

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПОТОКІВ У ПОСТАЧАННІ ПРОДОВОЛЬСТВА

Дармосюк В.М., канд. фіз.-мат. наук, доцентка
Миколаївський національний аграрний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3275-8249>

Анотація. У доповіді розглянуто питання математичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації логістичних потоків у сфері постачання продовольства. Акцент зроблено на необхідності врахування суперечливих критеріїв, таких як витрати, час доставки, якість продукції та надійність постачань. Проаналізовано метод Парето-оптимальності. Представлено огляд інформаційних систем управління логістикою, що реалізують методи багатокритеріальної оптимізації.

Ключові слова: логістичні потоки, багатокритеріальна оптимізація, Парето-оптимальність, логістичні інформаційні системи.

У сучасних умовах глобалізації та цифровізації питання ефективного управління логістичними потоками у сфері постачання продовольства набуває особливої актуальності. Постачання харчових продуктів вимагає точного планування, швидкої адаптації до змін попиту, урахування часових обмежень і забезпечення збереження якості товару. Оскільки логістичні процеси є складними багатофакторними системами, для ухвалення обґрунтованих рішень виникає потреба у використанні методів математичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації.

Багатокритеріальні моделі дають змогу одночасно враховувати кілька суперечливих цілей, таких як мінімізація витрат, скорочення часу доставки, підвищення надійності постачань і зменшення впливу на довкілля. Математичне моделювання логістичних процесів часто передбачає формулювання задачі як задачі лінійного або цілочисельного програмування, орієнтованої на мінімізацію загальних витрат. Проте у реальних умовах виникає необхідність оптимізації за кількома, нерідко конфліктними, критеріями. Наприклад, прагнення мінімізувати витрати може суперечити вимогам щодо максимальної швидкості доставки або збереження якості продукції. У таких випадках класичні методи одномірної оптимізації виявляються неефективними, і застосовуються спеціалізовані багатокритеріальні підходи. Найпоширенішими серед них є метод вагових коефіцієнтів (агрегація критеріїв у єдину цільову функцію), метод Парето-оптимальності (визначення набору компромісних рішень) та метод цільового програмування (мінімізація відхилення від заданих цілей).

Розглянемо більш детально метод Парето-оптимальності (або Парето-ефективності), який ґрунтується на понятті Парето-домінування: рішення A вважається Парето-допустимим (або Парето-оптимальним), якщо не існує

іншого рішення B , яке було б не гірше за всіма критеріями і строго кращим хоча б за одним. Формально, нехай маємо множину рішень X , та вектор функцій критеріїв $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$. Рішення $x^* \in X$ називається Парето-оптимальним, якщо не існує такого $x \in X$, для якого:

$$f_i(x) \leq f_i(x^*), \forall i = 1, \dots, k \quad \text{і} \quad \exists j; f_j(x) < f_j(x^*)$$

Множина всіх Парето-оптимальних рішень формує так звану множину Парето. Критерії:

$f_1(x)$: загальні витрати на транспортування (мінімізуються),

$f_2(x)$: загальний час доставки (також мінімізується),

$f_3(x)$: загальний обсяг втрат якості продукту в дорозі (мінімізується).

Рішення, яке має найнижчі витрати, може передбачати довший час у дорозі або більші втрати якості. Метод Парето дозволяє побудувати множину рішень, з яких кожне є компромісом, але жодне не є абсолютно кращим за інші за всіма критеріями.

У логістичних інформаційних системах метод Парето реалізується через побудову набору Парето-оптимальних рішень, які демонструються логісту або менеджеру для остаточного вибору або через інтерактивні системи, де користувач поступово уточнює свої пріоритети (наприклад, готовність підвищити витрати на 10%, щоб зменшити втрати якості на 30%). На практиці багатокритеріальні методи реалізовані у різноманітних системах управління логістикою (табл. 1).

Таблиця 1

Системи управління з реалізацією багатокритеріальних методів

Інформаційна система	Основні функції	Алгоритми багатокритеріальної оптимізації
SAP Transportation Management (SAP TM)	Оптимізація маршрутів, врахування витрат і термінів доставки	Genetic Algorithm (GA), модифікований метод зважених сум (Modified Weighted Sum Method), метод послідовної оптимізації (Sequential Optimization), евристики локального пошуку (Local Search Heuristics)
Oracle Transportation Management (OTM)	Багатокритеріальна маршрутизація, управління перевізниками	NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), адаптивне цільове програмування (Adaptive Goal Programming), алгоритми динамічного програмування (Dynamic Programming)
Infor Nexus Supply Chain	Прогнозування постачань, оптимізація логістики, контроль якості	Метод обмежень (ϵ -constraint method), інтерактивні методи прийняття рішень (Interactive Decision Making), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)
Blue Yonder Luminate Platform	AI-підтримка прогнозування та оптимізації, адаптивна логістика	Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO), Deep Reinforcement Learning (DRL) для багатокритеріальної оптимізації, нечіткі методи прийняття рішень (Fuzzy Decision Making)
Transporeon	Оптимізація витрат, підбір перевізників	Мурашині алгоритми (Ant Colony Optimization), Simulated Annealing для багатокритеріальних задач, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

Всі ці системи забезпечують автоматизацію складних процесів планування та дозволяють приймати рішення з урахуванням кількох критеріїв одночасно. У таких системах, як SAP Transportation Management (SAP TM) чи Blue Yonder, множина Парето може будуватись за допомогою евристичних або еволюційних алгоритмів, наприклад Genetic Algorithms (NSGA-II), Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO).

Використання методів багатокритеріальної оптимізації у сфері продовольчої логістики супроводжується низкою суттєвих викликів. Зокрема, однією з основних проблем є нестабільність попиту, яка обумовлює труднощі в прогнозуванні обсягів постачання та плануванні логістичних процесів. Додатковим ускладненням виступають зміни умов транспортування, що можуть впливати на тривалість доставки, витрати та збереження якості продукції. Окрім цього, особливу складність становить об'єктивна оцінка втрат якості харчових продуктів у процесі логістичних операцій, оскільки такі втрати можуть мати багатofакторний характер і залежать від широкого спектра фізико-хімічних та організаційних параметрів.

Математичне моделювання і багатокритеріальна оптимізація логістичних потоків у постачанні продовольства є ефективним інструментом для підвищення стійкості та ефективності ланцюгів постачання. Реальні інформаційні системи, такі як SAP TM, Oracle OTM і Blue Yonder, демонструють практичну реалізацію цих методів, дозволяючи компаніям оптимізувати витрати, забезпечувати своєчасні поставки і підвищувати якість обслуговування споживачів. У майбутньому все більше значення матимуть інтегровані рішення на основі великих даних та штучного інтелекту, що відкриває нові можливості для цифрової трансформації продовольчої логістики.

Список використаних джерел

1. Fathi M. R., Zamanian A., Khosravi A. Mathematical modeling for sustainable agri-food supply chain. Environment, Development and Sustainability. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-02992-w>.
2. Fang J., Zhou W., Xiong L. Multi-criteria decision making approach for supplier selection and order allocation in a digital supply chain resilience. Annals of Operations Research. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06435-1>.

Анотація. The report discusses the issues of mathematical modelling and multi-criteria optimisation of logistics flows in the food supply sector. The emphasis is placed on the need to take into account conflicting criteria, such as costs, delivery time, product quality and reliability of supply. The Pareto-optimality method is analysed. An overview of logistics management information systems that implement multi-criteria optimisation methods is presented.

Ключові слова: logistics flows, multi-criteria optimisation, Pareto-optimality, logistics information systems.