': D_plus_norm.round(4),
    'D-': D_minus_norm.round(4),
    'g+': R_plus.round(4),
    'g-': R_minus.round(4),
    'G+': G_plus_norm.round(4),
    'G-': G_minus_norm.round(4)
}, index=supplier_labels)

print("\n■ Зведена таблиця (TOPSIS + GRA):")
print(tabulate(summary_table.round(4), headers='keys', tablefmt='grid'))
GRA_scores = R_plus / (R_plus + R_minus)
GRA_TOPSIS = 0.5 * C_scores + 0.5 * GRA_scores
ranking = GRA_TOPSIS.rank(ascending=False).astype(int)

result_df = pd.DataFrame({
    'TOPSIS Score': C_scores.round(4),
    'GRA Score': GRA_scores.round(4),
    'GRA-TOPSIS': GRA_TOPSIS.round(4),
    'Ранг': ranking
})

```

```

})
print("\n❏ Підсумок GRA-TOPSIS:")
print(tabulate(result_df.sort_values("Ранг"), headers='keys', tablefmt='pretty'))

# === Інтегральна близькість та аналіз чутливості ===

preference_factors = [0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0]
ranking_matrix = []

# Розрахунок ранжувань для кожного η
for eta in preference_factors:
    T_i = eta * C_scores + (1 - eta) * GRA_scores
    rank = T_i.rank(ascending=False).astype(int)
    ranking_matrix.append(rank.values)

# Побудова таблиці
supplier_labels = [f"Постачальник{i+1}" for i in range(len(C_scores))]
ranking_df = pd.DataFrame(ranking_matrix, columns=supplier_labels)
ranking_df.insert(0, "η", [f"{v:.1f}" for v in preference_factors])

print("\n❏ Результати ранжування альтернатив залежно від η:")
print(tabulate(ranking_df, headers='keys', tablefmt='fancy_grid'))
# Об'єднана таблиця
combined_ranking_df = pd.DataFrame({
    "SAW": saw_result["Ранг"],
    "ARAS": aras_result["Ранг"],
    "GRA-TOPSIS": result_df["Ранг"]
})

# Побудова лінійчатої діаграми
plt.figure(figsize=(10, 5))
for supplier in combined_ranking_df.index:
    plt.plot(combined_ranking_df.columns, combined_ranking_df.loc[supplier],
            marker='o', label=supplier)

plt.title("Лінійчата діаграма: Зміна рангів постачальників за методами")
plt.xlabel("Метод")
plt.ylabel("Ранг (1 = найкращий)")
plt.gca().invert_yaxis()
plt.grid(True)
plt.legend(title="Постачальник")
plt.tight_layout()
plt.show()

```