НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна робота
На правах рукопису

АКІМОВ ДМИТРО ДМИТРОВИЧ

УДК 004.9:519.8:656.02

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ДОСТАВКИ ТОВАРІВ В МЕРЕЖЕВИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність 122 Комп’ютерні науки
Галузь знань 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів

Мають посилання на відповідне джерело

_____ Дмитро АКІМОВ

Науковий керівник:
Валерій ГАВРИЛЕНКО
доктор фізико-математичних
наук, професор

Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Акімов Д. Д. Методи та моделі інформаційних процесів доставки товарів в мережевих логістичних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки. – Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розробці та дослідженню методів і моделей інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах, що характеризуються складними багатовимірними зв’язками між виробниками, споживачами та центрами акумуляції ресурсів. У роботі обґрунтовується доцільність переходу від класичних двоіндексних постановок транспортних задач до багатоіндексних, оскільки це дає змогу враховувати ширший спектр факторів (тип ресурсів, вид транспорту, пропускну здатність центрів акумуляції, особливості попиту тощо), які суттєво впливають на ефективність логістичних процесів.

У роботі запропоновано метод і алгоритм визначення зони раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів, що базуються на модифікації гірського методу кластеризації й методу центру ваги. Вони враховують не тільки відстань між об’єктами, а й попит та пропускну спроможність центрів. Запропонований підхід дає змогу визначити зони раціонального розташування центрів акумуляції, уникаючи надмірних витрат на зберігання й транспортування.

Також розроблено метод проіндексованих елементів для розв’язання п’ятиіндексної задачі розподілу ресурсів транспортного типу, що базується на методі нуль-перетворень, розширеного до п’ятиіндексної постановки. Створено відповідне програмне забезпечення, з використанням сучасних інформаційних технологій, яке реалізує зазначені методи й алгоритми та дає змогу автоматизувати інформаційні процеси доставки товарів у складних мережевих системах.

Результати дослідження підтверджують, що впровадження запропонованих рішень дозволяє зменшити загальну вартість перевезень, скоротити час обслуговування логістичних ланцюгів і підвищити їхню гнучкість та стійкість до змін навколишнього середовища.

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці методів і моделей для визначення зон раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів та для розв'язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу, із подальшою реалізацією в інформаційних системах.

В рамках досягнення цієї мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Аналіз методів визначення зон розташування центрів акумуляції ресурсів, методів вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу та наближених методів розв’язання задач розподілу ресурсів у мережевих логістичних системах.
2. Удосконалення моделі розв’язання багатоіндексної задачі транспортного типу шляхом інтеграції етапу раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів.
3. Створення методу визначення зони раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів для забезпечення адаптивності та ефективності логістичної мережі, з подальшою інтеграцією в інформаційні системи управління ресурсами.
4. Розробка методу розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, орієнтованого на програмну реалізацію в реальному часі або близькому до нього, з урахуванням параметрів, що характерні для великих мережевих логістичних систем.
5. Створення алгоритму вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу у вигляді модуля інформаційної системи, який запобігає виродженості при побудові опорного плану та скорочує час обрахунку порівняно з класичними методами (зокрема методом потенціалів).
6. Розробка інформаційної системи, що реалізує описані методи та алгоритми, забезпечуючи інформаційно-аналітичну підтримку логістичних процесів у мережевих системах, включно з інструментами для візуалізації рішень.

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси доставки товарів у мережевих логістичних системах.

Предметом дослідження є моделі та методи комп'ютерної реалізації інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах.

Методи дослідження, застосовані в дисертаційній роботі, поєднують:

- кластерний аналіз застосований для структуризації даних і розроблення алгоритмів визначення зон раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів з урахуванням відстані, попиту та пропускної спроможності логістичної мережі;
- методи математичного програмування використані для постановки та розв'язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу;
- методи математичного моделювання – для оцінки ефективності алгоритмів і їх програмної реалізації в реальних логістичних сценаріях;
- методи моделювання, використані для розробки архітектури програмного забезпечення «LAP» та інтеграції функціональних модулів автоматизації процесів розподілу ресурсів;
- методи порівняльного аналізу – для оцінки переваг запропонованого підходу у порівнянні з класичними методами рішення задач транспортного типу та верифікації результатів оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці методів та моделей інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах, що забезпечують підвищення ефективності функціонування логістичних процесів та їх адаптацію до змінних умов управління потоками ресурсів.

Вперше:

- Розроблено паралельний декомпозиційний підхід до розв'язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу, який поєднує метод проіндексованих елементів із процедурою ітеративного узгодження локальних планів, що дає змогу розподіляти загальну задачу на низку підзадач, які можуть розв'язуватись незалежно та паралельно з подальшою координацією для досягнення глобально узгодженого рішення, забезпечуючи при цьому не лише

стабільну збіжність алгоритму, але й істотне зростання обчислювальної ефективності та масштабованості підходу, що підтверджується прискоренням обчислень у 2.5 рази (при розмірності задачі 10^3) порівняно з послідовними алгоритмами, що є критично важливим для оперативного прийняття рішень у великих корпоративних системах.

Удосконалено:

– Метод раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів у мережевих логістичних системах, який базується на розширенні методів кластеризації та враховує не лише географічні особливості, а й попит на ресурси й пропускну спроможність центрів. Це дало змогу комплексно визначати зони ефективного розміщення ЦАР з урахуванням просторових та кількісних параметрів.

– Модель розв’язання багатоїндексної розподільчої задачі транспортного типу за рахунок введення попереднього етапу визначення раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів.

– Метод розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, який модифікує класичний метод нуль-перетворень для триіндексних задач і поширює його на п’ятиіндексну постановку, що дає змогу ефективно обробляти великі обсяги вхідних даних і значну кількість змінних, характерних для сучасних логістичних систем, із детальним урахуванням виробничих потужностей, потреб споживачів, особливостей ресурсів і характеристик транспортних засобів, причому така модифікація забезпечує зменшення середнього часу розрахунку на 50% (при розмірності задачі 10^3) порівняно з методом потенціалів.

Отримало подальший розвиток:

– Підхід до розв’язання багатоіндексних задач транспортного типу за допомогою комп’ютерних програм, що дає змогу скоротити кількість ітерацій порівняно з класичними методами (зокрема методом потенціалів) і знижує ризик виродженості під час побудови опорного плану. Це підвищує стабільність та точність отриманих результатів, особливо в умовах реальних логістичних сценаріїв з великою кількістю параметрів.

– Підхід до управління розподілом ресурсів у мережевих логістичних

системах за рахунок урахування динамічних логістичних параметрів (коливань попиту, змін пропускної спроможності, ресурсних обмежень), що забезпечує гнучке коригування рішень і підвищує адаптивність систем.

Практична значимість отриманих результатів: практична значимість полягає у створенні комп'ютерних засобів для інформаційно-аналітичної підтримки планування та управління логістичними процесами у мережевих системах. Зокрема:

1. Удосконалений метод розв'язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу дозволяє швидше обробляти великі обсяги даних у логістичних мережах з урахуванням п'яти ключових індексів: постачальників, споживачів, ЦАР, типу вантажу та автомобіля.
2. Розроблений паралельний декомпозиційний підхід забезпечує значне зменшення часу обчислень у задачах великої розмірності та адаптований для використання в багатоядерних обчислювальних середовищах.
3. Реалізовані програмні модулі застосунку LAP, створені на основі розроблених методів, реалізовані та інтегровані в існуючі логістичні системи підприємства ПрАТ «МХП» (акт впровадження в додатку Д), що дозволило зменшити витрати на транспортування агропродукції на 11%.
4. Отримані результати сприяють підвищенню ефективності функціонування логістичних систем, зокрема щодо планування доставки, оптимального використання ресурсів, а також зниження рівня простою та втрат у логістичних процесах.
5. Запропоновані рішення використовуються економістами та фінансистами підприємств для планування і фактичного розрахунку логістичних витрат.

Таким чином, запропоновані методи та алгоритми у вигляді програмних рішень суттєво підвищують рівень автоматизації планування, оптимізують використання обмежених ресурсів, а отже, стають ефективним інструментом для практичного застосування у сфері логістики та суміжних галузях.

Апробація основних теоретичних і практичних результатів дисертації на підприємстві підтверджується відповідним актом про впровадження, який можна

подивитись у додатку 5.

Результати дисертації можуть бути впроваджені в навчальні програми для студентів, які вивчають розробку інформаційних систем, моделювання логістичних процесів та оптимізацію постачань, що сприятиме підвищенню якості підготовки майбутніх фахівців у галузі комп'ютерних наук і логістики. Окрім цього, результати роботи були використані в науково-дослідній роботі «Системні дослідження та інформаційні технології у транспортній галузі, телекомунікаціях, промисловості та бізнесі» з реєстраційним номером 0124U003679, в якій Акімовим Д.Д. були проведені роботи у розділі 3, а саме проектування інформаційної системи для даної роботи.

Особистий внесок здобувача у дисертації полягає в проведенні комплексного аналізу інформаційних процесів у мережевих логістичних системах, формалізації багатоіндексних задач транспортного типу, а також у розробленні нових методів та моделей їх розв'язання з урахуванням реальних обмежень та динаміки логістичних мереж.

Особливу увагу приділено побудові програмного прототипу інформаційної системи, що реалізує запропоновані алгоритми та забезпечує ефективну обробку великих обсягів логістичних даних. Система дозволяє інтегрувати модулі оптимізації постачань, візуалізації рішень і аналізу результатів, що значно покращує зручність користування та аналітичні можливості.

Отримані результати дисертації можуть бути використані для створення адаптивних програмних рішень у сфері логістики, підвищення ефективності управління ланцюгами постачань, а також для удосконалення інформаційного забезпечення в системах прийняття рішень. Крім того, ці результати можуть застосовуватись у навчальному процесі для підготовки спеціалістів у сфері розробки прикладного програмного забезпечення для логістики та управлінських інформаційних систем.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, у яких послідовно викладено теоретичний та прикладний матеріал, та висновків, що узагальнюють отримані результати і визначають перспективи подальших досліджень.

У *першому розділі* дисертації здійснено критичний аналіз класичних методів і моделей розв’язання задач розподілу ресурсів транспортного типу, які історично застосовуються в логістиці. Встановлено, що в умовах сучасних мережевих логістичних систем такі підходи виявляються недостатньо гнучкими для ефективного управління інформаційними процесами доставки товарів. Зокрема, виявлено, що класичні моделі не враховують динамічну зміну попиту, обмеження пропускної спроможності мережі, особливості складування та диференціацію типів ресурсів. Обґрунтовано необхідність формування нових, багатоіндексних моделей, здатних комплексно описувати складні взаємозв’язки між постачальниками, проміжними логістичними центрами та кінцевими споживачами. Особливу увагу приділено аналізу ефективності існуючих методів — зокрема, методу потенціалів і методу мінімальних витрат — та виявлено низку обмежень, що виникають при їх застосуванні у масштабних інформаційних системах. Визначено, що практичне використання таких методів часто пов’язане з труднощами побудови опорного плану, обробкою великих обсягів даних та ризиком отримання неприпустимих рішень. Окремо проаналізовано моделі раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів, що є ключовим компонентом інформаційних процесів доставки товарів у мережевому середовищі. У результаті сформульовано основні вимоги до нових моделей і методів, здатних забезпечити адаптивне управління ресурсами з урахуванням просторово-часових характеристик попиту, обмежень мережі та необхідності масштабування.

У другому розділі дисертації сформовано теоретичну основу для побудови багатоіндексних моделей розподільчих задач транспортного типу, що є складовою інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах. Основну увагу зосереджено на п’ятиіндексній моделі, яка враховує взаємодію між основними елементами логістичної мережі: виробничими одиницями, центрами акумуляції, точками споживання, типами товарів і часовими параметрами. Досліджено властивості запропонованої постановки задачі, зокрема умови збалансованості, допустимість рішень та критерії оптимальності, а також визначено галузі її практичного застосування. Описано методи, що дозволяють

підвищити ефективність обробки даних у таких моделях, зокрема метод декомпозиції, який дає змогу розділяти велику задачу на керовані підзадачі з подальшою узгодженою оптимізацією. Водночас розглянуто алгоритмічні підходи до визначення належності об'єктів до центрів акумуляції з урахуванням змін у структурі попиту та логістичної інфраструктури. Результатом стало формування цілісної теоретичної моделі, придатної до впровадження в інформаційні системи підтримки прийняття рішень.

У третьому розділі дисертації зосереджено увагу на побудові конкретних методів розв'язання задач, сформульованих у попередньому розділі, з урахуванням особливостей мережевих логістичних систем. Запропоновано метод розміщення центрів акумуляції ресурсів на основі модифікованого "гірського" алгоритму, що враховує як географічні координати, так і пропускну спроможність, структуру попиту та можливості адаптації до змін. Для удосконалення отриманого розміщення використано метод центру тяжіння, який забезпечує оперативне коригування конфігурації мережі. Розроблено метод проіндексованих елементів для розв'язання п'ятиіндексної задачі, який дозволяє ефективно знаходити припустимі розв'язки з можливістю їх швидкої адаптації до нових умов. На основі запропонованого підходу здійснено формалізацію покрокової процедури, що забезпечує стабільність обчислень у великих інформаційних системах. Також доведено доцільність застосування методу декомпозиції в реальних логістичних сценаріях, що підтверджується результатами моделювання.

У четвертому розділі дисертації представлено програмну реалізацію розроблених методів у вигляді функціонального модуля інформаційної системи для управління процесами доставки товарів у мережевому середовищі. Програмний комплекс реалізує автоматизоване визначення оптимального розміщення центрів акумуляції, розв'язання п'ятиіндексної задачі з використанням розробленого методу проіндексованих елементів, а також функціонал оцінювання ефективності розподілу. Проведено тестування програмного модуля на задачах різної розмірності, що дозволило підтвердити його працездатність, точність і швидкодію. Наведено опис структури інтерфейсу користувача, логіки обміну даними та

рекомендації щодо інтеграції модуля до корпоративних інформаційних систем логістичних компаній. Результати експериментів доводять, що використання запропонованого програмного забезпечення сприяє зменшенню витрат на транспортування й зберігання, підвищенню точності планування та адаптивності логістичних рішень.

Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленого програмного рішення для підтримки управлінських рішень у мережевих логістичних системах. Використання програмного модуля забезпечує автоматизацію процесу планування розподілу ресурсів, підвищує точність розрахунків та сприяє зменшенню витрат на транспортування і зберігання.

Загалом викладений матеріал підтверджує ефективність поєднання багатоіндексних моделей із адаптивними методами пошуку оптимального розподілу ресурсів і належить до перспективних напрямів розвитку теорії й практики логістики.

Ключові слова: алгоритм, метод, модель, логістична система, розподільча задача транспортного типу, центри акумуляції ресурсів, дослідження операцій, математичне моделювання, інформаційні системи, інформаційні технології, аналіз даних, кластерний аналіз, перевезення, транспортна логістика, оптимізація.

SUMMARY

Akimov D.D. *Methods and Models of Information Processes for Goods Delivery in Networked Logistics Systems*. – A qualification scientific work as a manuscript. Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty 122 – Computer Science. – National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the development and investigation of methods and models of information processes for goods delivery in networked logistics systems, which are characterized by complex multidimensional relationships among producers, consumers, and resource accumulation centers. The study substantiates the relevance of transitioning from classical two-index formulations of transportation problems to multi-index ones, as this enables the consideration of a broader range of factors (such as resource types, transport modes, capacity constraints of accumulation centers, and demand features) that significantly affect logistics efficiency.

The research proposes a method and algorithm for determining rational zones for the placement of resource accumulation centers, based on a modified mountain clustering method and the center of gravity method. These approaches take into account not only distances between objects but also demand and capacity constraints. The proposed method allows for the identification of rational placement zones while avoiding excessive storage and transportation costs.

A method of indexed elements is also developed to solve a five-index transportation-type resource allocation problem, based on the zero-transformation method extended to a five-index formulation. Corresponding software has been created to implement the proposed methods and algorithms, enabling the automation of information processes for goods delivery in complex networked systems.

The results confirm that implementation of the proposed solutions allows for a reduction in total transportation costs, decreased servicing time of logistics chains, and increased flexibility and resilience to environmental changes.

The purpose of the dissertation focuses on the development of methods and models for determining the zones of rational placement of resource accumulation centers and for solving multi-index distribution problems of the transportation type, with subsequent implementation in information systems.

To achieve this objective, the following tasks are addressed in the work:

1. Analysis of methods for determining the locations of resource accumulation centers, methods for solving multi-index transportation-type distribution problems, and approximate methods for resource allocation in networked logistics systems.
2. Improvement of the multi-index transportation problem-solving model through the integration of a rational placement stage for resource accumulation centers.
3. Development of a method for determining the zones of rational placement of resource accumulation centers to ensure the adaptability and efficiency of the logistics network, followed by integration into resource management information systems.
4. Development of a method for solving the multi-index distribution problem of the transportation type, oriented toward real-time or near-real-time software implementation, taking into account parameters typical for large networked logistics systems.
5. Creation of an algorithm for solving multi-index distribution problems of the transportation type in the form of an information system module that prevents degeneration during the construction of the basic feasible plan and reduces computation time compared to classical methods (in particular, the potential method).
6. Development of an information system that implements the described methods and algorithms, providing informational and analytical support for logistics processes in networked systems, including tools for solution visualization.

The object of study are information processes of goods delivery in network logistics systems.

The subject of study are models and methods for computer implementation of these information processes.

The research methods applied in the dissertation combine the following approaches:

– Cluster analysis applied for data structuring and the development of algorithms to determine the zones of rational placement of resource accumulation centers, taking into account distance, demand, and the throughput capacity of the logistics network;

– Linear programming methods used for the formulation and solution of multi-index distribution problems of the transportation type;

– Mathematical modeling methods applied to assess the efficiency of the algorithms and their software implementation in real logistics scenarios;

– Modeling methods used for the development of the "LAP" software architecture and the integration of functional modules for automating resource distribution processes;

– Comparative analysis methods employed to evaluate the advantages of the proposed approach compared to classical methods for solving transportation-type problems and to verify the optimization results.

Scientific Novelty of the obtained results lies in the development of methods and models of information processes for goods delivery in networked logistics systems, aimed at enhancing the efficiency of logistics processes and ensuring their adaptability to changing resource flow management conditions.

For the first time:

– A parallel decomposition approach has been developed for solving multi-index transportation-type distribution problems. This approach combines the method of indexed elements with an iterative coordination procedure for local plans, enabling the decomposition of the overall problem into a set of independent subproblems that can be solved in parallel, with subsequent coordination to achieve a globally consistent solution. The approach ensures not only stable algorithm convergence but also significantly enhances computational efficiency and scalability, as evidenced by a 2.5-fold speedup (for problem size 10^3) compared to sequential algorithms, which is critical for rapid decision-making in large-scale corporate systems.;

Improvements include:

– The method for rational placement of resource accumulation centers in networked logistics systems has been enhanced by extending clustering methods and considering not only geographical features but also resource demand and the throughput capacity of

centers. This improvement enables a comprehensive determination of effective placement zones, taking into account spatial and quantitative parameters;

– A method for the rational placement of resource accumulation centers (RACs) in networked logistics systems has been improved. It is based on an extended clustering technique that considers not only geographic features but also resource demand and the throughput capacity of the centers. This enables a comprehensive identification of effective RAC locations, considering both spatial and quantitative parameters;

– The method for solving the multi-index transportation-type distribution problem has been enhanced by modifying the classical zero transformation method for three-index problems and extending it to a five-index formulation. This allows efficient processing of large input datasets and numerous variables, typical of modern logistics systems, with detailed consideration of production capacities, consumer needs, resource specifics, and vehicle characteristics. The proposed modification reduces the average computation time by 50% (for problem size 10^3) compared to the potential method;

Further developed:

– The approach to solving multi-index transportation problems using computer programs has been further developed, allowing the reduction of the number of iterations compared to classical methods (in particular, the potential method) and decreasing the risk of degeneracy during the construction of the basic feasible plan. This enhances the stability and accuracy of the obtained results, especially in real-world logistics scenarios involving a large number of parameters.

– The approach to resource distribution management in networked logistics systems has been further developed by incorporating dynamic logistics parameters (such as demand fluctuations, changes in throughput capacity, and resource constraints), ensuring flexible decision adjustments and improving the adaptability of the systems.

Practical significance lies in the development of computer-based tools for information and analytical support of planning and management of logistics processes within networked systems. In particular:

1. The improved method for solving the multi-index transportation-type distribution problem enables faster processing of large data volumes in logistics networks, taking into

account five key indices: suppliers, consumers, resource accumulation centers (RACs), cargo types, and vehicles.

2. The developed parallel decomposition approach significantly reduces computation time in large-scale problems and is adapted for use in multicore computing environments.

3. The implemented software modules, based on the developed methods, have been integrated into the existing logistics systems of PrJSC "MHP" (implementation act provided in Appendix D), resulting in an 11% reduction in agricultural product transportation costs.

4. The obtained results contribute to improving the efficiency of logistics systems, particularly in terms of delivery planning, optimal resource utilization, and reduction of downtime and losses in logistics processes.

5. The proposed solutions are used by enterprise economists and financial specialists for planning and actual calculation of logistics costs.

Thus, the proposed methods and algorithms, implemented as software solutions, significantly increase the level of automation in planning, optimize the use of limited resources, and therefore become effective tools for practical application in logistics and related fields.

The approbation of the main theoretical and practical results of the dissertation at the enterprise is confirmed by the corresponding implementation certificate, which can be found in Appendix 5.

The dissertation results can be integrated into educational programs for students studying information systems development, logistics process modeling, and supply chain optimization, thereby enhancing the quality of training for future specialists in computer science and logistics. Additionally, the results were applied in the research project “System Studies and Information Technologies in the Transport Industry, Telecommunications, Industry, and Business” (registration number 0124U003679), in which D. Akimov carried out the work described in Section 3, namely the design of the information system for this project.

The author's personal contribution to the dissertation includes conducting a

comprehensive analysis of information processes in networked logistics systems, formalizing multi-index transportation-type problems, and developing new methods and models for their solution, taking into account real-world constraints and the dynamics of logistics networks.

Special attention was given to the development of a software prototype of an information system that implements the proposed algorithms and ensures effective processing of large volumes of logistics data. The system allows integration of modules for supply optimization, solution visualization, and results analysis, greatly improving usability and analytical capabilities.

The obtained dissertation results can be used to create adaptive software solutions in the logistics field, improve supply chain management efficiency, and enhance decision-support systems. Furthermore, these results can be applied in the educational process to train specialists in the development of application software for logistics and management information systems.

The dissertation consists of an introduction, four chapters presenting theoretical and applied materials in a logical sequence, and conclusions summarizing the obtained results and outlining prospects for further research.

The first chapter of the dissertation presents a critical analysis of classical methods and models for solving transportation-type resource allocation problems, which have been historically applied in logistics. It has been established that in the context of modern networked logistics systems, such approaches prove to be insufficiently flexible for the effective management of information processes related to goods delivery. In particular, it has been identified that classical models do not account for dynamic demand fluctuations, network capacity constraints, warehousing specifics, and differentiation of resource types. The need to develop new, multi-index models capable of comprehensively describing complex interconnections among suppliers, intermediate logistics centers, and end consumers is substantiated. Special attention is given to the analysis of the efficiency of existing methods — in particular, the potential method and the least-cost method — and a number of limitations have been revealed in their application within large-scale information systems. It is determined that the practical use of these methods is often

associated with difficulties in constructing a feasible basic solution, processing large data volumes, and the risk of obtaining infeasible results. Separate analysis is devoted to models of rational placement of resource accumulation centers, which are a key component of information processes for goods delivery in network environments. As a result, the main requirements for new models and methods have been formulated, aiming to provide adaptive resource management with consideration of the spatiotemporal characteristics of demand, network constraints, and the necessity of scalability.

The second chapter of the dissertation develops the theoretical foundation for constructing multi-index models of transportation-type distribution problems as part of the information processes of goods delivery in networked logistics systems. The primary focus is placed on a five-index model that accounts for the interaction between the main elements of the logistics network: production units, accumulation centers, consumption points, product types, and temporal parameters. The properties of the proposed problem formulation are examined, including balance conditions, feasibility of solutions, and optimality criteria, as well as its practical application areas. Methods for improving data processing efficiency in such models are described, in particular, the decomposition method, which allows large problems to be divided into manageable subproblems with subsequent coordinated optimization. Additionally, algorithmic approaches to determining the assignment of objects to accumulation centers are considered, taking into account changes in demand structure and logistics infrastructure. The result is the formulation of a coherent theoretical model suitable for implementation in decision support information systems.

The third chapter of the dissertation focuses on the development of specific solution methods for the problems formulated in the previous chapter, taking into account the features of networked logistics systems. A method for placing resource accumulation centers is proposed, based on a modified “hill” algorithm that considers geographical coordinates, capacity constraints, demand structure, and adaptability to changes. To improve the obtained layout, the center-of-gravity method is applied, enabling rapid reconfiguration of the network structure. A method of indexed elements is developed to solve the five-index problem, allowing efficient discovery of feasible solutions with the

potential for rapid adaptation to new conditions. Based on the proposed approach, a step-by-step procedure has been formalized to ensure computational stability in large-scale information systems. The applicability of the decomposition method in real-world logistics scenarios has also been demonstrated, supported by modeling results.

The fourth chapter presents the software implementation of the developed methods in the form of a functional module of an information system for managing goods delivery processes in a networked environment. The software suite enables automated determination of optimal accumulation center placement, solution of the five-index problem using the proposed indexed elements method, and functionality for evaluating distribution efficiency. The module has been tested on problems of various scales, confirming its reliability, accuracy, and performance. The structure of the user interface, data exchange logic, and recommendations for integration into corporate logistics information systems are described. Experimental results demonstrate that the use of the proposed software contributes to reduced transportation and storage costs, improved planning accuracy, and increased adaptability of logistics decisions.

The results obtained across all chapters of the dissertation confirm the effectiveness of the proposed models and methods for supporting information processes of goods delivery in complex networked logistics systems. The robustness of the resulting plan to fluctuations in input parameters.

Keywords: algorithm, method, model, logistics system, transportation-type distribution problem, resource accumulation centers, operations research, mathematical modeling, information systems, information technologies, data analysis, cluster analysis, transportation, transport logistics, optimization.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

1. Akimov D. Application of the decomposition method for solving the five-index transportation problem in logistic systems // Modern Engineering and Innovative Technologies. – 2025. – Vol. 2, no. 37. – P. 68–73. – ISSN 2567-5273. – DOI: 10.30890/2567-5273.2025-37-02-059.
URL: https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit37-02/meit37-02

2. Akimov D. Analysis of approaches to modeling uncertainty in logistics information systems // Colloquium Journal. – 2025. – Vol. 235, no. 1. – P. 5–8. – ISSN 2520-6990, eISSN 2520-2480. – DOI: 10.5281/zenodo.14956604.
URL: https://zenodo.org/records/14956604

Публікації у фахових наукових виданнях України:

3. Акімов Д.Д. Аналіз швидкодії гібридних алгоритмів у транспортних інформаційних системах // Наука і техніка сьогодні. – 2025. – Т. 2, № 43. – С. 1055–1065. – ISSN 2786-6025. – DOI: 10.52058/2786-6025-2025-2(43).
URL: http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/20644/20620

4. Акімов Д.Д., Гавриленко В.В. Розв’язання транспортної задачі в умовах неоднорідності продукції агропромислових підприємств // Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. – 2024. – № 56. – С. 78–85. – ISSN 2524-0552, eISSN 2524-0560. – DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-56-09.
URL: http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/604

5. Акімов Д.Д. Застосування технологій інтернету речей для оптимізації логістики в сільському господарстві // Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. – 2023. – № 53. – С. 9–15. – ISSN 2524-0552, eISSN 2524-0560. – DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-53-02.
URL: http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/474

Публікації у нефахових наукових виданнях України:

6. Акімов Д.Д., Гавриленко В.В., та ін. Щодо балансування навантаження в додатках з використанням інформаційної технології контейнеризації // Automobile Roads and Road Construction. – 2022. – № 112. – С. 227–231. – ISSN 0365-8171. –

DOI: 10.33744/0365-8171-2022-112-227-231. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/112/227-231.pdf

Публікації апробаційного характеру:

7. Акімов Д.Д. Математичні методи розв’язання задачі обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів / Д.Д. Акімов, В.В. Гавриленко // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2021. – К: НУХТ, 2021. – С.212. URL: http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/30_konf_2021.pdf

8. Акімов Д.Д. Методи розв'язання задачі обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів / Д.Д. Акімов, В.В. Гавриленко // Збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 5 листопада, 2021 р. –Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка», 2021. – С.20. Режим доступу: http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/29_konf_2021.pdf

9. Акімов Д.Д. Проблема використання транспортної задачі для обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів / В.В. Гавриленко, Д.Д. Акімов, Д.О. Миронов, А.О. Нефьодова, Ю.О. Руських // Наукові праці Четвертої міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 1–2 лютого 2022 р. (Київ, Україна). – К.: НУХТ, 2022. – С.26-27. URL: http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/36_konf_2022.pdf

10. Акімов Д.Д. Дослідження та впровадження методів розв'язування задачі обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів / В.В. Гавриленко, Д.Д. Акімов // Наук. конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2022, Вип. 78. – С.345. URL: http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/33_konf_2022.pdf

11. Акімов Д.Д. Адаптація балансування навантаження в додатках з використанням технології контейнеризації / І.К. Сисоєв, В.В. Гавриленко, Д.Д.

Акімов, Д.О. Миронов, А.О. Нефьодова, В.В. Левченко // Наукові праці П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 1 червня 2023 р. (Київ, Україна). – К.: НУХТ, 2023. – С.79. URL: http://kist.ntu.edu.ua/konferencii/39_konf_2023.pdf

12. Акімов Д.Д. Збір і вивантаження даних контурів полів в інформаційну систему CropWise, використовуючи методи API / Д.Д. Акімов, В.В. Гавриленко, К.І. Мальцева // Стратегічні напрямки розвитку науки: фактори впливу та взаємодії (м. Харків, 10 травня 2024 р.). – Харків: 2024. – С.119-122. DOI: https://doi.org/10.62731/mcnd-10.05.2024 URL: https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/10.05.2024/64

13. Акімов Д.Д. Підвищення ефективності логістичної діяльності ПрАТ «Миронівський хлібопродукт» (МХП) / Д.Д. Акімов, В.В. Гавриленко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2024. – К: НУХТ, 2024. – С.188. URL:http://kist.ntu.edu.ua/53_konf_2024.pdf

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ 2
SUMMARY 11
ВСТУП 25
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ БАГАТОІНДЕКСНИХ ЗАДАЧ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ У МЕРЕЖЕВИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ 34
1.1 Визначення розподільчої задачі транспортного типу 34
1.2 Аналіз методів визначення зони розташування центрів акумуляції ресурсів у мережевих логістичних системах 39
1.3 Аналіз методів вирішення багатоіндексних розподільчих завдач транспортного типу 43
1.4 Аналіз наближених методів розв’язання задач розподілу ресурсів під час доставки товарів 46
1.5 Побудова моделі поетапного вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу у мережевих логістичних системах 49
1.6 Порівняння існуючих інформаційних систем для логістики 53
Висновки до розділу 1 56
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИРІШЕННЯ БАГАТОІНДЕКСНИХ ЗАДАЧ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ 59
2.1 Формалізація багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу 59
2.2 Властивості багатоіндексної задачі розподільчої задачі транспортного типу в контексті доставки товарів 65
2.3 Області застосування методу вирішення багатоіндексної розподільчої задачі 70
2.4 Застосування методу декомпозиції для вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу у мережевих логістичних системах 73
2.5 Метод розбиття багатоіндексної задачі транспортного типу для паралельного розв’язання 76
2.6 Методи визначення належності об'єкта до центру акумуляції ресурсів у мережевих логістичних системах 80
Висновки до розділу 2 83
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ВИРІШЕННЯ БАГАТОІНДЕКСНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ У МЕРЕЖЕВИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ 86
3.1 Розробка методу раціонального розташування центрів акумулювання ресурсів 86

3.2 Розробка алгоритму визначення зони раціонального розташування центрів акумулювання ресурсів 93
3.3 Розробка методу проіндексованих елементів для вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу 99
3.4 Розробка алгоритму вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу 102
3.5 Постановка і розв'язок експериментальної п’ятиіндексної задачі розподілу ресурсів 111
3.6 Оцінка ефективності застосування методу проіндексованих елементів під час вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу 114
3.7 Паралельна реалізація методу проіндексованих елементів у багатоіндексній задачі транспортного типу 119
Висновки до розділу 3 122
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДОСТАВКИ ТОВАРІВ 125
4.1 Моделювання процесу доставки товарів у мережевих логістичних системах 125
4.2 Модель програмного застосунку «LAP» для автоматизації задач розміщення і розподілу ресурсів у логістичних мережах 127
4.3 Введення, обробка та оптимізація даних у інформаційній системі «LAP» для розв’язання багатоіндексної задачі транспортного типу 131
4.4 Розгортання інформаційної логістичної системи на основі CI/CD-процесів та контейнеризації 136
4.5 Реалізація задачі раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів в інформаційній системі «LAP» 140
4.6 Порівняльна оцінка результатів при варіації умов побудови транспортно-розподільчої системи 154
4.7 Візуалізація витрат підприємства засобами Microsoft Power BI 162
Висновки до розділу 4 171
ВИСНОВКИ 174
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ І ДЖЕРЕЛ 177
ДОДАТКИ 191

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЦАР – центр акумуляції ресурсів.

ТРС – транспортно-розподільча система.

SCM – системи управління ланцюгами постачання (*Supply Chain Management*).

IoT – Інтернет речей (*Internet of Things*).

LP – лінійне програмування (*Linear Programming*).

API – інтерфейс прикладного програмування (*Application Programming Interface*).

KPI – ключові показники ефективності (*Key Performance Indicators*).

ІС – інформаційна система.

ГІС – геоінформаційна система.

МС – мережеві системи.

ІП – інформаційні процеси.

ПЗ – програмне забезпечення.

РТЗ – розподільча транспортна задача.

НП – метод нуль-перетворень.

ГМ – гірський метод.

МЦТ – метод центру тяжіння.

ФОП – функціонально-орієнтований прототип.

СРМ – система розподілу матеріалів.

РПР – ресурсно-планувальні рішення.

TMS – система управління транспортуванням (*Transportation Management System*).

WMS – система управління складом (*Warehouse Management System*).

ERP – система планування ресурсів підприємства (*Enterprise Resource Planning*).

SCM – система управління ланцюгами постачання (*Supply Chain Management*).

RFID – радіочастотна ідентифікація (*Radio-Frequency Identification*).

SaaS – модель програмного забезпечення як послуги (*Software as a Service*).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна господарська діяльність підприємств нерозривно пов’язана з ефективним управлінням потоками матеріальних та інформаційних ресурсів. Це забезпечує доставку товарів споживачеві у належні терміни та з оптимальними витратами. Важливим інструментом у проектуванні та керуванні такими потоками є розподільчі задачі (або задачі призначень), що дозволяють оптимізувати розподіл ресурсів між виробниками та споживачами за певними критеріями, такими як мінімізація витрат чи максимізація прибутку. З огляду на стрімкий розвиток мережевих логістичних систем, що інтегрують виробничі, транспортні та складські процеси в єдину систему, оптимізація цих задач стає критично важливою. Її ефективне вирішення сприяє раціональному використанню ресурсів і зменшенню витрат на доставку товарів, що є ключовим фактором конкурентоспроможності підприємств.

Розв’язання розподільчих задач спирається на математичний апарат системного аналізу, який забезпечує всебічне вивчення взаємозв’язків між елементами логістичних систем [1, 2]. Застосування методів системного аналізу до розподільчих задач дає змогу структуровано підходити до проектування і вдосконалення логістичних мереж, включно з такими компонентами, як інформаційні та транспортно-розподільчі підсистеми. У процесі вирішення розподільчих задач проводяться збір і обробка даних, побудова математичних моделей, вибір і реалізація алгоритмів оптимізації, а також прийняття управлінських рішень щодо використання технічних, технологічних та інших ресурсів. Значний внесок у розробку теоретичних та прикладних аспектів розв’язку розподільчих задач транспортного типу зробили Бауерсокс Д.Дж., Данчук В.Д., Клосс Д.Дж., Крістофер М., Ламберт Д.М., Постан М.Я., Прокудін Г.С., Сток Дж.Р., Флінн Б.Б., Чжао Х., Якмишин Л. та інші [3–9].

З розвитком логістичних процесів класичні методи розв’язання транспортних задач виявилися недостатніми для вирішення складних розподільчих

проблем у багатокомпонентних мережах. Тому поступово виникла потреба у переході від двоіндексних моделей до багатоіндексних. Спочатку основну увагу приділяли задачам призначень, таким як розподіл верстатів між робітниками [10]. Однак зі зростанням масштабів логістичних мереж і збільшенням обсягу даних виникла необхідність у створенні більш адаптивних моделей, здатних аналізувати великі інформаційні потоки, синхронізувати транспортні операції та мінімізувати витрати в розподільчих процесах.

Одним із ключових напрямів розвитку сучасної логістики є впровадження інтегрованих інформаційних технологій для управління розподілом ресурсів. При цьому особливе місце посідають розподільчі центри, що стали центральними вузлами логістичних мереж: вони акумулюють, зберігають і перерозподіляють товари, реагуючи на динамічні зміни попиту. Такі центри не лише полегшують процес доставлення ресурсів до кінцевого споживача, а й підвищують гнучкість системи завдяки можливості своєчасного коригування обсягів поставок і розміщення запасів. У зв’язку з цим зростає актуальність методів аналізу та моделювання потоків даних, що дозволяють оптимізувати планування маршрутів, розташування складів та ефективне використання матеріальних і фінансових ресурсів.

Багатокритеріальна оптимізація належить до найбільш дієвих підходів у розв’язанні таких завдань, оскільки бере до уваги часові, вартісні, технічні й інші параметри при плануванні логістичних операцій. Слід підкреслити, що інформаційні процеси мають визначальне значення як для управління запасами, так і для прогнозування попиту. Упровадження інтелектуальних систем оброблення даних, алгоритмів машинного навчання й оптимізаційних методів покращує точність прогнозів, дозволяючи вчасно коригувати обсяги поставок і зменшувати ризики дефіциту або надлишкового накопичення товарів.

Значна частка витрат у виробничо-транспортній діяльності пов’язана з логістикою – зокрема, з управлінням складами, терміналами, магістральним і розподільчим транспортом. За оцінками, логістичні витрати можуть сягати 50% загальних витрат підприємства [11], що робить питання їхньої оптимізації особливо

актуальним. У зв’язку з цим удосконалення математичних моделей для планування та управління інформаційними потоками є одним із ключових напрямів розвитку логістичних технологій.

Таким чином, сучасні методи інформаційного моделювання доставки товарів у мережевих логістичних системах поєднують математичні підходи до оптимізації, алгоритмічні методи аналізу великих даних та інтелектуальні технології підтримки ухвалення рішень. Подальші дослідження у цій сфері спрямовані на підвищення ефективності управління потоками ресурсів за допомогою автоматизованих систем, що забезпечують гнучкість, адаптивність і економічну доцільність логістичних процесів.

Потреба у більш точних і гнучких підходах до транспортних задач стимулювала наукові дослідження ще у середині XX століття. Класичні праці, такі як робота Франка Л. Гічкока "Розподіл продукту з кількох джерел до численних пунктів призначення"[12], заклали підґрунтя теорії лінійного програмування та оптимального транспортування. У 1950-х роках концепція триіндексної транспортної задачі, розроблена Томасом С. Мотцкіним, стимулювала подальші дослідження у напрямі багатоіндексних постановок [13]. Значний внесок у розвиток цієї галузі зробили Джордж Б. Данциг [14], Лестер Р. Форд, Делберт Р. Фалкерсон [15], Андре Шрайвер [16], Тьєрстен К. Купманс [17], Седрик Віллані [18] та Сергій Т. Рачев [19].

Такі постановки охоплюють декілька факторів або етапів оброблення й транспортування ресурсів, адекватно відтворюючи реальну складність мережевих логістичних систем.

У міру ускладнення логістичних процесів класичні оптимізаційні методи не завжди дозволяють врахувати всі чинники, що визначають розподіл ресурсів. Тому сучасні дослідження зосереджені на розширенні математичних моделей із включенням додаткових параметрів, таких як варіативність попиту, зміна тарифів і похибки оцінок.

Крім того, зміни вхідних даних, спричинені коливаннями попиту, зміною тарифів і неточністю оцінок, відіграють дедалі важливішу роль. Це зумовлює

потребу у впровадженні аналітичних та інтелектуальних методів, які дозволяють враховувати складні залежності та підвищувати точність прогнозування.

Отже, побудова моделей та методів оптимізації інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах потребує:

- аналіз і формалізацію складних багатоіндексних логістичних задач;
- створення алгоритмів раціонального розміщення розподільчих центрів;
- створення методик оцінювання ефективності логістичних рішень в умовах змінних вхідних параметрів;
- уніфіковане інформаційне забезпечення для планування й управління транспортно-розподільчими системами.

У подальших розділах викладаються теоретичні та прикладні аспекти розв’язання таких задач. Розглядаються класичні постановки транспортних задач та їх узагальнення для багатоіндексних випадків, методи вирішення з використанням точних алгоритмів, а також засоби апробації отриманих результатів за допомогою проблемно-орієнтованого програмного забезпечення.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота є завершеним дослідженням, що виконане автором згідно з планами науково-дослідних робіт НТУ в рамках наукових тем кафедри інформаційних систем і технологій, і пов'язана з науково-дослідними роботами «Системні дослідження та інформаційні технології у транспортній галузі, телекомунікаціях, промисловості та бізнесі» (2024р.) Державний реєстраційний номер: 0124U003679.

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці методів і моделей для визначення зон раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів та для розв'язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу, із подальшою реалізацією в інформаційних системах.

В рамках досягнення цієї мети в роботі вирішуються наступні завдання:

1. Аналіз методів визначення зон розташування центрів акумуляції ресурсів, методів вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу та наближених методів розв’язання задач розподілу ресурсів у мережевих

логістичних системах.

2. Удосконалення моделі розв’язання багатоіндексної задачі транспортного типу шляхом інтеграції етапу раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів.

3. Створення методу визначення зони раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів для забезпечення адаптивності та ефективності логістичної мережі, з подальшою інтеграцією в інформаційні системи управління ресурсами.

4. Розробка методу розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, орієнтованого на програмну реалізацію в реальному часі або близькому до нього, з урахуванням параметрів, що характерні для великих мережевих логістичних систем.

5. Створення алгоритму вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу у вигляді модуля інформаційної системи, який запобігає виродженості при побудові опорного плану та скорочує час обрахунку порівняно з класичними методами (зокрема методом потенціалів).

6. Розробка комп’ютерних програм, що реалізують описані методи та алгоритми, забезпечуючи інформаційно-аналітичну підтримку логістичних процесів у мережевих системах, включно з інструментами для візуалізації рішень.

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси доставки товарів у мережевих логістичних системах.

Предметом дослідження є моделі та методи комп’ютерної реалізації інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах.

Методи дослідження, застосовані в дисертаційній роботі, поєднують:

– кластерний аналіз застосований для структуризації даних і розроблення алгоритмів визначення зон раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів з урахуванням відстані, попиту та пропускної спроможності логістичної мережі;

– методи лінійного програмування використані для постановки та розв’язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу;

– методи математичного моделювання – для оцінки ефективності алгоритмів

і їх програмної реалізації в реальних логістичних сценаріях;

– методи моделювання, використані для розробки архітектури програмного забезпечення «LAP» та інтеграції функціональних модулів автоматизації процесів розподілу ресурсів;

– методи порівняльного аналізу – для оцінки переваг запропонованого підходу у порівнянні з класичними методами рішення задач транспортного типу та верифікації результатів оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці методів та моделей інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах, що забезпечують підвищення ефективності функціонування логістичних процесів та їх адаптацію до змінних умов управління потоками ресурсів.

Вперше:

– Розроблено паралельний декомпозиційний підхід до розв’язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу, який поєднує метод проіндексованих елементів із процедурою ітеративного узгодження локальних планів, що дає змогу розподіляти загальну задачу на низку підзадач, які можуть розв’язуватись незалежно та паралельно з подальшою координацією для досягнення глобально узгодженого рішення, забезпечуючи при цьому не лише стабільну збіжність алгоритму, але й істотне зростання обчислювальної ефективності та масштабованості підходу, що підтверджується прискоренням обчислень у 2.5 рази (при розмірності задачі 10^3) порівняно з послідовними алгоритмами, що є критично важливим для оперативного прийняття рішень у великих корпоративних системах.

Удосконалено:

– Метод раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів у мережевих логістичних системах, який базується на розширенні методів кластеризації та враховує не лише географічні особливості, а й попит на ресурси й пропускну спроможність центрів. Це дало змогу комплексно визначати зони ефективного розміщення ЦАР з урахуванням просторових та кількісних параметрів.

– Модель розв’язання багатоїндексної розподільчої задачі транспортного

типу за рахунок введення попереднього етапу визначення раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів.

– Метод розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, який модифікує класичний метод нуль-перетворень для триіндексних задач і поширює його на п’ятиіндексну постановку, що дає змогу ефективно обробляти великі обсяги вхідних даних і значну кількість змінних, характерних для сучасних логістичних систем, із детальним урахуванням виробничих потужностей, потреб споживачів, особливостей ресурсів і характеристик транспортних засобів, причому така модифікація забезпечує зменшення середнього часу розрахунку на 50% (при розмірності задачі 10^3) порівняно з методом потенціалів.

Отримало подальший розвиток:

– Підхід до розв’язання багатоіндексних задач транспортного типу за допомогою комп’ютерних програм, що дає змогу скоротити кількість ітерацій порівняно з класичними методами (зокрема методом потенціалів) і знижує ризик виродженості під час побудови опорного плану. Це підвищує стабільність та точність отриманих результатів, особливо в умовах реальних логістичних сценаріїв з великою кількістю параметрів.

– Підхід до управління розподілом ресурсів у мережевих логістичних системах за рахунок урахування динамічних логістичних параметрів (коливань попиту, змін пропускної спроможності, ресурсних обмежень), що забезпечує гнучке коригування рішень і підвищує адаптивність систем.

Практична значимість отриманих результатів: практична значимість полягає у створенні комп’ютерних засобів для інформаційно-аналітичної підтримки планування та управління логістичними процесами у мережевих системах. Зокрема:

1. Удосконалений метод розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу дозволяє швидше обробляти великі обсяги даних у логістичних мережах з урахуванням п’яти ключових індексів: постачальників, споживачів, ЦАР, типу вантажу та автомобіля.
2. Розроблений паралельний декомпозиційний підхід забезпечує значне

зменшення часу обчислень у задачах великої розмірності та адаптований для використання в багатоядерних обчислювальних середовищах.

3. Реалізовані програмні модулі застосунку LAP, створені на основі розроблених методів, реалізовані та інтегровані в існуючі логістичні системи підприємства ПрАТ «МХП» (акт впровадження в додатку Д), що дозволило зменшити витрати на транспортування агропродукції на 11%.

4. Отримані результати сприяють підвищенню ефективності функціонування логістичних систем, зокрема щодо планування доставки, оптимального використання ресурсів, а також зниження рівня простою та втрат у логістичних процесах.

5. Запропоновані рішення використовуються економістами та фінансистами підприємств для планування і фактичного розрахунку логістичних витрат.

Таким чином, запропоновані методи та алгоритми у вигляді програмних рішень суттєво підвищують рівень автоматизації планування, оптимізують використання обмежених ресурсів, а отже, стають ефективним інструментом для практичного застосування у сфері логістики та суміжних галузях.

Апробація основних теоретичних і практичних результатів дисертації на підприємстві підтверджується відповідним актом про впровадження, який можна подивитись у додатку 5..

Результати дисертації можуть бути впроваджені в навчальні програми для студентів, які вивчають розробку інформаційних систем, моделювання логістичних процесів та оптимізацію постачань, що сприятиме підвищенню якості підготовки майбутніх фахівців у галузі комп’ютерних наук і логістики. Окрім цього, результати роботи були використані в науково-дослідній роботі «Системні дослідження та інформаційні технології у транспортній галузі, телекомунікаціях, промисловості та бізнесі» з реєстраційним номером 0124U003679, в якій Акімовим Д.Д. були проведені роботи у розділі 3, а саме проектування інформаційної системи для даної роботи.

Особистий внесок здобувача у дисертації полягає в проведенні комплексного аналізу інформаційних процесів у мережевих логістичних системах,

формалізації багатоіндексних задач транспортного типу, а також у розробленні нових методів та моделей їх розв’язання з урахуванням реальних обмежень та динаміки логістичних мереж.

Особливу увагу приділено побудові програмного прототипу інформаційної системи, що реалізує запропоновані алгоритми та забезпечує ефективну обробку великих обсягів логістичних даних. Система дозволяє інтегрувати модулі оптимізації постачань, візуалізації рішень і аналізу результатів, що значно покращує зручність користування та аналітичні можливості.

Отримані результати дисертації можуть бути використані для створення адаптивних програмних рішень у сфері логістики, підвищення ефективності управління ланцюгами постачань, а також для удосконалення інформаційного забезпечення в системах прийняття рішень. Крім того, ці результати можуть застосовуватись у навчальному процесі для підготовки спеціалістів у сфері розробки прикладного програмного забезпечення для логістики та управлінських інформаційних систем.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, у яких послідовно викладено теоретичний та прикладний матеріал, та висновків, що узагальнюють отримані результати і визначають перспективи подальших досліджень.

Публікації. По матеріалам дисертації опубліковано 13 наукових праць, в тому числі 2 статті у міжнародних виданнях, 3 статті у фахових наукових виданнях, 1 стаття у нефаховому науковому виданні, та 7 тез доповідей на конференціях.

Структура та об’єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури і джерел. Повний обсяг дисертації 207 сторінок, з обсягом основного тексту 176 сторінок. Список використаної літератури на 138 позицій та 5 додатків на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ БАГАТОІНДЕКСНИХ ЗАДАЧ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ У МЕРЕЖЕВИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Визначення розподільчої задачі транспортного типу

Сучасні підприємства функціонують у складному середовищі, де своєчасна та ефективна доставка товарів набуває вирішального значення для підвищення конкурентоспроможності. Зростаючі вимоги споживачів до швидкості та якості обслуговування вимагають від компаній оптимізувати логістичні процеси й оперативно реагувати на зміни ринкових умов. У цьому контексті ключову роль відіграють інформаційні процеси – збирання, обробка, передавання, зберігання та аналіз даних про замовлення, запаси, постачання, транспортні можливості тощо. Саме ефективне управління інформаційними потоками дає змогу інтегрувати в єдину мережеву логістичну систему всіх учасників: виробників, постачальників, перевізників, склади, роздрібні точки та кінцевих споживачів.

Розподільча задача транспортного типу є однією з основних оптимізаційних проблем у межах мережевих логістичних систем, і однією з найбільш відомих задач дослідження операцій. Вона охоплює процеси переміщення й розподілу ресурсів між групою постачальників, проміжними пунктами перерозподілу та споживачами, беручи до уваги численні чинники: транспортні витрати, обмеження пропускної спроможності, рівень попиту й наявні запаси.

На відміну від класичної транспортної задачі, де ресурси розподіляють між двома множинами (постачальниками та споживачами), розподільчі задачі транспортного типу включають складнішу структуру постачання з проміжними ланками (центрами перерозподілу). Це дає змогу ефективніше керувати потоками ресурсів, коли процес транспортування здійснюється в кілька етапів. У такому разі метою є зменшення загальних витрат на перевезення та досягнення рівномірного

забезпечення споживачів необхідними матеріалами [41–51].

Розглянемо формальну математичну модель цієї задачі. Нехай існує множина постачальників $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, де кожен постачальник S_i має запас продукції в обсязі a_i, де *i=1,…,m*. Додатково вводимо множину центрів акумуляції ресурсів (ЦАР) $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$, які можуть виконувати роль проміжних пунктів для перерозподілу товарів, а також множина споживачів $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$, кожен з яких потребує продукцію в обсязі b_j, де *j=1,…,n*.

Переміщення ресурсів між елементами системи здійснюється через транспортну мережу, при цьому для кожного можливого маршруту існують відповідні витрати на перевезення. Вартість транспортування одиниці ресурсу від постачальника S_i до споживача D_j позначається як c_{ij}, від постачальника S_i до проміжного пункту C_K – як d_{ik}, а від проміжного пункту C_K до споживача D_j – як e_{kj}.

Нехай змінна x_{ij} означає кількість продукції, що транспортується від постачальника S_i до споживача D_j. Мета задачі полягає у визначенні таких значень xij, що забезпечують мінімізацію загальних транспортних витрат, які визначаються цільовою функцією:

$$\mathrm{Z} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{m}} \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\, x_{ij} + \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{m}} \sum_{k=1}^{K} d_{ik}\, y_{ik} + \sum_{\mathrm{k}=1}^{\mathrm{K}} \sum_{j=1}^{n} e_{kj}\, z_{kj} \quad \rightarrow \min. \qquad (1.1)$$

де: c_{ij} – витрати на транспортування одиниці продукції від S_i до D_j, d_{ik} – витрати на транспортування одиниці продукції від S_i до C_k; e_{kj} – витрати на транспортування одиниці продукції від C_k до D_j.

Розв’язок цієї задачі повинен задовольняти низку обмежень. По-перше, сумарна кількість продукції, що відправляється кожним постачальником, не може перевищувати його запасів, тобто:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} + \sum_{k=1}^{K} y_{ik} \le a_i, \quad \forall i = 1, \dots, m. \qquad (1.2)$$

По-друге, для кожного споживача потрібно забезпечити обсяг ресурсів, не

менший за його попит:

$$\sum_{i=1}^{m} x_{ij} + \sum_{k=1}^{K} z_{kj} \geq b_j, \quad \forall j = 1, \dots, n. \tag{1.3}$$

По-третє, для кожного центру акумуляції ресурсів виконується умова балансу: уся продукція, що надійшла до C_K, має дорівнювати тій, що залишила пункт призначення:

$$\sum_{i=1}^{m} y_{ik} + \sum_{j=1}^{n} z_{kj}\,, \quad \forall k = 1, \dots, K. \tag{1.4}$$

Окрім цього, всі змінні x_{ij} повинні бути невід'ємними:

$$x_{ij}, y_{ik}, z_{kj} \geq 0 \tag{1.5}$$

Якщо сумарна кількість ресурсів у постачальників дорівнює сумарному попиту споживачів, вважають, що задача є закритою. У протилежному разі додають балансувальні змінні, аби компенсувати можливий дисбаланс.

Зазначена модель дає змогу враховувати багатостадійний характер транспортування, а також знаходити шляхи зменшення витрат та підвищення ефективності розподілу ресурсів у логістичному ланцюгу. Її можна розширювати, додаючи часові обмеження, вимоги до обсягу транспортних засобів чи умови зберігання у проміжних точках [52–56].

На практиці, окрім основних параметрів, таких як постачальники, ресурси та транспортні витрати, може виникати потреба враховувати додаткові фактори. Це стосується різних видів ресурсів, що мають специфічні вимоги до зберігання й транспортування, а також використання різних типів транспортних засобів. Важливу роль відіграють центри акумуляції ресурсів (ЦАР), які виступають проміжними ланками між виробниками та споживачами. Зі збільшенням кількості параметрів двоіндексна модель ускладняється й трансформується у багатоіндексну.

Одним із ефективних підходів до вдосконалення системи перевезень є запровадження ЦАР, які виконують функції зберігання, консолідації та підготовки вантажів до відправлення [57]. Це підвищує гнучкість логістичних схем, зменшує витрати на транспортування та прискорює доставку. Крім того, ЦАР сприяють

рівномірному завантаженню транспорту, що мінімізує кількість холостих пробігів.

У межах транспортно-розподільчих систем (ТРС) вирізняють задачі оперативного планування й управління перевезеннями, які описуються транспортними моделями та дослідженням операцій [42, 49, 53]. Вони дозволяють визначити оптимальні маршрути та мінімізувати загальні витрати. Проте класичні постановки не завжди охоплюють специфіку розподілу неоднорідних ресурсів або особливості комбінованого використання транспорту [44]. У таких випадках застосовують гнучкі математичні методи, що враховують зміну попиту та динаміку логістичних процесів.

Оптимальне поєднання кількох видів транспорту разом із розбудовою мережі ЦАР сприяє ефективності логістичних процесів. Використання таких центрів дозволяє скоротити час перевезення й зберігання товарів, централізувати управління запасами та мінімізувати ризики нерівномірного розподілу ресурсів.

З огляду на сучасні виклики, неможливо нехтувати питанням розміщення необхідних запасів у визначених точках акумуляції. Ефективне управління ЦАР сприяє зниженню витрат, підвищенню стійкості логістичних систем та адаптації до змін ринку.

Питання оптимального розташування ЦАР часто виявляється ключовим для результативного функціонування транспортно-логістичних систем [58]. Дослідження [59, 60] свідчать, що вдало обраний центр дозволяє скоротити логістичні витрати до 30%. Серед факторів вибору найважливішими є: місце розташування, імовірні транспортні маршрути, очікувані обсяги й частота поставок, а також система тарифів [61, 62]. Водночас у процесі прийняття управлінських рішень слід аналізувати взаємовплив таких параметрів, як відстані, способи перевезення та вартість логістичних операцій, оскільки зміна одного складника зачіпає інші [63].

Найістотнішого економічного ефекту вдається досягти, якщо всю логістичну систему – від виробника до фінального споживача – розглядати як єдиний процес, у якому планування й координація охоплюють усі етапи переміщення ресурсів [15]. «Від дверей до дверей» – це концептуальне завдання,

яке враховує витрати на кожному відрізку транспортування, управління запасами та оперативне планування. Такий підхід забезпечує узгоджену роботу всіх учасників ланцюга [15–18, 20, 21, 23, 35, 36]. Варто мати на увазі, що ефективність логістики визначається сукупністю факторів: від витрат на перевезення й розміщення ЦАР до обрання маршрутів і методів координації всіх ланок системи.

На рисунку 1.1 відображено основні складові, що формують загальні витрати під час розподілу ресурсів [17, 18, 21, 23, 64–68]. Взаємозалежність цих елементів підтверджує необхідність комплексного проектування інноваційних транспортно-розподільчих систем із високим рівнем акумуляції й розподілу запасів.

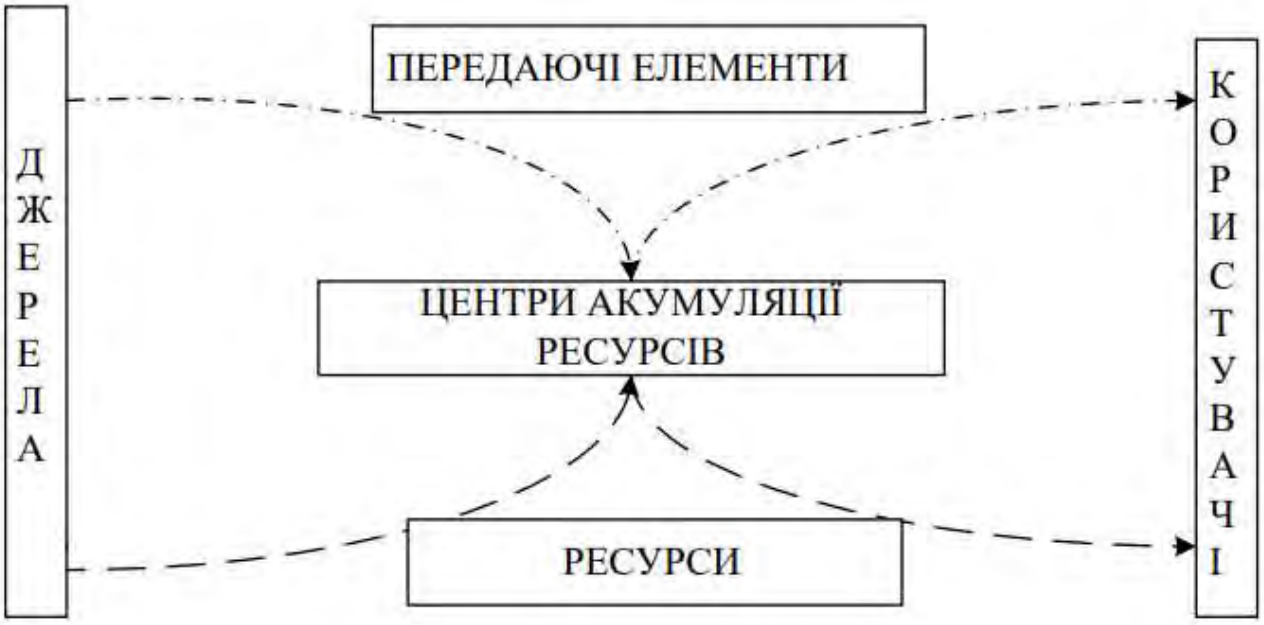


Рисунок 1.1 – Структурно-функціональна модель компонентів транспортно-розподільчої системи

У контексті досліджуваних інформаційних процесів під час доставки товарів це означає необхідність оптимального управління всіма параметрами логістичної мережі: від визначення локацій ЦАР до вибору різновидів транспорту і створення тактичних планів для перевезень.

Згідно з [67], чітко організоване управління в перевізному процесі здатне знизити витрати на постачання ресурсів до 60%. Тому, аби вдосконалити розподіл

ресурсів, потрібно застосувати цілий комплекс заходів (рисунок 1.2), що скоротять витрати не лише в окремих ділянках ланцюга, а й загалом [65].

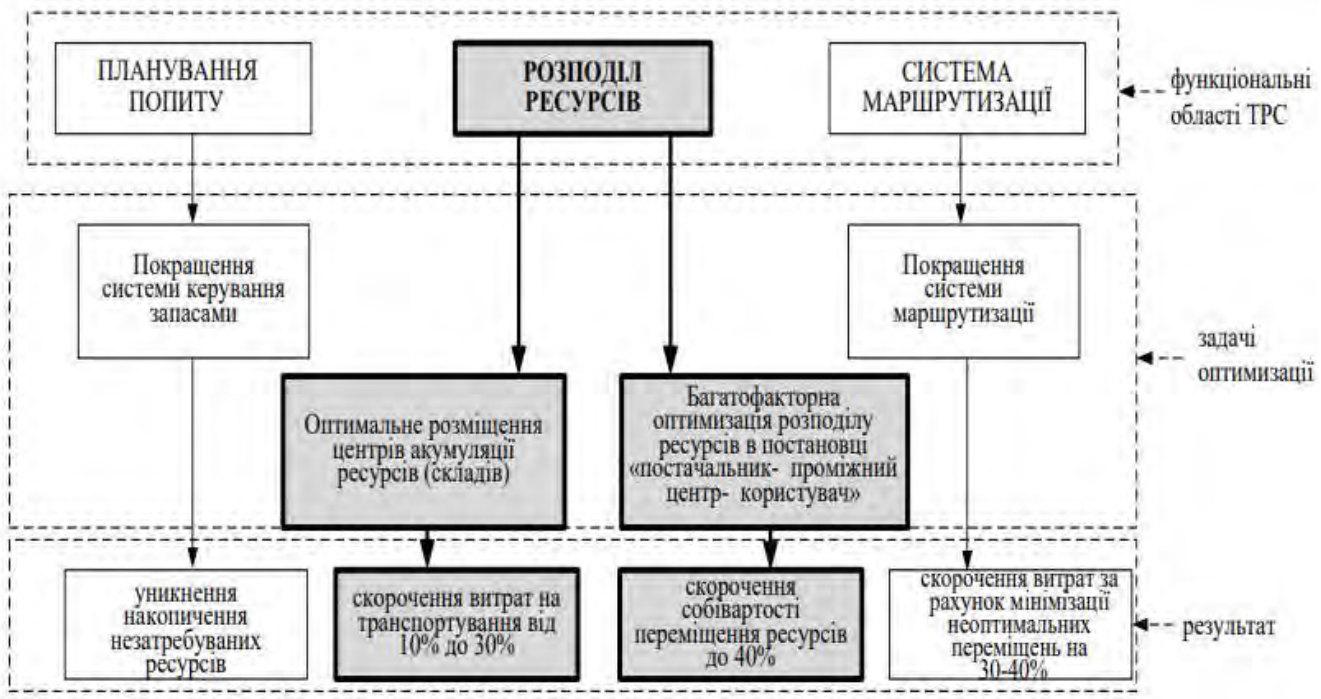


Рисунок 1.2 – Функціонально-структурна модель раціонального розподілу ресурсів у транспортно-логістичній системі

Запропонований комплекс заходів дозволяє розглядати послідовні кроки розв’язання транспортно-розподільчої задачі як багатоіндексної постановки, що підкреслює актуальність подальшого вдосконалення методів її розв’язання.

1.2 Аналіз методів визначення зони розташування центрів акумуляції ресурсів у мережевих логістичних системах

У сучасних мережевих логістичних системах переміщення товарів від джерела (виробника) до споживача часто реалізується двома основними шляхами: безпосередньо за схемою «виробник – споживач» або із залученням одного чи кількох центрів акумуляції ресурсів (ЦАР) («виробник – ЦАР – споживач») [78, 79].

У другому випадку логістична мережа ускладнюється, і для її опису застосовуються багатоступеневі транспортно-розподільчі задачі, де критерієм оптимальності найчастіше виступає мінімізація сукупних витрат на розподіл.

Окремою складовою такої постановки є задача визначення зони раціонального розташування ЦАР, яка вже давно розглядається як ключова у логістиці та дослідженні операцій [15, 17, 80, 81]. Вона полягає у визначенні місця (і кількості) центрів у логістичній мережі так, аби загальні витрати (транспортні, складські тощо) були якомога меншими. При цьому впливових факторів може бути безліч: від географічних особливостей і стану транспортної інфраструктури до екологічних та правових обмежень [82]. Усі ці умови вимагають комплексного підходу до інформаційного забезпечення процесу ухвалення рішень щодо розміщення ЦАР, аби належним чином врахувати динамічні характеристики мережі (наприклад, зміну обсягів попиту, тарифів, пропускної здатності).

Часто задача розміщення ЦАР постає в дискретно-континуальній формі, коли шукають «потенційні» вузли розподілу або зони найкращого розташування. Її можна розв’язувати як оптимізаційну (точний пошук) або евристичну (наближений пошук) задачу [83, 84]. Серед відомих методів виділяють різноманітні аналітичні та експертні підходи, які поєднуються з методами кластерного аналізу, адже ЦАР за своєю сутністю є проміжними центрами для групування матеріальних потоків.

У роботі [85] Мак Квін пропонує метод, в якому випадковим чином вибираються k об'єктів, які виступають як центри кластеризації. Для кожного об'єкта визначається найближчий центр кластеризації, і якщо відстань від об'єкта до центру кластеризації не перевищує певної величини, об'єкт приписується до цього центру. Якщо відстань більше, об'єкт стає новим центром кластеризації, і обчислюються нові центри кластеризації. Якщо ж відстань між центрами кластеризації менша за задану величину, вони об'єднуються. В якості цільової функції використовується сума квадратів відхилень всередині груп.

Л. Костученко у своїй роботі [86], та М. Ваховська у роботах [87, 88] дослідили методи визначення розташування проміжних центрів [11]. Моделі Вон Танена і Вебера засновані на мінімізації витрат. Модель Гувера враховує не тільки

витрати, але й попит, і вказує на відсутність лінійної залежності між транспортними тарифами та відстанню. Гринхарт розширив модель, включивши в розгляд витрати на екологічну безпеку, і визначив, що найкраще розміщення проміжних центрів забезпечить максимальний прибуток.

У роботі [88] запропоновано метод визначення розташування проміжних центрів через аналіз комплексних факторів, що впливають на попит. Визначаючи консолідовані коефіцієнти для кожної групи факторів, розраховуються інтегральні оцінки привабливості регіонів, які використовуються для визначення зони раціонального розташування проміжних центрів.

У роботі [89] описана модель, в якій розташування проміжних центрів визначається за допомогою окружностей, проведених з пунктів постачання, з радіусами, що відповідають обмеженням у затримках постачань. Точки перетину цих окружностей є зоною раціонального розташування проміжних центрів.

У роботі [90] пропонується комбінаційна модель, що спочатку визначає всі потенційні «проміжні» центри на основі методу «центру тяжіння», а потім обирає з них найкращий варіант.

Транспортні витрати при доставці ресурсів визначаються як [90]:

$$L = \sum_{i=1}^{n} Q_i^{(n)} T_i \, R_i + \sum_{j=1}^{n} Q_j^{(k)} T_j \, r_j \rightarrow min \qquad (1.6)$$

де n – кількість постачальників; m – кількість споживачів ресурсу; $Q_i^{(n)}$ – обсяг постачання від постачальника i до ЦАР; $Q_j^{(k)}$ – обсяг постачання з розподільчого центру споживачу j; T_i, T_j – тарифи на транспортування; R_i – відстань від постачальника i до розподільчого центру; r_j – відстань від розподільчого центру до споживача j.

Координати зони раціонального розташування складу визначаються за наступними формулами [91]:

$$x_k = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{(n)} T_i x_i}{R_i T_i} + \sum_{j=1}^{m} \frac{Q_j^{(k)} T_j x_j}{r_j T_j}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{(n)} T_i}{R_i T_i} + \sum_{j=1}^{m} \frac{Q_j^{(k)} T_j}{r_j T_j}}, y_k = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{(n)} T_i y_i}{R_i T_i} + \sum_{j=1}^{m} \frac{Q_j^{(k)} T_j y_j}{r_j T_j}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{(n)} T_i}{R_i T_i} + \sum_{j=1}^{m} \frac{Q_j^{(k)} T_j}{r_j T_j}} \quad (1.7)$$

де x_i, y_i,– координати постачальника i; x_j, y_j – координати споживача j; x_k, y_k – координати розподільчого центру.

Знаходження розв’язку полягає в переборі можливих варіантів розміщення складів і виборі такого, що мінімізує (1.6). Додатково використовуються підходи, що оцінюють рейтинг ділянки за сукупністю вагомих чинників. На відміну від звичайного «центру тяжіння», вони враховують логістичні витрати ширшого спектра (наприклад, податкові норми, екологічні обмеження, вартість інфраструктури), визначаючи питому вагу кожного фактора через метод парних порівнянь [19, 90].

Загалом, ефективність інформаційних процесів в організації доставки товарів залежить від якості моделей та методів оптимізації, що застосовуються для вибору розміщення ЦАР і розподілу ресурсів. У таблиці 1.1 наведено узагальнений аналіз методів визначення раціонального розташування проміжних центрів. Кожен із цих методів має свої переваги й обмеження, тому вибір конкретного підходу залежить від масштабів задачі, доступних даних, рівня невизначеності та наявних обчислювальних ресурсів.

У контексті мережевих логістичних систем формування або модернізація схеми розміщення ЦАР відіграє ключову роль у зменшенні сукупних витрат, скороченні часу обробки й транспортування, а також у підвищенні гнучкості всієї логістичної мережі. Подальші дослідження в цьому напрямі часто фокусуються на інтеграції підходів кластеризації, багатоіндексних постановок, що дають змогу ефективніше управляти невизначеністю та взаємодією різних елементів логістичної системи.

Таблиця 1.1 – Аналіз методів раціонального розташування проміжних центрів [86 – 90].

Назва методу / автор методу	Параметри оцінки методу	Можливість визначення кількох центрів групування	Розв'язання задачі групування в недетермінованій постановці	Урахування параметрів попиту при виборі центру групування
Метод Мак Квіна	+	–	–	–
Метод Вебера	–	–	+	+
Метод Гувера	–	–	+	+
Метод Костученко	–	–	+	–
Метод Ваховської	+	–	+	+

Принциповий недолік представлених методів полягає в тому, що вони не враховують можливі зміни вихідних параметрів у логістичних системах. Це обґрунтовує необхідність розробки методів, що дозволяють коригувати розташування центрів акумуляції ресурсів у разі змін транспортних витрат, попиту або інфраструктурних умов. Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення існуючих методик та розробку алгоритмів, здатних ефективно враховувати змінні параметри логістичної мережі.

1.3 Аналіз методів вирішення багатоіндексних розподільчих завдач транспортного типу

Для розв’язання багатоіндексних задач розподілу ресурсів зазвичай намагаються узагальнити класичні підходи, зокрема метод потенціалів, відомий із двоіндексної транспортної задачі. Незважаючи на те, що триіндексні та взагалі багатоіндексні розподільчі задачі транспортного типу часто формулюються за

аналогією з двоіндексною транспортною задачею, множина накладених на них обмежень та особливості їх структури істотно ускладнюють процес отримання оптимального плану. У класичному випадку (двоіндексна задача) метод потенціалів базується на системі нерівностей і рівностей (1.8) та (1.9):

$$v_j - u_i \leq \overline{c}_{ij},\ i = 1,\overline{I},\ j = 1,\overline{J}, \tag{1.8}$$

$$v_j - u_i = \overline{c}_{ij},\ \forall x_{ij} > 0. \tag{1.9}$$

де u_i та v_j - потенціали відповідних пунктів відправлення та пунктів споживання. c_{ij} – вартість (або інший показник ефективності) перевезення одиниці ресурсу між пунктами i та j. У такій постановці визначення потенціалів відбувається відносно базисного (опорного) плану, де всі додатні змінні пов'язують між собою відповідні пунктів i та j. Якщо ж збільшується кількість індексів (наприклад, додаються проміжні пункти, види транспорту, типи ресурсів тощо), то аналогічний підхід вимагає розв'язання набагато складнішої системи рівнянь та нерівностей. У триіндексній задачі замість пари потенціалів (u_i, v_j) з'являється, наприклад, потрійна система $(\alpha_i, \beta_j, \gamma_k)$, що суттєво ускладнює обчислювальну процедуру на кожній ітерації.

Якщо число індексів більше двох, то складність обчислювальної процедури задач даного типу методом потенціалів дуже швидко зростає зі збільшенням розмірності. Розмірність задачі може досягати порядку від 10^8 до 10^9 [108–111]. Очевидно, що отримати точне рішення таких задач за допустимий час з використанням сучасної обчислювальної техніки не вдається. Це обґрунтовує необхідність створення та використання ефективних методів вирішення багатоіндексних задач розподілу ресурсів.

Окрім різкого зростання обчислювальної складності, чимало складнощів спричиняє й проблема виродженості. Для двоіндексної задачі відомі підходи, що частково дозволяють уникнути або пом'якшити її (за допомогою спеціальних процедур побудови початкового плану, вилучення циклів, використання псевдопланів тощо) [19, 104, 105]. Проте, коли кількість індексів збільшується (три, чотири й більше), аналогічні прийоми вже не дають бажаного ефекту [24]. У такому

разі велика кількість змінних «природно» генерує багато нульових клітин, які потенційно можуть опинятися у базисі. Це перешкоджає коректному визначенню потенціалів та суттєво гальмує процедуру переходу між опорними планами, оскільки на кожному кроці доводиться переоцінювати велику кількість змінних.

Особливо критичною ситуація стає, коли розмірність задачі сягає сотень тисяч або навіть мільйонів змінних (що можливо в реальних логістичних та виробничих мережах, зумовлених великою кількістю проміжних пунктів, різноманітним парком техніки і ресурсів, а також специфічними обмеженнями на час, обсяги поставок, якість перевезення тощо). Зокрема, в задачах із розмірністю $k>10000$ (наприклад, кількість змінних – понад десять тисяч) частка вироджених планів може досягати 30% від усіх опорних планів, що автоматично створює перешкоди для швидкого обчислення потенціалів та пошуку оптимального розв’язку [19, 31]. Для багатоіндексних систем ця проблема ускладнюється ще більше, оскільки зростає кількість обмежень і взаємозв’язків між змінними.

У працях [89, 100] розглянуто можливості підвищення ефективності класичних алгоритмів, зокрема на базі алгоритму Романовського. Проте вони зазвичай придатні лише для однорідних систем і двоіндексних постановок. Для розподільчих задач, де ресурси, види транспорту або проміжні пункти суттєво відрізняються, застосування точних методів, зокрема класичного методу потенціалів, швидко стає неефективним через велику кількість ітерацій і труднощі з побудовою опорного плану [112, 113].

Рішення задач даного типу розглянуто у роботах [114, 115] і включає дослідження на дозвільність, обґрунтування критеріїв оптимальності та виродженості при використанні методу потенціалів. В якості основного методу вирішення триіндексних задач пропонується метод потенціалів.

Під час розробки алгоритму вирішення триіндексної транспортної задачі головним викликом є забезпечення її дозвільності та розробка початкового допустимого плану. У дослідженні [116] Хелі К. було запропоновано рекурентну процедуру для відсіювання неправильно сформульованих задач і створення початкового плану.

1.4 Аналіз наближених методів розв'язання задач розподілу ресурсів під час доставки товарів

Зважаючи на високу розмірність сучасних логістичних задач, у яких розглядаються великі обсяги даних (численні виробники, споживачі, центри акумуляції ресурсів, різноманітні види транспорту, складні маршрути постачання, можливість зміни попиту та пропозиції в реальному часі тощо), класичні точні методи лінійного програмування та дослідження операцій, зокрема метод потенціалів, стають непрактичними через значні витрати часу та обчислювальних ресурсів [31, 32, 106–108]. Висока складність таких задач обумовлюється не лише кількістю параметрів і змінних, а й необхідністю врахування обмежень, пов'язаних із наявністю ресурсів, графіком транспортування, допустимими обсягами перевезень та іншими реальними факторами. Як наслідок, виникає гостра потреба у використанні наближених методів, які дозволяють отримати прийнятно оптимальне рішення за значно коротший проміжок часу, навіть у випадку великої кількості змінних та обмежень.

Відомо, що метод потенціалів ефективно працює переважно з дво- або рідше триіндексними задачами малої розмірності, коли кількість змінних і обмежень є відносно невеликою. Проте у випадках, коли кожен індекс може мати значний діапазон значень (наприклад, від 10^6 до 10^9 змінних або більше), обчислювальний час може перевищувати добу безперервної роботи навіть сучасної обчислювальної системи [33, 109, 110]. Такі розрахунки потребують значних апаратних ресурсів, зокрема багатоядерних процесорів, великого обсягу оперативної пам'яті та високопродуктивних алгоритмів оптимізації обчислень. У розширених багатоіндексних постановках (див. розділ 1.4) використання методу потенціалів стає ще складнішим, оскільки виникають додаткові проблеми, пов'язані з виродженістю розв'язків, високою чутливістю до початкових умов, а також необхідністю динамічного коригування параметрів у процесі розрахунку [32, 111–113]. Це особливо актуально для реальних транспортно-логістичних систем, де

вихідні дані можуть змінюватися в реальному часі, а адаптація методів під такі зміни потребує гнучкості та ефективності.

Тому на практиці, коли розмірність задачі є великою, а обчислювальні ресурси мають обмеження, дедалі частіше звертаються до наближених та евристичних методів [32, 99, 112, 114, 115, 117]. Ці методи дозволяють знаходити розв'язки, які хоча й можуть бути не ідеально оптимальними, проте забезпечують достатню точність і значно швидший час обчислення. В роботах [31, 66, 118] детально розглянуто різні підходи до розв'язання багатоіндексних транспортних задач, які можна ефективно адаптувати до розподілених і мережевих логістичних систем. Це дає змогу підвищити продуктивність обчислень та скоротити витрати на їх реалізацію, що є важливим фактором для сучасних логістичних платформ та інформаційних систем управління постачанням.

Одним із рекомендованих методів для обчислення оптимального рішення трьохіндексних транспортних задач є метод мінімального елемента в перерізі [31]. Його суть полягає в тому, що в процесі розрахунків у якості ведучого елемента обирається той, що відповідає мінімальному значенню коефіцієнта цільової функції у вибраному перерізі. Переріз при цьому може бути різної розмірності: одновимірним (метод мінімального елемента в рядку або стовпці), двовимірним (метод мінімального елемента у горизонтальній, вертикальній чи фронтальній площинах) або тривимірним (метод мінімального елемента матриці). Такий підхід дозволяє скоротити кількість необхідних обчислень та швидше отримати прийнятно оптимальний розв'язок, що робить його ефективним для застосування в системах з великою кількістю змінних.

Додатково слід зазначити, що подальше вдосконалення наближених методів у логістичних задачах спрямоване на поєднання класичних алгоритмів із сучасними обчислювальними підходами, такими як машинне навчання та евристичні алгоритми. Це дозволяє суттєво підвищити якість отриманих рішень, особливо у випадках складних логістичних мереж, де враховуються часові обмеження, змінні тарифи та багатокритеріальна оптимізація.

З огляду на високу розмірність багатоіндексних задач, доцільним є

дослідження методів паралельних обчислень із використанням комп'ютерних засобів їх реалізації. Одним із перспективних підходів до паралельного розв'язання таких задач є метод Данцига—Вульфа [124], який передбачає декомпозицію вихідної задачі на підзадачі з подальшою координацією результатів їх розв'язання.

Одним із поширених наближених алгоритмів для тривимірних транспортних задач є метод мінімального елемента в перерізі [31]. Він полягає в ітераційному пошуку ведучого елемента – мінімального коефіцієнта цільової функції в обраному перерізі (рядку, стовпці, шарі або загальному «зрізі» матриці). Однак дослідження [31, 32, 62] свідчать, що більш ефективним за низкою критеріїв є метод нуль-перетворень, у якому попередньо зменшують усі коефіцієнти цільової функції на мінімальний елемент кожного рядка (або «зрізу») з метою формування хоча б одного нульового значення у кожній структурній одиниці. Це дає підґрунтя для знаходження наближеного розв'язку з меншою кількістю ітерацій.

Для оцінки ефективності наближених методів вирішення класичної двоіндексної задачі розподілу ресурсів були використані тестові приклади у середовищі Matlab. Розмірність задачі склала 10×11 [122]. Коефіцієнт відповідності точному методу розраховувався як співвідношення результату, отриманого точним методом, а саме методом потенціалів, до результату, отриманого відповідним наближеним методом. Результати обрахунків наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Оцінка ефективності методів розв'язання двоіндексної транспортної задачі

Назва методу	Значення цільової функції	Коефіцієнт відповідності точному методу
Метод послідовного розподілу	289	0,40
Метод мінімального елемента у рядку	205	0,57
Метод мінімального елемента в перерізі	185	0,63
Метод мінімального елемента матриці	139	0,84
Метод нуль-перетворень	127	0,92
Метод потенціалів (точний метод)	117	1,00

Таблиця 1.3 – Оцінка ефективності методів розв'язання тривимірної транспортної задачі:

Назва методу	**Значення цільової функції**	**Коефіцієнт відповідності точному методу**
Метод послідовного розподілу	3717	0,57
Метод мінімального елемента в рядку	3114	0,68
Метод мінімального елемента в перерізі	2751	0,77
Метод мінімального елемента матриці	2342	0,91
Метод нуль-перетворень	2144	0,94
Метод потенціалів (точний метод)	2132	1,00

Аналізуючи отримані результати, варто зазначити, що ефективність наближених методів зростає зі збільшенням розмірності задачі. Це підтверджує, що при більш складних умовах розглянуті методи можуть бути особливо корисними для оптимізації ресурсів і зменшення витрат.

Як видно з таблиць 1.2 та 1.3, наближені алгоритми у середньому дають коефіцієнт відповідності до 0,92–0,94, що означає високу близькість отриманого плану до оптимального рішення. Ефективність наближених методів порівняно з класичними зростає зі збільшенням розмірності задачі, дозволяючи отримувати прийнятний розв’язок набагато швидше.

Таким чином, наближені методи дають змогу скоротити обчислювальні витрати та отримати рішення транспортно-розподільчих задач у реальному масштабі часу, що є важливим для інформаційних процесів доставки товарів у мережевих логістичних системах. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію таких алгоритмів для багатоіндексних постановок та їх інтеграцію з автоматизованими системами управління логістичними процесами

1.5 Побудова моделі поетапного вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу у мережевих логістичних системах

З огляду на складність сучасних мережевих логістичних систем і прагнення

знизити витрати на доставку товарів, ключовими факторами в процесі розв'язання задачі розподілу ресурсів є багатофакторний підхід до параметрів «виробник – центр акумуляції ресурсів – споживач» та ефективне розміщення центрів акумуляції ресурсів (ЦАР) [69–71]. Введення ЦАР у логістичний ланцюг дозволяє розглядати двоступеневу схему вирішення задачі розподілу ресурсів [72, 73].

Для кращого сприйняття побудуємо поетапну модель даної задачі.

На першому етапі виконується визначення раціонального розташування ЦАР, що передбачає пошук оптимальних точок розміщення центрів з урахуванням територіального розподілу попиту та можливостей логістичної мережі. Цей процес включає аналіз факторів, які впливають на вибір місця для центрів, зокрема відстаней між постачальниками та споживачами, транспортних витрат, пропускної спроможності інфраструктури та вартості зберігання ресурсів. Визначення оптимальної кількості та місць розташування ЦАР дає змогу мінімізувати витрати на доставку та покращити ефективність логістичної інформаційної системи. При цьому можливі коригування вихідних параметрів, таких як зміна попиту або тарифів, що може призвести до необхідності повторного аналізу оптимального розташування центрів. Також доцільно враховувати сезонні коливання попиту, що можуть суттєво змінювати навантаження на окремі логістичні вузли, а отже, вимагати адаптації розподільчої мережі.

Другий етап передбачає розв'язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, що полягає у визначенні оптимального плану переміщення ресурсів між постачальниками, ЦАР та кінцевими споживачами. Враховуються такі параметри, як особливості логістичних маршрутів, типи транспорту, обмеження на місткість транспортних засобів та вартість перевезень. Головною метою є мінімізація сукупних витрат у межах логістичної мережі за умови забезпечення попиту споживачів. Для цього можуть застосовуватися класичні транспортні алгоритми, такі як метод потенціалів або симплекс-метод, а також евристичні й метаевристичні підходи, що дозволяють обробляти великі обсяги даних із багатьма параметрами.

Додатково слід розглядати можливість корекції початкових даних, що

дозволяє змінювати їх у режимі реального часу та забезпечити більш ефективне використання логістичних потужностей.

Побудована модель зображена на рисунку 1.3.

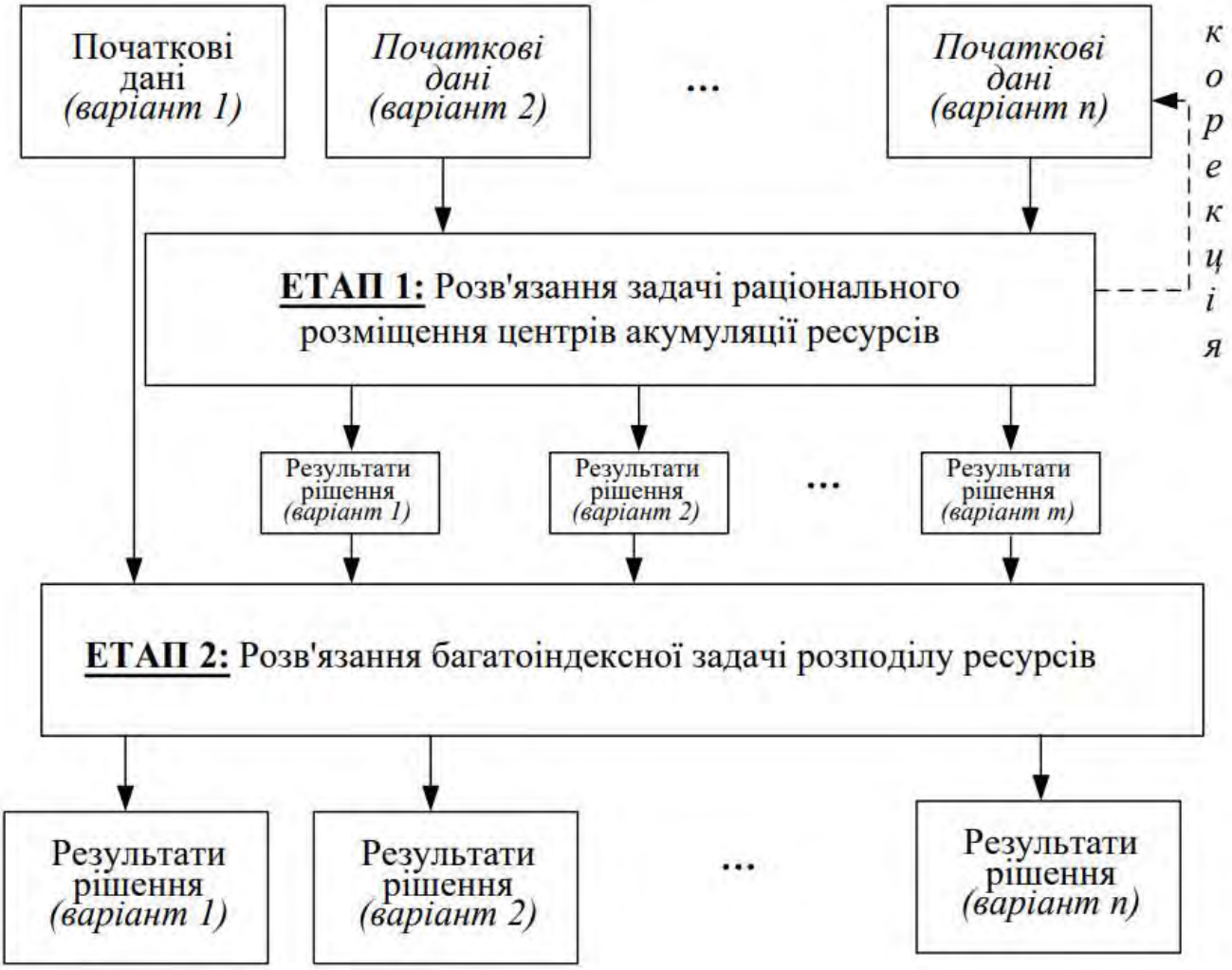


Рисунок 1.3 –Модель процесу поетапного розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу

Якщо необхідно закріпити за центром акумуляції ресурсів конкретних споживачів, то на першому етапі вирішується задача визначення кількості та місць розташування ЦАР. У разі змін у вихідних параметрах, таких як коливання попиту чи вартості транспортування, цей етап можна повторювати ітеративно. Якщо ж умова жорсткого закріплення не є обов’язковою, то після визначення місць розташування центрів переходять до другого етапу, в якому виконується оптимізація переміщення ресурсів для зменшення загальних витрат.

Ефективність функціонування логістичної інформаційної системи значною

мірою залежить від здатності адаптуватися до зміни умов та невизначеності окремих параметрів, таких як динамічний попит або вартість транспортних послуг [16]. Окрім того, складність задачі розподілу ресурсів зростає через різні типи вантажів, частотність поставок та зміну умов у логістичній мережі (наприклад, сезонні коливання, зміна тарифів або маршрутизація нових транспортних потоків).

Для ефективного вирішення задачі оптимізації функціонування логістичної мережі необхідно застосовувати методи, що дозволяють:

— визначити раціональну кількість та місце розташування центрів акумуляції ресурсів з урахуванням зміни параметрів системи [71, 72];

— отримати оптимальне рішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу шляхом застосування алгоритмів, що враховують специфіку перевезень і логістичної мережі;

— розробити ефективні алгоритми прийняття рішень у межах багаторівневої моделі розподілу ресурсів;

— забезпечити інформаційну підтримку процесу управління логістичними потоками на основі автоматизованих систем.

Аналіз існуючих підходів до управління логістичними процесами показує, що часто не враховується взаємозв’язок між інформаційними, матеріальними та фінансовими потоками, що може знижувати ефективність роботи інформаційної системи [15, 18, 20, 30, 74–76]. Комплексний підхід до управління розподілом ресурсів передбачає розгляд усієї логістичної мережі як єдиної інтегрованої системи, що дозволяє покращити координацію між її елементами.

Результати досліджень у цій сфері вказують на необхідність розробки систем підтримки прийняття управлінських рішень, що дозволять підвищити ефективність функціонування логістичних систем через взаємодію інформаційних підсистем і використання сучасних технологій [32, 77].

Загальний процес побудови оптимізаційної транспортно-розподільчої моделі поділяється на такі етапи [11, 25, 67]:

— постановка задачі та визначення її основних параметрів;

— формалізація математичної моделі логістичної мережі;

— розробка методів оптимізації з урахуванням специфіки розподілу ресурсів;

— експериментальне тестування запропонованої моделі та аналіз її ефективності;

1.6 Порівняння існуючих інформаційних систем для логістики

Невіддільною складовою сучасних логістичних процесів є інформаційні системи, покликані забезпечити єдиний інформаційний простір між виробниками, перевізниками, роздрібними мережами й кінцевими споживачами. Вони сприяють узгодженню графіків відправлення, контролюють рівні запасів, дають змогу відстежувати переміщення вантажів у реальному часі та оперативно реагувати на відхилення від плану. Щоб краще зрозуміти наявні можливості, доцільно проаналізувати найпоширеніші інформаційні рішення, які пропонуються на ринку для оптимізації й автоматизації логістики.

Насамперед слід згадати системи управління транспортом (TMS), що дають змогу планувати маршрути, обирати типи транспорту, розраховувати витрати й формувати відповідні документи, а також аналізувати ефективність перевезень на основі історичних даних. Більшість провідних TMS уміють інтегруватися з геоінформаційними системами, що дозволяє не лише відстежувати рух транспортних засобів у реальному часі, а й автоматично коригувати маршрути залежно від змін дорожньої обстановки, що значно покращує оптимізацію логістики «останньої милі». Другою поширеною категорією є системи управління складом (WMS), які оптимізують операції у місці зберігання товарів: від приймання та розміщення на стелажах до відбору замовлень і відвантаження. Деякі WMS мають розширені функції, зокрема підтримку технологій автоматизації, таких як роботизовані комплекси, що значно підвищують швидкість і точність виконання складських операцій. На розширеному рівні функціонує Supply Chain Management (SCM) – комплексний підхід до керування всім ланцюгом постачання, включно з

виробничим плануванням, прогнозуванням попиту та контролем постачальників. Ще одним варіантом є ERP-системи з інтегрованими логістичними модулями, що об'єднують логістику з іншими процесами підприємства (фінанси, виробництво, збут). Останнім часом також поширюються хмарні та спеціалізовані сервіси, які надають окремі вузькопрофільні функції (наприклад, маршрутизація «останньої милі», аналітика попиту) за моделлю SaaS.

Для ілюстрації реальних продуктів, у таблиці 1.4 узагальнено порівняння декількох популярних інформаційних систем, що застосовуються в галузі логістики. У ній наведено їхню основну спеціалізацію, короткі характеристики та орієнтовний рівень вартості чи ліцензійних моделей [118–124].

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика обраних логістичних інформаційних систем

Продукт	**Ключовий фокус**	**Короткий огляд функціоналу**	**Формат ліцензування / вартість**
Oracle Transportation Mgmt	TMS (Transport Management System)	Маршрутизація, відстеження в реальному часі, детальна аналітика транспортних витрат	Корпоративна ліцензія. Вартість висока, залежить від обсягів та модулів
SAP Extended Warehouse Mgmt	WMS (Warehouse Management System)	Управління складськими процесами, оптимізація розміщення, інтеграція з ERP-модулями SAP	Корпоративна, модульна оплата; висока початкова вартість впровадження
Blue Yonder (JDA Software)	SCM (Supply Chain Management)	Прогнозування попиту, планування виробництва, оптимізація ланцюга постачання	Ліцензія; вартість залежить від кількості користувачів
Microsoft Dynamics 365 SCM	ERP з логістичними модулями	Єдиний облік ресурсів (виробництво, фінанси, логістика)	Корпоративна підписка (SaaS) або ліцензія; гнучка система оплати
Manhattan Associates	TMS / WMS (гібридні рішення)	Об'єднане управління перевезеннями та складом, налаштування транспортно-складських ланцюгів	Ліцензія та додаткові модулі. Ціна вища за середню
Infor WMS / Infor Nexus	WMS/SCM (широкий набір логістичних інструментів)	Управління складом, транспортуванням, аналітика в реальному часі, підтримка RFID	Корпоративна ліцензія з можливістю вибору модулів
CargoWise	Спеціалізований TMS+WMS для логістичних операторів	Широкі можливості для експедиторів, перевізників; автоматизація	SaaS-модель із покроковою оплатою залежно від функціоналу

Як видно з наведеної таблиці, кожен продукт має власний набір переваг і орієнтований на певні сегменти ринку. Наприклад, Oracle та SAP традиційно позиціонують свої рішення на великих корпоративних клієнтів із багаторівневою структурою перевезень і потребою у глибокій інтеграції з фінансовими модулями. Blue Yonder (раніше відома як JDA Software) часто обирають компанії, що прагнуть детальної аналітики та прогнозування попиту на глобальних ринках. Microsoft Dynamics 365 завдяки хмарній архітектурі й тісній інтеграції з офісними продуктами підходить тим, хто цінує зручне впровадження та знайомий інтерфейс. Manhattan Associates і Infor більшою мірою фокусуються на комбінованих рішеннях, що об'єднують транспортні й складські процеси, тоді як CargoWise спеціалізується на потребах логістичних операторів та експедиторських компаній, пропонуючи потужні засоби для управління ланцюгами постачань у міжнародному масштабі.

Для візуального зіставлення функціонального охоплення та складності впровадження кожної з цих систем побудовано графік на рисунку 1.4.

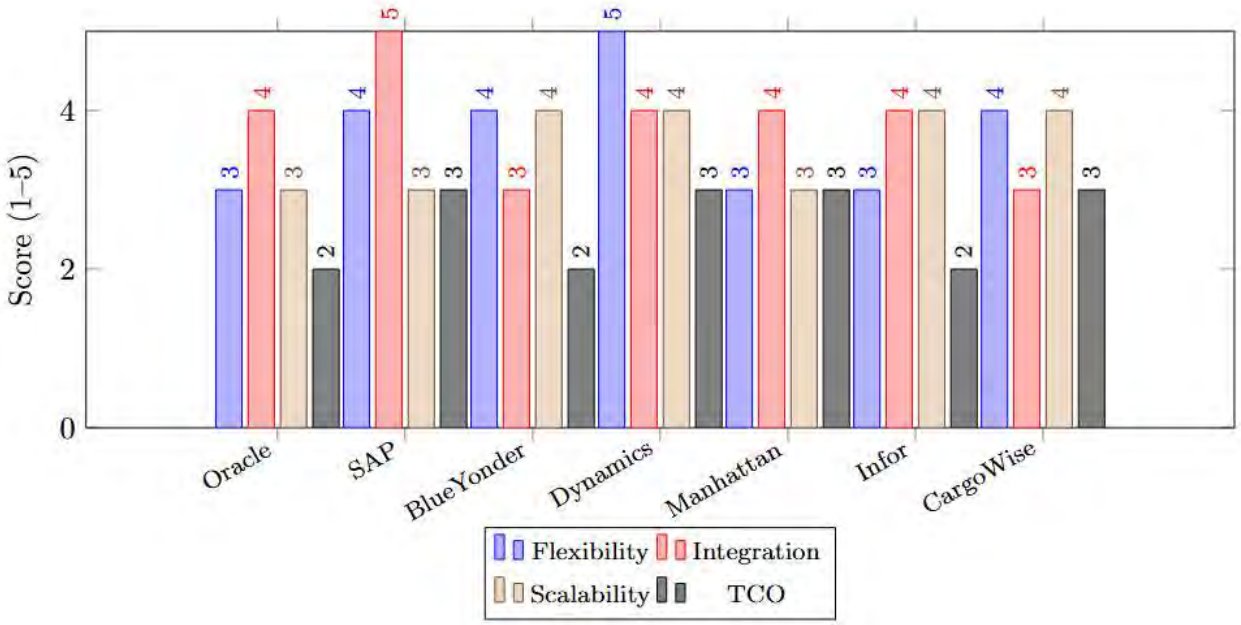


Рисунок 1.4 – Порівняльний аналіз логістичних інформаційних систем за ключовими критеріями

На ньому у вигляді діаграми (наприклад, радарної чи стовпчастої) можна буде порівняти кожне рішення за кількома ключовими критеріями: гнучкість

налаштувань, рівень інтеграції з іншими модулями, швидкість масштабування та загальна вартість володіння (TCO). Така візуалізація допоможе швидко зорієнтуватися в можливостях і обмеженнях кожного інструмента.

Загалом вибір конкретного продукту залежить від масштабів діяльності, структури логістичних процесів, фінансових можливостей та вимог до функціоналу. Для невеликих операторів чи дистриб'юторів, які вперше впроваджують автоматизацію, більш доцільними можуть бути рішення з гнучкою підпискою (SaaS). Натомість багатонаціональні корпорації з розгалуженою мережею складів і транспортних маршрутів потребують масштабованих і високовартісних систем рівня SAP, Oracle чи Infor. Важливо не лише вибрати оптимальне ПЗ, а й забезпечити правильну інтеграцію з іншими бізнес-процесами, провести навчання персоналу та регулярно відстежувати показники ефективності, щоб у разі потреби скоригувати налаштування або розширити функціонал.

Таким чином, грамотно підібрані інформаційні системи дають змогу компаніям уникати дублювання даних, скорочувати час простоїв і підвищувати прозорість усіх логістичних операцій. Завдяки цьому мережеві логістичні системи стають більш адаптивними до змін ринку, здатними швидко реагувати на збільшення або скорочення попиту, а також відповідати зростаючим очікуванням клієнтів щодо швидкості та надійності доставки товарів.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз свідчить, що класичні підходи до оптимізації логістичних процесів не враховують складності сучасних мережевих логістичних систем. Вони обмежуються базовою схемою «виробник – споживач», не враховуючи проміжні етапи, різні типи ресурсів, специфіку транспортних засобів і центри акумуляції ресурсів (ЦАР). Насправді ж у логістичних системах часто виникає розподільча задача транспортного типу, що потребує врахування

проміжних ланок і раціонального розподілу ресурсів через кілька рівнів логістичного ланцюга.

Встановлено, що введення ЦАР дозволяє скоротити загальні витрати на транспортування до 30% завдяки раціональному розподілу потоків ресурсів. Визначення зон раціонального розміщення ЦАР відіграє ключову роль у підвищенні ефективності мережевих логістичних систем. Розглянуто основні етапи розв’язання розподільчої задачі транспортного типу, показано, що підхід із використанням ЦАР дозволяє будувати гнучкіші моделі перевезень, знижувати витрати та скорочувати час доставки.

Проведений аналіз методів розв’язання розподільчих задач транспортного типу показав, що традиційні алгоритми оптимізації можуть бути малоефективними при великій розмірності задачі через високі обчислювальні витрати. Серед основних проблем: вибір початкового плану, розв’язність задачі, а також ефективність алгоритмів для великої кількості постачальників, споживачів і проміжних ланок.

Запропоновано використання наближених методів, що дозволяють отримати рішення з високим рівнем точності за коротший час. Аналіз результатів показав, що такі методи можуть значно скоротити час розрахунку без істотної втрати якості рішення, що є важливим для застосування у реальних логістичних системах.

Окремо наголошено на важливості автоматизації процесів розподілу ресурсів та необхідності розробки спеціалізованих програмних комплексів, що забезпечуватимуть прийняття раціональних рішень у логістичних мережах. Використання математичних моделей та алгоритмів оптимізації у поєднанні з інформаційними системами дозволяє підвищити ефективність логістичних операцій, мінімізувати витрати та забезпечити стабільність постачань у складних багаторівневих логістичних мережах.

Проведено аналіз існуючих інформаційних систем для логістики, що використовуються для автоматизації управління транспортом, складськими процесами та ланцюгами постачання. Показано, що найбільш ефективними є TMS,

WMS, SCM та ERP-системи, які інтегрують ключові логістичні функції та забезпечують централізоване управління потоками ресурсів. Наведено порівняння сучасних програмних рішень та продемонстровано, що вибір конкретної системи залежить від масштабу діяльності компанії, рівня її інтеграції в логістичний ланцюг і необхідності швидкого масштабування.

Для оцінки ключових характеристик інформаційних систем проведено їх порівняння за критеріями гнучкості налаштувань, рівня інтеграції, швидкості масштабування та загальної вартості володіння. Відповідний аналіз відображено у таблиці 1.3, а візуальне порівняння представлене на рисунку 1.4.

Таким чином, результати розділу 1 підкреслюють важливість використання не лише математичних методів оптимізації, але й сучасних інформаційних технологій для забезпечення ефективного управління логістичними процесами. Це дозволяє скорочувати витрати, покращувати швидкість доставки та підвищувати загальну ефективність логістичних систем у складних багаторівневих мережах.

.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИРІШЕННЯ БАГАТОІНДЕКСНИХ ЗАДАЧ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ

2.1 Формалізація багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу

На основі проведених у першому розділі досліджень можна зробити висновок, що класична транспортна задача не враховує низку критичних особливостей сучасних логістичних систем: різні види товарів, транспортних засобів, а також можливість використання центрів акумуляції ресурсів (ЦАР). Застосування багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу дає змогу подолати ці обмеження та гнучко описати дійсний процес перевезення, беручи до уваги проміжні ланки транспортно-розподільчої системи (ТРС).

Важливим прикладом такого підходу є п’ятиіндексна модель, у якій кожен індекс може відповідати окремому вимірові: виробникам, споживачам, центрам акумуляції ресурсів, типам вантажу чи видам транспорту [67]. Подібне розширення суттєво підвищує адекватність моделювання, оскільки дозволяє зважувати не лише на класичні «виробник – споживач», а й на ланцюг постачань із проміжними вузлами та додатковими технологічними операціями, що є характерним для задач дослідження операцій. У такій постановці критерієм оптимальності, як і в класичній задачі, здебільшого залишається мінімізація транспортних витрат, проте додаткові індекси відображають умови використання різних ресурсів і засобів [91–97]. Одним із головних чинників переходу до багатоіндексних задач є істотне зростання кількості споживачів порівняно з кількістю виробників. Це, своєю чергою, зумовлює потребу створення ЦАР, які зменшують витрати на перевезення та прискорюють доставку [98 – 101]. У роботах [102, 103, 104] задачу розподілу ресурсів із проміжними вузлами вперше описано як окремий клас багатошарових задач лінійного програмування. ЦАР виконують роль проміжних ланок між

виробниками та споживачами, що дає змогу структурувати матеріальні потоки та істотно підвищити гнучкість системи в умовах змін попиту та логістичної інфраструктури.

На рисунку 2.1 зображено схему взаємодії елементів у розширеній моделі «виробник – центри акумулювання ресурсів – споживач». Тут кожен шар системи має свої обмеження й параметри (пропускну спроможність ЦАР, особливості перевантажувальних операцій, тарифи для різних видів транспорту тощо), що в підсумку формує п’ятиіндексну постановку задачі розподілу ресурсів.

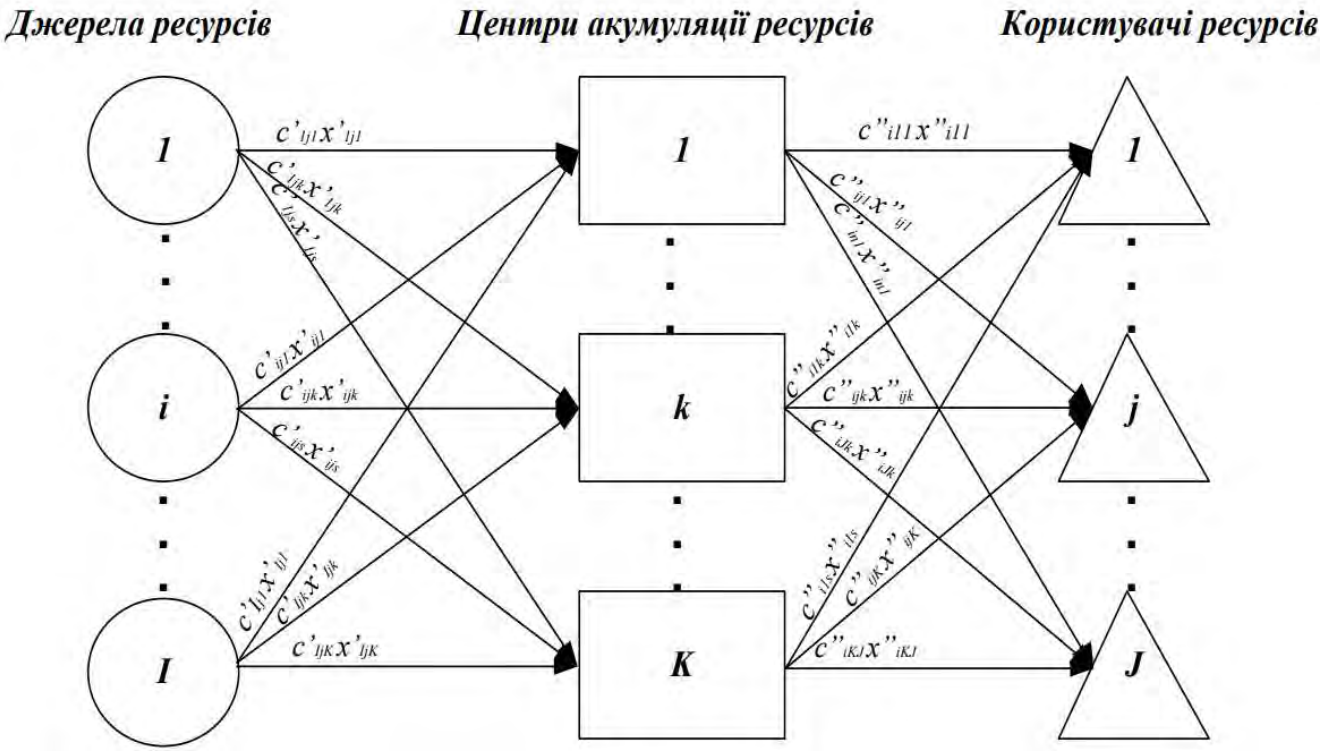


Рисунок 2.1 – Структурна модель розподілу ресурсів у вигляді двоетапної багатоіндексної транспортної задачі

Така деталізація дозволяє сформувати п’ятиіндексну постановку задачі розподілу ресурсів, що робить її гнучкішою та придатною для застосування в умовах сучасних мережевих логістичних систем. Завдяки цьому можна враховувати не лише обмеження кожного елемента системи, а й їхню взаємодію в межах загальної логістичної мережі. Подібний підхід відкриває можливість для багатокритеріальної оптимізації, де основними критеріями можуть виступати час доставки, вартість транспортування, надійність постачання та ефективність

використання ресурсів. Отже, багатоіндексна модель постає як потужний аналітичний інструмент, що забезпечує всебічний підхід до моделювання логістичних процесів доставки товарів. Вона дозволяє детально враховувати всі ключові фактори, серед яких наявність проміжних складів, різноманітність товарів та типів транспорту, змінність тарифних ставок та вплив зовнішніх умов на ефективність постачання. Такий рівень деталізації дає змогу отримувати реалістичніші та ефективніші плани розподілу, що особливо важливо в масштабних мережевих логістичних системах. Крім того, застосування багатокритеріальної оптимізації та методів обліку невизначеності робить цю модель універсальною для різних галузей, включаючи промислову логістику, транспортні мережі та управління ланцюгами постачання в умовах нестабільного ринку.

Формальне формулювання цієї задачі має такий вигляд [45]. Є I пунктів джерел (виробників) ресурсів, де a_i (i=1,2,…,I) – набір, що визначає розподіл ресурсу між виробниками, і *J* пунктів споживання цього ресурсу, де b_i *(j=1,2,…,J)* – набір, що задає потреби. Також є K центрів акумулювання ресурсів і задана матриця витрат $\mathrm{C} = (c_{ijk})$, де c_{ijk} – вартість переміщення одиниці ресурсу від *i*-го джерела до *j*-го споживача через *k*-й центр акумулювання ресурсів.

Матриця $X = (x_{ijk})$ визначає вектор кількості ресурсів, призначених для перевезення від i-го джерела до j-го споживача через *k*-й центр акумулювання ресурсів. Задача полягає у відшуканні матриці $X = (x_{ijk})$, що мінімізує загальну вартість перевезень

$$F(X) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} c_{ijk}x_{ijk} \to min \tag{2.1}$$

при обмеженнях:

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J} x_{ijk} = a_i,\ i = 1,2,\dots,I,$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I} x_{ijk} = b_j,\ j = 1,2,\dots,J \tag{2.2}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} x_{ijk} \le d_k,\ k = 1,2,\dots,K,$$

$$x_{ijk} \ge 0,\ i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,J;\ k = 1,2,\dots,K \qquad (2.3)$$

де d_k – ємність відповідних центрів акумуляції ресурсів.

Іншою причиною можливого збільшення індексності задачі є те, що в багатьох реальних випадках вартість переміщення ресурсу залежить від його типу та від виду транспортних засобів (передавальних елементів).

Розглянемо варіації трьохіндексних задач, що відповідають додатковим обмеженням, накладеним на класичну транспортну задачу [105]. Нарівні з описаною вище задачею може виникнути задача забезпечення мінімальних транспортних витрат під час перевезення однорідного ресурсу різними типами передавальних елементів. Додатково до обмежень (2.5) буде накладено обмеження на кількість ресурсів, запланованих для перевезення передавальними елементами l-го типу, що повинно відповідати можливостям цих засобів. Формальне записування задачі матиме такий вигляд [106, 107].

$$F(X) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L} c_{ijl}x_{ijl} \to min, \qquad (2.4)$$

при відповідній системі обмежень

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L} x_{ijl} = a_i,\ i = 1,2,\dots,I,$$

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L} x_{ijl} = b_j,\ j = 1,2,\dots,J, \qquad (2.5)$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} x_{ijl} \le q_l,\ l = 1,2,\dots,L,$$

$$x_{ijl} \ge 0,\ i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,J;\ l = 1,2,\dots,L, \qquad (2.6)$$

де a_i – кількість ресурсів, що знаходяться в розпорядженні i-го джерела ресурсів; b_j – кількість ресурсів, необхідних j-му споживачу; q_l – кількість ресурсів, яке може бути перевезено транспортним засобом (переміщувальним елементом) l-го типу

(вантажопідйомність); c_{ijl} – вартість транспортування одиниці ресурсу від і-го джерела ресурсів до *j*-го споживача транспортним засобом *l*-го типу.

Транспортна задача, розв'язання якої дозволяє отримати оптимальний план транспортування різнорідного ресурсу від джерел ресурсів до споживачів і забезпечити мінімальні транспортні витрати, формулюється наступним чином:

$$\sum_{r=1}^{R} x_{ijr} = a_{ij},\ i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,J,$$

$$\sum_{i=1}^{I} x_{ijr} = b_{jr},\ j = 1,2,\dots,J;\ r = 1,2,\dots,R, \tag{2.7}$$

$$\sum_{j=1}^{J} x_{ijr} \le v_{ir},\ i = 1,2,\dots,I;\ r = 1,2,\dots,R,$$

$$x_{ijr} \ge 0,\ i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,J;\ r = 1,2,\dots,R, \tag{2.8}$$

$$F(X) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{r=1}^{R} c_{ijr}x_{ijr} \to min \tag{2.9}$$

x_{ijr} – кількість r-го ресурсу, що перевозиться з *i*-го джерела до *j*-го споживача; a_{ij} – загальна кількість ресурсу, поставленого і-м джерелом ресурсів j-му споживачу; b_{jr} – кількість *r*-го ресурсу, необхідного *j*-му споживачу; v_{ir} – кількість *r*-го ресурсу, що виробляється *i*-м джерелом ресурсу; c_{ijr} – вартість транспортування одиниці *r*-го ресурсу від *i*-го джерела до *j*-го споживача.

Планування роботи вантажоперевізних центрів ускладнюється, якщо перевозяться різнорідні ресурси або ж необхідно переміщати ресурси різними видами передавальних елементів. Задача стає ще складнішою, коли необхідно перевезти різнорідні ресурси різними видами передавальних елементів.

Для формалізації чотириіндексної задачі введемо позначення:

- q_{lr} – об'єм ресурсів *r*-го виду, який можна перевезти наявним передавальним елементом *l*-го виду, тобто вантажопідйомність транспортного засобу для певного виду ресурсів;
- c_{ijlr} – вартість розподілу одиниці ресурсу *r*-го виду від *i*-го джерела *j*-му

споживачу передавальним елементом l-го виду;

– x_{ijlr} – кількість ресурсу r-го виду, що транспортується від i-го виробника j-му споживачу передавальним елементом l-го виду.

Необхідно знайти план задачі (багатоіндексну матрицю) $X = (x_{ijlr})$, що мінімізує загальну вартість розподілу ресурсів [87].

$$F(X) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{r=1}^{R} c_{ijlr} \cdot x_{ijlr} \to min \tag{2.10}$$

і задовільняючий обмеженням:

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L} x_{ijlr} = a_{ir},\ i = 1,2,\dots,I;\ r = 1,2,\dots,R,$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{l=1}^{L} x_{ijlr} = b_{jr},\ j = 1,2,\dots,J;\ r = 1,2,\dots,R, \tag{2.11}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} x_{ijlr} \le q_{lr},\ l = 1,2,\dots,L;\ r = 1,2,\dots,R,$$

$$x_{ijlr} \ge 0,\ i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,J;\ l = 1,2,\dots,L;\ r = 1,2,\dots,R. \tag{2.12}$$

де a_{ir} - запаси r-го ресурсу в i-му пункті виробника; b_{jr} – потреба у r-му ресурсі у j-му пункті споживача.

Отримано чотирихиндексне завдання розподілу ресурсів. Істотним доповненням до цього завдання, що враховує перевезення неоднорідного ресурсу передавальними елементами різного типу, є наявність центру акумуляції ресурсів:

$$F(X) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{l=1}^{L}\sum_{r=1}^{R} c_{ijklr} \cdot x_{ijklr} \to min, \tag{2.13}$$

$$x_{ijklr} \ge 0,\ i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,J;$$

$$k = 1,2,\dots,K;\ l = 1,2,\dots,L;\ r = 1,2,\dots,R. \tag{2.14}$$

Обмежувальні умови будуть складатися з (1.18), залежно від специфіки та сфери застосування задачі розподілу ресурсів. Загальне формулювання багатоіндексного завдання розподілу ресурсів визначиться так [77]:

Необхідно знайти набір $X = (x_1, x_2, \ldots, x_k$, що мінімізує функцію:

$$F(X) = \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \ldots \sum_{i_k=1}^{n_k} c_{i_1 i_2 \ldots i_k} x_{i_1 i_2 \ldots i_k}, \tag{2.15}$$

що задовольняє обмеженням:

$$\begin{aligned}
&\sum_{i_1=1}^{n_1} x_{i_1 i_2 \ldots i_k} = b_{i_2 i_3 \ldots i_k},\ i_q \in I_q,\ i_q = (2,3, \ldots, k),\\
&\sum_{i_2=1}^{n_2} x_{i_1 i_2 \ldots i_k} = b_{i_1 i_3 \ldots i_k},\ i_q \in I_q,\ i_q = (1,3, \ldots, k),\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\sum_{i_k=1}^{n_k} x_{i_1 i_2 \ldots i_k} = b_{i_1 i_2 \ldots i_{k-1}},\ i_q \in I_q,\ i_q = (1,2, \ldots, k-1),
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Обсяги перевезень є невід'ємними числами:

$$x_{i_1 i_2 \ldots i_k} \geq 0,\ i_1 \in I_1,\ i_2 \in I_2, \ldots,\ i_k \in I_k \tag{2.17}$$

де $c_{i_1 i_2 \ldots i_k}$ – матриця вартості транспортування одиниці ресурсу $x_{i_1 i_2 \ldots i_k}$ при умовах $i_1 i_2 \ldots i_k$; $b_{i_1 i_2 \ldots i_{k-1}}$- сукупний обсяг ресурсів, що переміщуються при умовах $i_1 i_2 \ldots i_k$.

2.2 Властивості багатоіндексної задачі розподільчої задачі транспортного типу в контексті доставки товарів

Розглянемо властивості багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу. Нехай $z = \{1,2, \ldots, m\}$ – множина з m натуральних чисел. Кожному числу $h \in z$ поставимо у відповідність параметр i_h, що є індексом, який набуває значень із множини $\{1,2, \ldots, n_h\} = I_h$. Набір значень індексів $(i_1, i_2, \ldots, i_m)$ називатимемо m-вимірним індексним елементом і позначатимемо через *Z*. Тоді, за означенням [21, 22],

$$Z = (i_1, i_2, \dots, i_m), \tag{2.18}$$

де $i_1 \in \{1,2,\dots,n_1\} = I_1, i_2 \in \{1,2,\dots,n_2\} = I_2, \dots, i_m \in \{1,2,\dots,n_m\} = I_m$.

Кількість різних наборів значень індексів $(i_1, i_2, \dots, i_m)$ дорівнює $N = \prod_{h=1}^{m} n_h$. Усі ці набори утворюють множину E m-вимірних індексів Z, що визначається як прямий добуток множин $I_1, I_2, \dots, I_m$:

$$E = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_N\} = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_m. \tag{2.19}$$

Кожному m-вимірному індексному елементу $Z \in E$ поставимо у відповідність змінну $x_{i_1 i_2 \dots i_m} = x_z$. Сукупність таких чисел для всіх можливих значень індексів $(i_1, i_2, \dots, i_m)$ називатимемо m-індексною матрицею, що позначатиметься як $\{x_{i_1 i_2 \dots i_m}\} = \{x_z\}$.

Таким чином, багатоіндексну (m-індексну) транспортно-розподільчу задачу можна записати у вигляді:

$$F(X) \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_m=1}^{n_m} c_{i_1 i_2 \dots i_m} \, x_{i_1 i_2 \dots i_m} \to min \tag{2.20}$$

за умови виконання таких обмежень:

$$\begin{gathered} \sum_{i_1=1}^{n_1} x_{i_1 i_2 \dots i_m} = b_{i_1 i_2 \dots i_m}, i_1 \in I_1 \\ \sum_{i_2=1}^{n_2} x_{i_1 i_2 \dots i_m} = b_{i_1 i_2 \dots i_m}, i_2 \in I_2 \\ \sum_{i_m=1}^{n_m} x_{i_1 i_2 \dots i_m} = b_{i_1 i_2 \dots i_m}, i_m \in I_m \end{gathered} \tag{2.21}$$

де обсяги доставки товарів (перевезень) повинні бути невід'ємними:

$$x_{i_1 i_2 \dots i_m} \geq 0, i_1 \in I_1,\ i_2 \in I_2, \dots, i_m \in I_m. \tag{2.22}$$

Тут $c_{i_1 i_2 \dots i_m}$ – коефіцієнт, наприклад, вартість перевезення одиниці ресурсу $x_{i_1 i_2 \dots i_m}$ за умов $(i_1, i_2, \dots, i_m)$, $b_{i_1 i_2 \dots i_m}$ – відповідний загальний обсяг ресурсів, який необхідно перемістити за тих самих умов.

Введемо m-індексні матриці $\{c_Z\}$, $\{x_Z\}$ та u підмножин $Z_j, j \in \{1,2,\dots,u\}$. Тоді багатоіндексна задача розподілу ресурсів полягає у пошуку набору $X = \{x_Z\}$,

що мінімізує лінійну функцію

$$F(X) = \sum_E c_Z x_Z \to min \tag{2.23}$$

дотримання таких обмежень:

$$\sum_{E_1} x_Z = b_Z, Z_1 \in E_1,$$

$$\sum_{E_2} x_Z = b_Z, Z_2 \in E_2 \tag{2.24}$$

$$\sum_{E_u} x_Z = b_Z, Z_u \in E_u$$

$$x_Z \geq 0, Z \in E$$

Багатоіндексна задача розподілу ресурсів (2.25–2.26) містить

$$N = \prod_{h=1}^{m} n_h \tag{2.25}$$

змінних. Система рівнянь складається з u груп лінійних рівнянь; у *j*-тій групі є U_j рівнянь, а загальна кількість рівнянь у системі дорівнює

$$U = \sum_{j=1}^{u} U_j. \tag{2.26}$$

Сформулюємо m-індексну розподільчу задачу R_s у векторно-матричній формі. Кожній змінній $x_Z, Z \in E$ поставимо у відповідність *U*-вимірний вектор

$$P_Z = \left(w_{1Z}, \dots, w_{UZ_n}\right), \tag{2.27}$$

де $w_{UZ_n}, k \in \{1,2,\dots,U\} = 0$, якщо змінна z_Z не входить у *k*-те рівняння системи, і, якщо вона входить з певним коефіцієнтом a_Z. Таким чином отримаємо:

$$P_Z = \underbrace{0 \dots a_Z^1 \dots 0}_{U_1 \text{ компонент}} \underbrace{0 \dots a_Z^2 \dots 0}_{U_2 \text{ компонент}} \underbrace{0 \dots a_Z^u \dots 0}_{U_u \text{ компонент}} \tag{2.28}$$

де у кожній з u груп умов змінна x_Z може мати лише один ненульовий коефіцієнт. Із векторів P_Z, $Z \in E$, формуємо матрицю П розміром $U \times N$:

$$\Pi = ||P_{Z1}, P_{Z2}, \dots, P_{Zn}||. \tag{2.29}$$

Визначимо вектор обмежень B, з урахуванням усіх груп умов (2.30). Інтерпретуючи m-індексні матриці $\{c_Z\}$, $\{x_Z\}$ як вектори

$$C = (c_1, c_2, \dots, c_N), \quad \mathrm{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N), \tag{2.30}$$

отримаємо багатоіндексну задачу лінійного програмування у векторно-матричному вигляді:

$$F(X) = \mathrm{C}X, \tag{2.31}$$

При обмеженях

$$\Pi X = \mathrm{B}, \mathrm{X} \geq 0. \tag{2.32}$$

У матриці П є u груп рядків. При цьому j-та група відповідає j-тій групі умов (2.28) і містить по одній «одиниці» в кожному стовпці (відповідно до структури рівнянь). Отже, сумування всіх рівнянь у межах однієї групи для певного j дає

$$\sum_{Z \in \mathrm{E}} x_z = \sum_{Z_j \in E_j} x_{z_j}^j. \tag{2.33}$$

Загалом, у системі лінійних рівнянь може існувати щонайменше m−1 лінійно залежних обмежень, які належать до різних груп. У загальному випадку кількість таких залежних рівнянь $\rho \geq u - 1$і повністю визначається структурою матриці П.

На практиці подібні задачі постають під час організації перевезень товарів, коли доступна база даних щодо продажів та історичних замовлень. Якщо позначити через c_i та d_i коефіцієнти (наприклад, лінійної регресії), то з їх допомогою можна прогнозувати попит або обсяги постачання на деякий майбутній період. У разі наявності невизначеності (варіації попиту, пропозиції та вартості перевезень) дані можуть бути скориговані на основі статистичних методів чи моделей прогнозування. Це дає змогу успішно застосовувати багатоіндексну задачу розподілу ресурсів для оптимізації логістичних процесів, ураховуючи можливі коливання або неповні відомості про майбутні умови перевезень.

Важливо підкреслити, що саме багатовимірність такої постановки робить її придатною для складних сценаріїв, де кожен додатковий індекс дає змогу фіксувати новий шар або вимір логістичної системи. Унаслідок цього модель охоплює не тільки різні типи товарів і транспорту, а й проміжні центри перерозподілу, складські вузли та навіть регіональні відмінності в попиті. Тому багатоіндексна схема виявляється більш масштабованою, ніж класичні двоіндексні

задачі, адже зростання кількості індексів дає змогу без радикального перегляду всієї структури додавати все нові логістичні умови.

Водночас значна кількість змінних та обмежень, притаманна такій моделі, тягне за собою підвищення складності розрахунків. Кожне додаткове вимірювання може істотно вплинути на тривалість обчислень і зробити задачу більш чутливою до змін вхідних параметрів. Скажімо, якщо в системі з'являється новий тип транспорту або варіюється тариф, навіть незначне коригування може призвести до повного перегляду оптимального плану. Проте саме ця чутливість дає і перевагу — модель здатна відобразити реальні коливання попиту чи транспортних можливостей і відшукати план, що залишається дієвим за різних сценаріїв розвитку подій. Подібний підхід також відкриває простір для багатокритеріальної оптимізації, де, крім вартості перевезень, можна брати до уваги швидкість доставки, надійність мережі чи навіть екологічні чинники.

Порівняно з двоіндексними транспортними задачами, багатоіндексна модель краще відповідає потребам сучасної логістики. Якщо двоіндексний варіант пасує для відносно простих ланцюгів «виробник – споживач», то багатовимірна схема дає змогу підхопити дійсно складну інфраструктуру, де діють різні види перевезень, різнорідні ресурси та декілька проміжних етапів дистрибуції. Це стає особливо цінним, коли необхідно організувати перевезення товарів із різними вимогами до умов зберігання (наприклад, продукти, що швидко псуються, та промислові матеріали) або коли логістична мережа охоплює кілька рівнів дистрибуції. При цьому, додаючи зайві виміри, фахівець отримує змогу відобразити всі специфічні обмеження та взаємозв'язки без спрощень, які часто виводять класичну транспортну задачу за межі реалістичності.

На практиці це дає змогу гнучкіше планувати маршрути й партії вантажів. Якщо компанія має розгалужену інфраструктуру з численними складами, можна застосувати додатковий індекс, який описує конкретні склади або дистрибуційні центри. Якщо ж актуальна різниця між кількома видами транспорту, що істотно впливає на вартість, терміни чи умови перевезення, досить увести додаткову координату й відобразити тим самим усі особливості кожного виду перевезень.

Така модель у підсумку забезпечує побудову комплексних логістичних сценаріїв, де оптимальний план визначається не лише мінімізацією класичних «транспортних» витрат, а й урахуванням реальних бізнес-вимог, наприклад строків поставки, температурних режимів або пропускної здатності окремих вузлів. Завдяки цьому багатоіндексні задачі стають одним із найефективніших інструментів для проектування та вдосконалення мережевих логістичних систем, які мають залишатися стабільними й результативними в умовах постійних змін ринку та зовнішніх чинників.

2.3 Області застосування методу вирішення багатоіндексної розподільчої задачі

Методи розв’язання багатоіндексних задач розподілу ресурсів є надзвичайно гнучкими й придатними для широкого класу прикладних задач у системах транспортного типу [28]. Хоча подібні задачі часто пов’язують із класичними транспортними задачами, їх застосування виходить далеко за межі перевезення матеріальних ресурсів від виробника до споживача. Показники витрат c_{ij} або, відповідно, c_{ijklr} можуть мати найрізноманітніший зміст, залежно від конкретної постановки задачі та характеру процесу, що аналізується. Наприклад, у виробничих системах ці параметри можуть відповідати витратам на зміну технологічних режимів або втратам продуктивності, у логістиці – транспортним витратам чи вартості зберігання, а в інформаційних системах – часу обробки або передачі даних.

Таким чином, багатоіндексні моделі дозволяють гнучко адаптуватися до специфіки різних предметних областей, забезпечуючи ефективне вирішення широкого спектра оптимізаційних задач. Методи вирішення таких задач поділяються на точні алгоритми (метод потенціалів, метод розгалужень і меж, симплекс-метод), наближені методи (жадібні алгоритми, модифіковані варіанти

транспортних алгоритмів) та евристичні та метаевристичні підходи (генетичні алгоритми, мурашині алгоритми, методи рою частинок).

До подібних задач належать [10, 38–42, 106, 112], зокрема:

Оптимальне закріплення операцій оброблення деталей за верстатами. У такій постановці c_{ij} може інтерпретувати не лише «витрати на переналагодження», а й продуктивність, тобто швидкість або вигоду від оброблення певного типу деталей на певному верстаті. Задача полягає в тому, щоб розподілити операції (задавши час або обсяг обробки) між верстатами так, аби отримати максимальний (або мінімізувати витрати) виробничий результат.

Оптимальні призначення або проблема вибору. Є S різних механізмів (або верстатів, систем, працівників тощо) та R видів робіт із заданою продуктивністю c_{ij}. виникає потреба визначити, який механізм якою роботою повинен займатися, щоб досягти найвищої сумарної ефективності.

Задача укладання розкладу. Класичний приклад – складання розкладу занять, коли індекси можуть відповідати «предметам», «аудиторіям», «викладачам» та ін. «Вартість» може відображати несприйнятливий час, логістичні обмеження, пріоритети тощо.

Задача цільового розподілу (target allocation). Застосовується в економіці, коли потрібно пропорційно чи за певним критерієм розподілити обмежений ресурс між кількома підрозділами/проектами з урахуванням попиту, бюджету та додаткових технологічних вимог.

Задача перевезень із проміжною обробкою (multi-stage transportation). Тут частина ресурсів може зазнавати додаткової переробки або підготовки на проміжних вузлах. Обмеження та витрати стають багатоіндексними, оскільки враховують види обробки, типи складських приміщень, умови зберігання тощо.

Задача перевезень із резервуванням. Може постати в ситуаціях, коли необхідно зарезервувати певну частку потужностей (наприклад, складського простору чи транспортних засобів) під потенційні пікові навантаження.

Задача про скорочення виробництва з урахуванням сукупних витрат. Виникає, коли потрібно оптимізувати одночасно виробничі та логістичні витрати

(наприклад, у періоди зниження попиту), визначаючи, до якої міри скорочувати виробництво та як перерозподіляти залишки ресурсів між споживачами чи складами.

Задача розподілу пропускної здатності каналів передачі даних в Інтернет-провайдерів. Тут ресурсом є канальна пропускна здатність, а «споживачами» виступають окремі мережні вузли чи сегменти. Вартість c_{ij} може відображати час затримки, енергоспоживання обладнання або інші мережні показники.

Задача про максимальний потік і про найкоротший шлях. У загальному випадку вони можуть бути зведені до збалансованих чи незбалансованих задач розподілу (особливо якщо застосовано багатоіндексний опис мережі). Для задачі про максимальний потік часто враховують кілька показників (пропускна здатність, вартість) одночасно, що є близьким до багатоіндексної постановки.

Задача об'ємно-календарного планування для підприємств із одиничним або дрібносерійним характером виробництва. Логіка подібна до складних багатовимірних транспортних задач: визначають, куди та коли передавати заготовки, напівфабрикати чи інформаційні потоки, дотримуючись технологічних маршрутів, виробничих потужностей і термінів виконання.

Задача збалансованого завантаження розподіленої обчислювальної системи. Вважаємо, що «ресурсом» є обчислювальні завдання (або навантаження), а «споживачі» – сервери чи кластери. Кожен індекс може відображати тип задачі, географічне розташування центру обробки, характеристики мережі тощо.

Задачі планування транспортування газу чи нафтопродуктів (зокрема, об'ємно-календарне планування для нафтопереробних підприємств). Тут ресурси мають фізичні обмеження (наприклад, різні сорти нафти чи газу), логістика може передбачати кілька типів трубопроводів чи резервуарів, а витрати залежать від відстані, тиску тощо.

Практичне застосування методів розв'язання розподільчих задач відбувається в межах функціонування інформаційно-керуючих систем підприємств чи організацій. Організаційна структура таких систем безпосередньо пов'язана зі

структурою самих підприємств (або організацій) і залежить від кількості й типів розв'язуваних завдань [91]. Завдання з розподілу ресурсів полягає в тому, щоб виконати всі обмеження інформаційної системи та отримати таке розв'язання, яке визначить оптимальний режим функціонування. Це дозволяє ефективніше приймати рішення щодо організації та оперативного планування виробничих і розподільчих процесів.

Багатоіндексні задачі реалізуються у рамках сучасних інформаційних систем управління логістикою (TMS, WMS, ERP-системи). Найпоширеніші програмні рішення, що підтримують такі моделі:

1. SAP Transportation Management (SAP TM) – використовується для оптимізації транспортних потоків у великих корпораціях, дозволяє враховувати багаторівневі маршрути доставки.
2. Blue Yonder (JDA Software) – застосовується для прогнозування попиту, планування перевезень та управління ланцюгами постачання.
3. Manhattan Associates – спеціалізоване рішення для управління складською логістикою, що використовує евристичні методи та AI-алгоритми.
4. Infor Nexus – платформа для управління глобальними логістичними мережами, що підтримує методи багатокритеріальної оптимізації.
5. CargoWise – використовується логістичними операторами для автоматизації процесів перевезення, аналізу маршрутів та управління транспортними засобами.

Дані системи були детально досліджені у розділі 1.6.

2.4 Застосування методу декомпозиції для вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу у мережевих логістичних системах

Процедура закріплення центрів акумуляції ресурсів дозволяє звести п'ятиіндексну задачу розподілу ресурсів до двох трьохіндексних завдань оптимального розподілу ресурсів (див. рисунок 2.2). У цих завданнях окремо

враховуються переміщення від джерел ресурсів до центрів акумуляції та від центрів акумуляції до споживачів.

Сукупні витрати на розподіл ресурсів у транспортно-розподільчій системі визначаються цільовою функцією $F(X)$, яка набуває вигляду:

$$F(X) = F'(X) + \mathrm{F}''(X) = \sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{i=1}^{I}\sum_{l=1}^{L}\sum_{r=1}^{R} c'_{jlr}\ x'_{jlr}\right) + \sum_{k=1}^{K}\left(\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{r=1}^{R} c''_{jlr}\ x''_{jlr}\right) \longrightarrow min. \quad (2.34)$$

Де $F'(X)$ – витрати на доставку ресурсів від джерел до центрів акумуляції ресурсів, $F''(X)$ – витрати на переміщення ресурсів від центрів акумуляції ресурсів до споживачів.

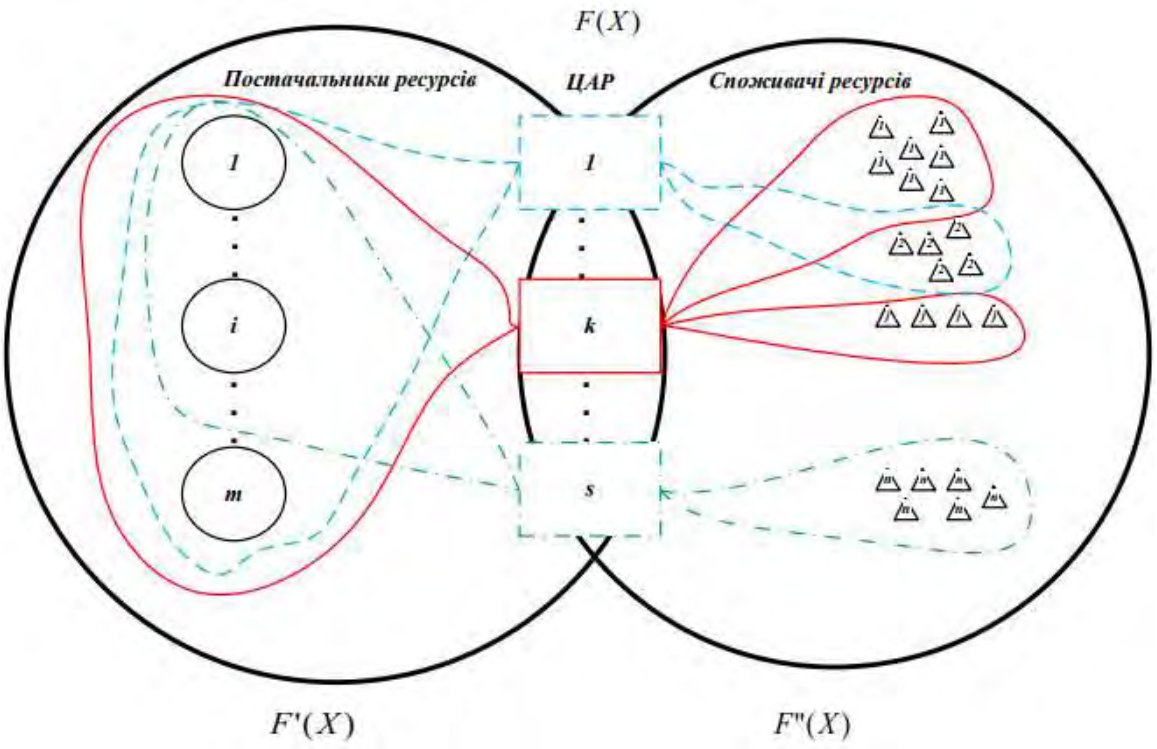


Рисунок 2.2 – Модель декомпозиції п’ятиіндексної задачі постачання ресурсів через центри акумуляції на дві трьохіндексні задачі

Відповідно, план перевезення між джерелами й центрами акумуляції та план перевезення між центрами акумуляції й споживачами пов’язані лише опосередковано (через загальний баланс ресурсів). Для джерел ресурсів визначальним є лише загальний обсяг випуску, який залежить від попиту споживачів, що надходить через центри акумуляції. Таким чином, обидві трьохіндексні транспортні задачі можна розв’язувати незалежно та в довільній

послідовності (залежно від особливостей постановки).

Одним із найбільш поширених способів розв'язання задач великої розмірності є застосування декомпозиційних методів, що активно використовуються в дослідженні операцій [122–127]. Головна ідея декомпозиції полягає в тому, щоб розбити вихідну велику задачу на менші підзадачі, розв'язання яких є простішим або швидшим, а потім скомпонувати отримані часткові розв'язки в єдиний глобальний розв'язок. Використання декомпозиційних підходів особливо ефективне, коли у задачі наявна блокова структура матриці обмежень, або коли підзадачі є слабо пов'язаними між собою. Це дає змогу істотно зменшити обчислювальні витрати та покращити масштабовність алгоритму.

У випадку трьохіндексних транспортних задач наприклад, (i,j,r), часто застосовують підхід, коли послідовно надають індексу NMr (тип ресурсу) значення $1,2,\ldots,R$ і розв'язують R двоіндексних задач. Однак, як показано в роботі [31], подальша декомпозиція, що розбиває задачу ще на менші підзадачі, може призвести до неоптимального розв'язку, оскільки відносини між різними індексами стають узгодженими недостатньо жорстко.

Особливості застосування декомпозиції до багатоіндексних задач

Для п'ятиіндексної задачі розподілу ресурсів (див. розділ 2.1) застосування методу декомпозиції є виправданим лише в тих випадках, коли:

1. Центри акумуляції ресурсів закріплені жорстко за певними джерелами та/або споживачами. Це означає, що з кожного джерела ресурсів визначено фіксований набір центрів акумуляції, куди може бути спрямований ресурс, а також кожен споживач обслуговується конкретним набором центрів. У такому разі загальна задача розпадається на дві окремі трьохіндексні задачі (джерело–ЦАР–ресурс та ЦАР–споживач–ресурс), які можна розв'язувати незалежно.
2. Є потреба в скороченні обчислювальної складності при великій кількості джерел, споживачів або видів ресурсів. Якщо структура поставок уже попередньо визначена (наприклад, через контрактні зобов'язання чи географічні обмеження), то підхід «джерело–ЦАР–споживач» суттєво полегшує задачу.

Натомість, коли джерела ресурсів і споживачі не закріплені за конкретним

центром акумуляції, постає повноцінна п’ятиіндексна задача, яку неможливо коректно розв’язати простою декомпозицією без втрати оптимальності. У такому випадку потрібно застосовувати:

- метод проіндексованих елементів (див. розділ 3.3),
- загальні методи математичного програмування, зокрема, методи розгалужень і меж (branch and bound), методи відсікання тощо.

У мережевих логістичних системах часто маємо справу з великою кількістю проміжних ланок (складів, перевалочних баз, сортувальних станцій тощо). У таких випадках можна застосовувати багаторівневі схеми декомпозиції, де на кожному рівні (ланці логістичного ланцюга) розв’язується зменшена розподільча задача транспортного типу. Наприклад:

- Рівень 1: розподіл між виробниками й центральними складами.
- Рівень 2: розподіл між центральними та регіональними (локальними) складами.
- Рівень 3: розподіл між регіональними складами й безпосередніми споживачами.

Однак для збереження глобальної оптимальності бажано, щоб межі між рівнями були заздалегідь чітко визначені (жорстко закріплені, як у попередньому пункті). Якщо ж поділ є довільним і взаємозв’язки між рівнями складні, то декомпозиційні методи не гарантують оптимальний розв’язок без додаткових узгоджувальних процедур.

2.5 Метод розбиття багатоіндексної задачі транспортного типу для паралельного розв’язання

Зростання масштабів та складності мережевих логістичних систем призводить до того, що класичні методи розв’язання двоіндексних транспортних задач виявляються недостатніми. Поява додаткових індексів, таких як типи

ресурсів, типи транспортних засобів чи центри акумуляції ресурсів (ЦАР), значно збільшує розмірність постановки. У результаті реалізація послідовних алгоритмів на одному процесорі може стати надто «важкою» для обчислення, особливо за умови, що значна частина логістичних систем потребує майже реального часу обробки. Один із найбільш перспективних способів підвищення ефективності при розв'язанні багатовимірних задач полягає в декомпозиції та паралельній (або розподіленій) обробці підзадач.

Нехай потрібно розв'язати багатоіндексну розподільчу задачу транспортного типу, де для кожної комбінації (i,j,k,l,m) задані відповідні обмеження та цільові коефіцієнти. Кількість постачальників і споживачів може сягати сотень, а індекси K, L, M (ЦАР, типи транспорту та види ресурсів) створюють додаткові виміри розмірності задачі. Запис загальної цільової функції має вигляд (2.13), а система обмежень включає балансові умови щодо виробничих потужностей постачальників, пропускної здатності центрів акумуляції, місткості різних типів транспортних засобів та вимог споживачів. У лінійній постановці такі додаткові індекси зумовлюють вибухоподібне зростання кількості змінних. Прагнучи отримати розв'язок у прийнятний термін, виникає потреба або в ефективних алгоритмічних вдосконаленнях, або у використанні декомпозиційних підходів із наступним паралельним виконанням.

Одним із класичних і потужних засобів декомпозиції в лінійному програмуванні є метод Данцига–Вулфа. Основна ідея цього методу полягає в поділі оригінальної задачі на сукупність «підзадач-генераторів» (subproblems) та «майстер-задачі» (master problem). Для багатоіндексної транспортної задачі можна поділити змінні за певним набором індексів, наприклад за групами постачальників або групами споживачів. Кожна підзадача відповідає розв'язанню локальної задачі, що генерує «колони» (варіанти планів) для майстер-задачі. Майстер-задача, у свою чергу, визначає, у якій лінійній комбінації ці колони слід використати, аби задовольнити глобальні обмеження та мінімізувати витрати.

Перевага цього підходу полягає в тому, що метод Данцига–Вулфа дозволяє природно розпаралелити процес. Кожна підзадача виконується незалежно, і її

обчислювальна складність зменшується, оскільки вона оперує з частиною повного набору змінних. Потім результати підзадач узгоджуються через оновлені дуальні оцінки в майстер-задачі. Хоча цей механізм вимагає певного синхронізаційного протоколу, він добре підходить для систем, де базові обчислення «сильніше завантажені», ніж передавання даних.

3. Метод розбиття задачі та паралельне обчислення

Незалежно від того, чи застосовується формальна схема Данцига–Вулфа, або ж спрощений «блоковий» поділ змінних, метод розбиття можна описати так. Спочатку визначається критерій декомпозиції – наприклад, множина постачальників ділиться на декілька підмножин *I1,I2,…,Is*. У кожній підзадачі:

1. Зафіксовано або скорочено набір постачальників до підмножини I_α.
2. Збережено всі інші індекси, але вони «вбудовані» у відносно невеликий блок або враховуються як сталі параметри (залежно від того, як організовано постановку).
3. Розв’язання підзадачі веде до отримання локального плану x_α та оцінки локальної цільової функції.

Після цього результати з усіх *s* підзадач передаються в «центральний» процес, де виконується узгодження. У найпростішому випадку (наприклад, якщо множини постачальників і споживачів неперетинні для різних підзадач) узгодження може зводитися до простого об’єднання планів. Проте частіше потрібно відкоригувати глобальні змінні (наприклад, пропускну здатність центрів акумуляції, що спільні для всіх підзадач) та відновити у повному просторі змінних. Деякі підходи передбачають ітеративний цикл, коли локальні розв’язки обраховуються заново з урахуванням скоригованих (дуальних) оцінок чи штрафних коефіцієнтів.

Значний виграш у часі отримується завдяки тому, що обсяг робіт для кожної підзадачі менший, а основна частина обчислень (метод потенціалів, метод нуль-перетворень тощо) виконується одночасно для всіх блоків. Якщо узгодження відбувається нечасто (наприклад, після однієї великої обчислювальної сесії), накладні витрати на комунікацію можуть бути мінімальні.

З теоретичного погляду, якщо маємо оригінальну задачу розмірності N змінних (спільно для всіх індексів) і ділимо її на s підзадач приблизно однакової складності, то кожна з них матиме близько N/s змінних. Для лінійних методів у найгіршому випадку складність наближається до $O(N^3)$ (хоча на практиці часто є покращення). Отже, розв'язання задачі послідовно дає складність порядку $O(N^3)$. Якщо всі s підзадач виконуються паралельно, то час на розв'язання знижується приблизно до $O(\frac{N^3}{s})$ за окремий обрахунок, але з урахуванням узгоджень та комунікацій. Якщо частка часу, що витрачається на комунікації, є відносно невеликою, то можемо орієнтуватися на приблизно лінійний виграш:

$$t_{\text{паралельне}} \approx \frac{1}{s} t_{\text{послідовне}} + t_{\text{комунікації}}. \tag{2.35}$$

У реальних сценаріях (особливо за великої розмірності) виграш може становити кілька разів або навіть порядок величини, оскільки типові методи (наприклад, ті ж методи нуль-перетворень чи модифікований метод потенціалів у п'ятиіндексних постановках) досить обчислювально «важкі». Якщо ж у ході ітерацій потрібно робити багато обмінів даними чи узгоджень, ефективність може знижуватися, проте все одно отримується помітне скорочення часу розрахунку порівняно з повністю послідовною схемою.

Для реальних логістичних задач, у яких розмірності індексних множин можуть сягати сотень тисяч змінних, отримати точне рішення послідовними методами у прийнятний термін часто неможливо. У таких випадках паралельне розв'язання дозволяє скоротити час із кількох годин або діб до прийнятних хвилин чи десятків хвилин, що суттєво впливає на практичну придатність методів у корпоративних або промислових середовищах. Крім того, запропонована схема розбиття набуває додаткової цінності при розміщенні обчислень у хмарних інфраструктурах, де можна динамічно підключати більше ресурсів (процесорів) для розв'язання складних задач у стійкі строки.

2.6 Методи визначення належності об'єкта до центру акумуляції ресурсів у мережевих логістичних системах

Центр акумулювання ресурсів (ЦАР) виступає одним із ключових елементів п’ятиіндексної розподільчої задачі транспортного типу, забезпечуючи регулювання переміщення ресурсопотоків. Аналіз практичного функціонування транспортно-розподільчих систем свідчить, що створення ЦАР обумовлено наступними чинниками [15, 16, 88, 130]:

- значні втрати матеріальних і трудових ресурсів;
- недостатнє інформаційне забезпечення збутових процесів;
- брак досвіду в управлінні матеріальними потоками;
- втрати, пов’язані з розпорошенням ресурсів.

Визначення зони раціонального розташування та кількості ЦАР дозволяє суттєво знизити витрати на доставку ресурсів споживачам. Таким чином, питання раціонального розміщення та визначення кількості ЦАР є надзвичайно актуальним, особливо при створенні нових або розширенні існуючих транспортно-розподільчих систем (ТРС).

За даними досліджень [20, 22, 130, 131, 135, 136, 138] ефективність визначення розташування ЦАР підвищується за умов можливості вибору оптимальної кількості центрів та врахування специфіки очікуваного попиту.

Одним із базових підходів до визначення потенційного розташування ЦАР є метод повного перебору всіх можливих варіантів [78, 132]. Проте з ростом кількості потенційних центрів кількість варіантів експоненційно збільшується, що призводить до дублювання деяких рішень або невідповідності заданим критеріям (наприклад, мінімізації відстаней між центрами). Тому застосування методу повного перебору доцільне лише для невеликої кількості об’єктів (до 10) [113].

Альтернативним підходом є метод «центру тяжіння поставок і попиту», за яким координати ЦАР визначаються з урахуванням географічного розташування споживачів та їхнього очікуваного попиту. Формально координати центру ваги

розраховуються за формулами:

$$x^z = \frac{\sum x_i Q_i}{\sum Q_i}, y^z = \frac{\sum y_i Q_i}{\sum Q_i} \tag{2.36}$$

Де x_z, y_z– координати центру ваги, який визначає місцеположення центру акумулювання ресурсів (ЦАР); x_i, y_i – координати і-го споживача; Q_i– очікуваний попит від і-го споживача.

Зауважимо, що даний підхід дозволяє розрахувати координати лише одного ЦАР, не враховуючи можливості розміщення декількох центрів та специфіку попиту кожного окремого споживача.

У роботах [134–139, 114, 115] продемонстровано, що кластеризація є ефективним методом об’єднання однорідних елементів у самостійну структурну одиницю. У контексті розподільчої інформаційної системи мережевої логістики кластер можна розглядати як групу споживачів, що обслуговуються одним ЦАР [124, 125]. За допомогою кластеризації можливо виокремити віддалені один від одного об’єкти, що дозволяє визначити зони їх скупчення. Цей підхід застосовується як у випадках, коли вихідні дані подано у вигляді матриць відстаней між об’єктами, так і при представленні даних у вигляді точок у багатовимірному просторі. Як зазначено в [135], вибір міри відстані є ключовим фактором, що суттєво впливає на остаточний розподіл об’єктів на кластери.

Принцип найпростішого алгоритму кластеризації (див. Рисунок 2.3) полягає у наступному:

Крок 1. Вибір центрів групування

Крок 2. Визначення відстані від всіх об’єктів кластеризації до кожного з центрів групування

Крок 3. Приєднання об'єкта, що обробляється, до тієї групи, відстань до центру якої в обраній метриці мінімально

Рисунок 2.3 – Алгоритм методу кластеризації

Варто зазначити, що різні алгоритми кластеризації відрізняються способом вибору центрів групування, метрикою для обчислення відстаней та принципом приєднання об’єктів до кластерів [134, 138, 136]. Методи кластеризації за способом приєднання об’єктів можна розділити на такі групи [135]:

– для приєднання нової точки до центру групування обчислюють відстань від цієї точки до кожного центру групування, після чого точку приписують до центру з мінімальною відстанню;

– для кожної точки визначають суму відстаней до всіх точок кожного кластера, обчислюють середнє значення відстаней до кластерів і приписують точку до кластера, для якого середнє відстань є мінімальним;

– задається раціональний порядок приєднання точок: першою приписується та точка і до того кластера, для яких середня відстань є мінімальною.

Основним недоліком зазначених методів є використання лише відстані як єдиного параметра для визначення приналежності об’єкта до кластера. Для подолання обмежень класичних методів кластеризації, у роботах [128, 139] запропоновано підхід, за яким на початковому етапі визначаються потенційні центри кластерів. Для кожної такої точки, окрім розрахунку відстані до центра групування, обчислюється потенціал, що свідчить про можливість формування кластера в її околиці. Потенціал кластера визначається за формулою:

$$P(Z_k) = \sum_{q=1}^{N} exp\left(-\alpha \cdot D\left(Z_k, x_q\right)\right), k = 1,2, \dots, K, \tag{2.37}$$

де Z_k– потенційний k-й центр групування; α – позитивна константа; $D(Z_k, x_q)$ – відстань між потенційним центром групування та об’єктом.

Чим щільніше розміщені об’єкти в околиці потенційного центру, тим вищий його потенціал. Після обчислення потенціалів ітеративно обирають центри кластерів серед точок з максимальними значеннями потенціалу. Проте, незважаючи на можливість врахування кількості ЦАР, використання лише параметра відстані може бути недостатньо для адекватного формування кластерів у транспортно-розподільчій структурі.

Для подальшого удосконалення методу в роботі [32] запропоновано

враховувати стохастичність попиту при розрахунку потенціалів. Зокрема, для взаємозв'язку між ЦАР та окремими підобластями реалізації ресурсу вводиться показник:

$$W_{kq} = \frac{z_k m_q}{R_{kq}^2} \tag{2.38}$$

де z_k– кількість ресурсу у k-му ЦАР; m_q – математичне сподівання попиту у q-й підобласті; R_{kq} – відстань від k-го ЦАР до q-ї підобласті реалізації ресурсу.

Подальший вибір відбувається за принципом знаходження набору(k_0, q_0), що максимізує показник W_{kq}:

$$k_0, q_0 = \arg\max, W_{kq} \qquad (2.39).$$

Після цього q_0-та підобласть закріплюється за k_0-м ЦАР і виключається з подальшого розгляду. Процедура повторюється до тих пір, поки кожному ЦАР не буде визначено відповідний набір елементарних одиниць (наприклад, квадратів).

Для розробки методу, що дозволяє визначити раціональну зону розташування ЦАР, необхідно врахувати наступні чинники:

- можливість визначення місць розташування кількох ЦАР;
- можливість коригування координат розміщення ЦАР після закріплення підобластей попиту;
- невизначеність параметрів задачі.

Урахування зазначених аспектів сприятиме розробці раціональної зони розташування ЦАР, що дозволить мінімізувати витрати на розподіл ресурсів від виробників до споживачів, підвищуючи ефективність функціонування мережевих логістичних систем.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 узагальнено теоретичні основи вирішення п'ятиіндексних задач розподілу ресурсів транспортного типу та продемонстровано значення цих моделей

для адекватного відображення складних логістичних систем в умовах розвинених інформаційних систем. Розглянуто ключові риси п’ятиіндексної постановки, що дає змогу враховувати різнорідність товарів, типів транспорту й наявність центрів акумуляції ресурсів (хабів), забезпечуючи більш реалістичне моделювання процесів постачання. Такий багатовимірний підхід дозволяє інтегровано розглядати логістичну мережу з урахуванням різноманітних факторів (від виду продукції до пропускної спроможності окремих вузлів), що сприяє підвищенню ефективності управління потоками в інформаційних системах, орієнтованих на моніторинг і контроль логістичних операцій.

Доведено, що багатоіндексна модель у контексті доставки товарів може бути формалізована методами лінійного програмування. Проте зростання кількості індексів суттєво збільшує розмірність задачі та ускладнює її вирішення. Натомість застосування п’ятиіндексної постановки дає змогу координувати процеси перевезення та зберігання різних типів продукції, забезпечувати відповідність транспортних засобів заданим вимогам і раціонально розподіляти навантаження між центрами акумуляції ресурсів. Це особливо важливо для сучасних інформаційних систем, де від ефективної логістики залежить оперативність та економічна вигода всього ланцюга постачань.

Значну увагу приділено питанням декомпозиції багатоіндексної задачі, зокрема застосуванню методу Данцига–Вулфа, що полягає у поділі вихідної задачі на підзадачі (колони) та періодичному узгодженні рішень із «майстер-задачею». Такий підхід дозволяє обмежити обчислювальну складність за рахунок локального розв’язання менших задач і координації результатів через ітеративні двоїсті оцінки. Продемонстровано, що це ефективно при великій розмірності, оскільки кожна підзадача вирішується в меншому просторі змінних, а інформаційні системи здатні паралельно обробляти дані з різних логістичних вузлів.

Розглянуто також метод блокової декомпозиції, що дає змогу розбивати п’ятиіндексну задачу розподілу ресурсів на підзадачі з подальшим розв’язанням у багатоядерному або кластерному середовищі. Така стратегія істотно прискорює розрахунки й масштабування, що є особливо актуальним для корпоративних

інформаційних систем із великими обсягами даних. Показано, що при належному виборі структури підзадач витрати на синхронізацію не перевищують 10–30% від загального часу, а прискорення наближається до лінійного з кількістю процесів.

Значущим результатом є також розгляд методів визначення належності об’єкта (споживача) до конкретного центру акумуляції ресурсів. Сформульовані критерії та алгоритми (зокрема кластерний аналіз і оптимізаційні правила) дають змогу прив’язувати споживачів до хабів із урахуванням відстані, пропускної спроможності та інтенсивності попиту. Інтеграція цих методів із багаторівневими інформаційними системами уможливлює оперативне переналаштування планів доставки при змінах у середовищі постачань.

Підсумовуючи, результати розділу 2 підтверджують доцільність застосування п’ятиіндексних постановок та декомпозиційних схем (у тому числі методу Данцига–Вулфа) для ефективного розв’язання масштабних логістичних задач у інформаційних системах підтримки прийняття рішень. Такий підхід мінімізує обчислювальні затрати, підвищує швидкодію планування та скорочує загальні логістичні витрати, сприяючи підвищенню конкурентоспроможності й надійності складних мережевих структур постачання.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ВИРІШЕННЯ БАГАТОІНДЕКСНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ У МЕРЕЖЕВИХ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

3.1 Розробка методу раціонального розташування центрів акумулювання ресурсів

У розділі 2 було розглянуто методи визначення споживача ресурсу до центру акумуляції ресурсів. В розділі 3.1 запропоновано метод раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів (ЦАР), далі позначений як NM, передбачає інтеграцію двох підходів, які враховують просторовий розподіл попиту й можливість багатоетапного коригування координат центрів. Основною метою є зменшення сукупних транспортних витрат за умов, коли попит може змінюватися в часі або залежати від зовнішніх чинників. Для розробки такого методу розглянуто комплекс із двох базових складових:

$NM = \{< G >, < Z >\}$, де:

G – "гірський" метод, що дає змогу визначати центри групування шляхом обчислення потенціалів кожної точки [128];

Z – метод "центра тяжіння", що дозволяє коригувати положення центру групування залежно від розташування закріплених підобластей [15, 20, 22].

Порівняльна характеристика запропонованого методу наведена в таблиці 3.1.

Постановку задачі можна сформулювати наступним чином. Нехай задано обмежену область *S*, що містить множину точок *(x,y).* У цій області розташовано певну кількість споживачів, яким необхідно здійснювати постачання ресурсів. Для зручності подальших обчислень вважатимемо, що сумарний обсяг ресурсів *Q*, необхідних для задоволення потреб усіх споживачів, є достатнім і походить від однієї основної бази (складу, виробника тощо). Мета полягає в тому, щоб у цій

області визначити раціональну кількість ЦАР і *координати* кожного такого центру, маючи на меті мінімізувати транспортні витрати.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика методу раціонального розміщення ЦАР

Методи / Параметри оцінки	G	Z	NM
Урахування щільності розташування споживачів	+	–	+
Коригування координат центру з огляду на просторовий розподіл	–	+	+
Застосування послідовного (ітераційного) уточнення розміщення	–	+	+
Можливість одночасного визначення кількох ЦАР	+	–	+
Оцінювання місткості ресурсів у кожному центрі (ємності ЦАР)	–	+	+
Об’єднання підходів у комплексну схему	–	–	+
Представлення результату як сукупності локацій (зони потенційно найкращих рішень)	–	–	+

Постановку задачі можна сформулювати наступним чином. Нехай задано обмежену область *S*, що містить множину точок *(x,y)*. У цій області розташовано певну кількість споживачів, яким необхідно здійснювати постачання ресурсів. Для зручності подальших обчислень вважатимемо, що сумарний обсяг ресурсів Q, необхідних для задоволення потреб усіх споживачів, є достатнім і походить від однієї основної бази (складу, виробника тощо). Мета полягає в тому, щоб у цій області визначити раціональну кількість ЦАР і *координати* кожного такого центру, маючи на меті мінімізувати транспортні витрати.

Запропонований метод NM дозволяє дослідити альтернативні конфігурації

розташування центрів акумулювання ресурсів, випробовуючи різні значення K (кількість ЦАР). Його ітераційна структура дає змогу адаптивно коригувати координати центрів залежно від фактичного розподілу споживачів і транспортних витрат. У результаті кожен сценарій оцінюється з точки зору економічної доцільності, а остаточне рішення приймається на основі мінімізації сукупних витрат.

Для розв'язання задачі запропоновано наступну послідовність дій:

Крок 1. Визначення областей попиту. Для цього необхідно:

Область S розбивають на підобласті (кластери), (підобласті s_{ij}, області $S = \sum_{i,j} s_{ij}$), наприклад, у вигляді елементарних квадратів. Для кожного кластера обчислити умовний центр з координатами x_i, y_i.

При цьому область S можна вписати у прямокутник зі сторонами a та b, який розбивається на квадрати зі стороною l (рисунок 3.1). Кількість квадратів визначається за формулою:

$$N = \frac{ab}{l^2} \tag{3.1}$$

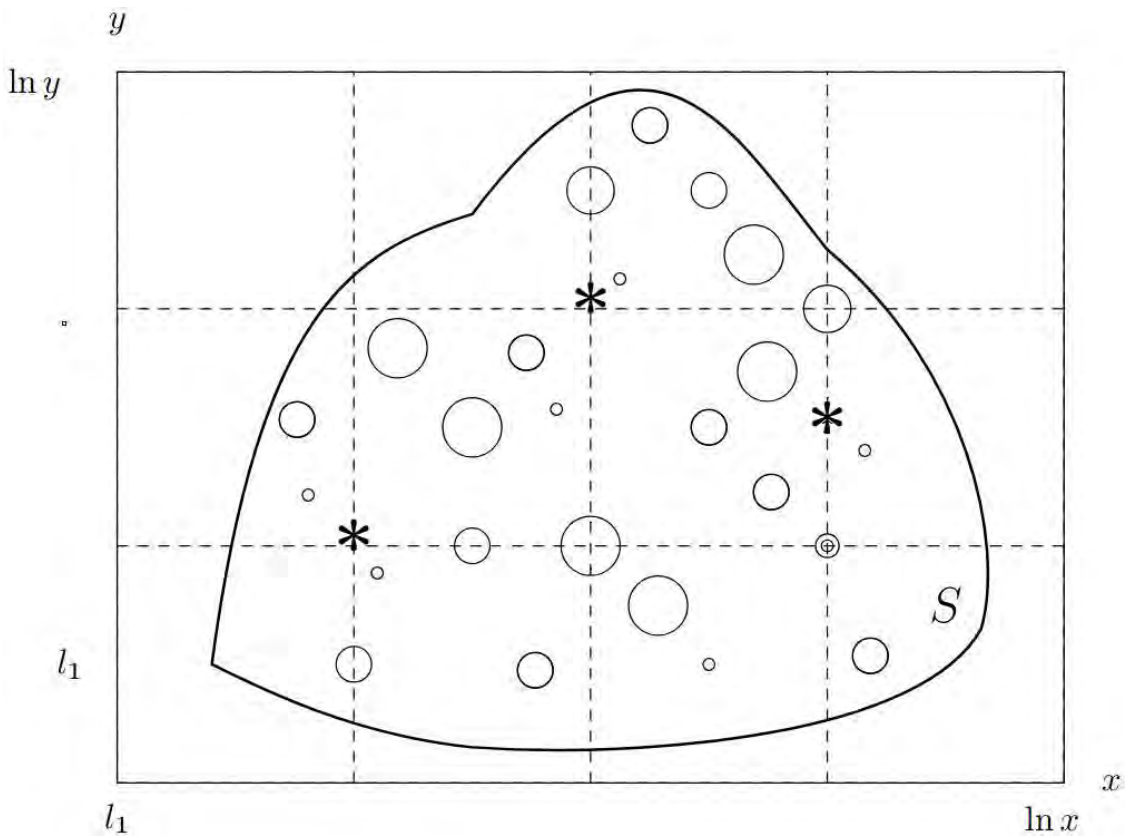


Рисунок 3.1 – Розміщення центрів аккумуляції ресурсів в області S

Кожен квадрат нумерують за двоіндексною схемою(i,j), де $i = 1,2,\dots,n_y, j = 1,2,\dots,n_x$ (при $n_y = \frac{a}{l}, n_x = \frac{b}{l}$. Для зручності розрахунків застосовується одноіндексна нумерація: $m = (i-1)n_x + j, i = 1,2,\dots,n_y, j = 1,2,\dots,n_x$.

Центр кожного елементарного квадрата визначається за формулами:

$$\mathrm{x}_{\mathrm{m}}^{(0)} = f_x(m), y_m^{(0)} = f_y(m), m = 1,2,\dots,N. \tag{3.2}$$

Загальний попит для області S виконує умову (3.3):

$$Q = \sum_{m=1}^{N} q_m \tag{3.3}$$

Крок 2. Задати кількість ЦАР та розподілити між ними ресурси.

Нехай кількість центрів дорівнює K, а їхні декартові координати позначаються як $(x_1^{(z)}, y_1^{(z)})$, $(x_2^{(z)}, y_2^{(z)}), \dots,$ $(x_K^{(z)}, y_K^{(z)})$. Початкове розміщення ЦАР визначається експертно, а ресурс (ємність) розподіляється між ними у вигляді:

$$Z = (z_1, z_2, \dots, z_k), \tag{3.4}$$

при умові:

$$\sum_{k=1}^{K} Z_{\mathrm{k}} = Q, \quad \mathrm{Z_k} \geq 0, k = 1,2,\dots,K. \tag{3.5}$$

Крок 3. Для кожної пари «ЦАР–елементарний квадрат» (k,m), де k – номер ЦАР, m – номер елементарного квадрата, обчислюється потенціал за формулою:

$$P_{km} = \frac{z_k q_m}{R_{km}^2} \tag{3.6}$$

де R_{km} є відстанню між $(\mathrm{x}_{\mathrm{k}}^{(z)}, \mathrm{y}_{\mathrm{k}}^{(z)})$ i $(\mathrm{x}_{\mathrm{m}}^{(0)}, \mathrm{y}_{\mathrm{m}}^{(0)})$. Після обчислення P_{km} можна з’ясувати, наскільки вигідно кожному центру «обслуговувати» конкретний квадрат, оскільки що вищий P_{km}, то тісніший зв’язок між споживачем і центром за заданої конфігурації.

На основі отриманих потенціалів координати центрів уточнюються:

$$x_k^{(z)} = \frac{\sum_{m=1}^{N} \mathrm{x}_{\mathrm{m}}^{(0)} q_m}{\sum_{m=1}^{N} q_m}, \quad \tilde{y}_k^{(z)} = \frac{\sum_{m=1}^{N} \mathrm{y}_{\mathrm{m}}^{(0)} q_m}{\sum_{m=1}^{N} q_m}. \tag{3.7}$$

Крок 4. Розв’язується задача визначення загальної вартості перевезення

ресурсів від кожного ЦАР до закріплених підобластей споживання:

$$F = \sum_{m=1}^{N} c_{km}^{*} q_m, \quad k = 1,2,\dots,K, \tag{3.8}$$

де c_{km}^{*} –вартість перевезення одиниці ресурсу від k-го ЦАР до m-ї підобласті.

Процедура розв’язання задачі виконується ітеративно. На першій ітерації здійснюється виконання всіх вищезазначених кроків, а наступні ітерації починаються з експертного коригування початкового розташування ЦАР з урахуванням попередніх результатів та перерозподілу ресурсу Q між центрами. Перебір різних значень K забезпечує пошук оптимального розв’язку, при якому для кожної ітерації обчислюється загальна вартість перевезення. Ітераційний процес завершується, коли результати групування споживачів до та після коригування координат збігаються.

Таким чином, інтегрований підхід, який поєднує методи G, Z забезпечує гнучке та адаптивне рішення для оптимізації розташування ЦАР, спрямоване на мінімізацію витрат на перевезення ресурсів і задоволення потреб споживачів.

Узагальнюючи, результат методу NM подають у вигляді координат центрів (або зони припустимих розташувань, якщо застосовано додаткову деталізацію) і розподілу між ними попиту з підобластей. Стійке розв’язання зазвичай ілюструється картою (рис. 3.2), де показано підобласті, «закріплені» за кожним ЦАР, а також шлях можливого зміщення центрів у процесі ітерацій. При цьому загальна вартість перевезень є основним критерієм порівняння різних варіантів.

Запропонована інтеграція «гірського» методу (G) з методом «центру тяжіння» (Z) дає змогу враховувати концентрацію споживачів та просторовий розподіл попиту, об’єднувати початковий аналіз потенціалів із покроковим коригуванням координат, мінімізувати витрати на перевезення за допомогою ітераційного пошуку.

Метод NM дозволяє розв’язувати задачі вибору як *кількості*, так і *положення* ЦАР у межах території S, з можливістю уточнення параметрів на основі проміжних результатів. Завдяки поступовому наближенню до оптимального розміщення (ітеративний підхід) метод може бути корисним у проектуванні, а

також при модернізації існуючих транспортно-розподільчих систем з урахуванням їхньої структури та специфіки маршрутів.

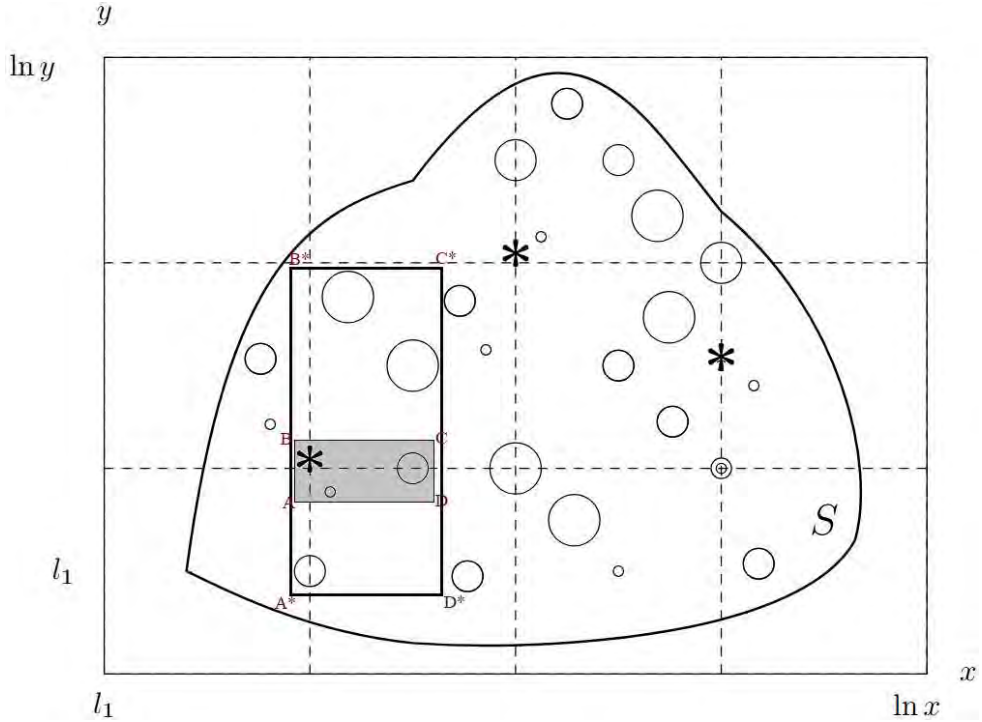


Рисунок3.2 – раціональна область розміщення центру акумулювання ресурсів

У такий спосіб описаний метод NM є гнучким інструментом для оптимального розташування центрів акумулювання ресурсів, сприяє підвищенню ефективності логістичних процесів та дає змогу зменшити витрати на перевезення у складних мережевих системах.

Результати, отримані за допомогою розробленого методу, дозволяють за допомогою розрахунку потенціалів оцінити ступінь взаємозв’язку між зонами споживання ресурсів та центрами акумулювання. При цьому враховуються обсяги попиту, пропускна спроможність (ємність) центрів та просторові відстані між ними. розглянуто можливість того, що одна й та сама зона споживання ресурсів може бути пов’язана водночас із кількома центрами акумулювання, кожен із яких має власний ступінь (коефіцієнт) належності. Такий підхід відрізняється від жорсткого (дискретного) способу закріплення, коли будь-яка зона повністю належить лише одному центру. Якщо ж параметри задачі подано у вигляді точних числових значень, матриця належності для зони q та центру k набуває форми (2.13),

а саме:

$$W = \begin{bmatrix} k/q & 1 & . & . & . & . & m \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$W = [\eta_{kq}], \eta_{kq} \in \{0,1\}, k = 1, \dots, K, q = 1, \dots, m, \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^{K} \eta_{qk} = 1, k = 1, \dots, K, 0 < \sum_{q=1}^{m} \eta_{qk} < m, q = 1, \dots, m. \quad (3.11)$$

Де елемент η_{kq} є 0 або 1. Якщо для деякої області $\eta_{kq} = 1$, тоді вона повністю належить k-му центру і не може належати жодному іншому центру ($\eta_{qk} = 0$ для інших).

У межах методу, описаного в підрозділі 2.2, для кожної пари «центр–зона» обчислюється потенціал P_{kq}., що залежить від обсягу попиту, пропускної спроможності (ємності) центру, а також відстані між ними. З огляду на цей потенціал формується так зване усереднене значення P_{kq}^{cp},, яке використовується для визначення частки належності. У найпростішому варіанті задають вираз (3.12):

$$\mu_{kq} = \frac{P_{\text{к}q}^{\text{ср}}}{\sum_{k=1}^{K} P_{\text{к}q}^{\text{ср}}}, q = 1, \dots, m;\ k = 1, \dots, K \quad (3.12)$$

що дає змогу оцінити, наскільки вигідно або раціонально закріпити q-ту зону за k-м центром порівняно з іншими варіантами. Якщо $P_{\text{к}q}^{\text{ср}}$ суттєво перевищує аналогічні показники для інших центрів, зона одержує майже стовідсоткову належність до k. Якщо ж показники потенціалу приблизно рівні, зона «ділиться» між кількома ЦАР. Запровадження часткових коефіцієнтів належності дозволяє гнучко формувати зони обслуговування в масштабах транспортно-розподільчої системи. Завдяки цьому можна запобігати надмірному перекосу завантаження одного центру й водночас залишати можливість для швидкого перерозподілу, коли деяка зона з плином часу стає ближчою або зручнішою для іншого ЦАР (через зміну маршрутів, тарифів чи попиту). На рисунку 3.3 проілюстровано приклад такої ситуації: кілька сусідніх зон отримали спорідненість до різних центрів залежно від величини потенціалів P_{kq}.

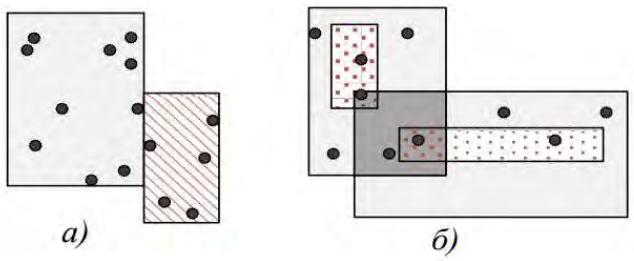


Рисунок 3.3 – результати визначення ступеня належності зон споживання ресурсів до центрів групування

Таким чином, використання часткових коефіцієнтів належності робить модель більш адаптивною до умов, коли деякі параметри можуть змінюватися або не мають яскраво вираженого екстремуму. Такий підхід допомагає ефективно балансувати між центрами акумулювання і уникати жорсткої «монополізації» зон, що особливо корисно в реальних логістичних системах із розгалуженою топологією та коливним рівнем попиту.

3.2 Розробка алгоритму визначення зони раціонального розташування центрів акумулювання ресурсів

На основі методу, описаного у розділі 3.1, побудовано алгоритмічну схему визначення зони раціонального розташування центрів акумулювання ресурсів (ЦАР). Алгоритм дає змогу визначити координати центрів і розподілити між ними обсяги попиту, використовуючи ітераційні обчислення. Алгоритмічна модель визначення раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів зображена на рисунку 3.4.

1. У початковій частині алгоритму задають:

– (a, b) – геометричні розміри області S, у межах якої розміщуються ЦАР;

– l – довжина елементарної ділянки, з яких формуються підобласті s_{ij};

– SP[i,j] – матрицю попиту для кожного елементарного квадрата (визначають або експертно, або на основі статистичних даних).

Рисунок 3.4 – Алгоритмічна модель визначення раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів

2. Розрахунок параметрів області попиту *S*. На цьому етапі область *S* розбивається на N елементарних квадратів, для кожного з яких визначаються

координати центра (x_m, y_m) та відповідні значення попиту q_m. Структурну схему підпрограми «Розрахунок параметрів області *S*» ілюструє рисунок 3.5

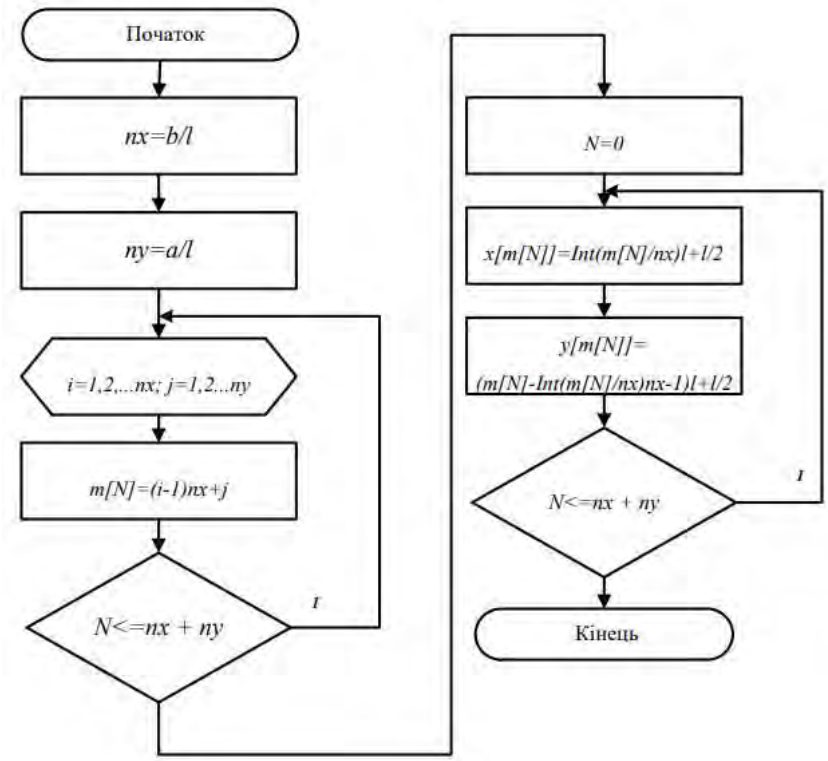


Рисунок 3.5 – Алгоритмічна модель формування координатної сітки області попиту

3. Визначають кількість центрів *K* та їх початкові координати (наприклад, на основі експертних оцінок чи прив'язки до транспортної інфраструктури). Також задають потенційні обсяги ресурсів z_k, якими кожен ЦАР може оперувати, враховуючи загальну місткість чи доступні запаси.

4. Визначення належності кожної q-ої підобласті попиту до k-го проміжного центру розподілу (рисунок 3.6). Для кожного елементарного квадрата обчислюються квадрати відстаней між його центром (x[m],y[m]) та центром k-го ЦАР (x[k],y[k]), що формує масив R^2[m,k] (рисунок 2.7).

$$R_{km} = \sqrt{(x[k] - x[m])^2 + (y[k] - y[m])^2} \tag{3.13}$$

Потім, наприклад, згідно з формулою (3.14), можна визначити показник привабливості або потенціалу:

$$P_{km} = \frac{z_k q_m}{R_{km}^2}, \tag{3.14}$$

На основі масиву потенціалів здійснюється пошук максимальних значень P[m,k] для кожного елементарного квадрата, що дозволяє визначити найбільш "привабливий" ЦАР для даної підобласті. Результати записуються у масив RASP[m], який вказує, які підобласті закріплено за відповідними центрами.

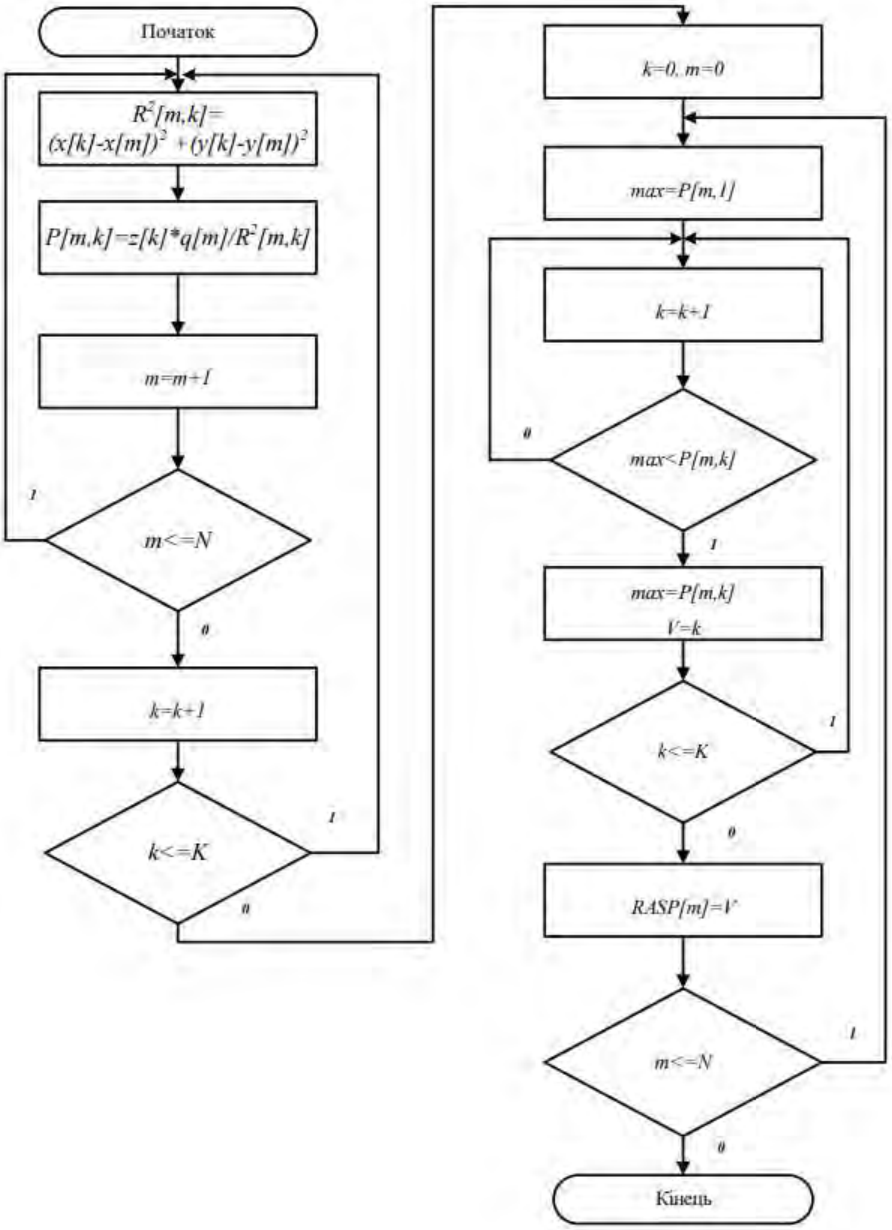


Рисунок 3.6 – Алгоритмічна модель визначення приналежності елементів області попиту до центрів акумуляції ресурсів на основі показника привабливості

5. Наступним етапом алгоритму є оновлення розташування центрів на основі нового розподілу підобластей попиту. Для цього використовується підпрограма «Розрахунок уточнених параметрів ЦАР» (рис. 3.8), яка здійснює переоцінку

координат центрів, орієнтуючись на оновлену інформацію щодо попиту. Найчастіше для цього використовується метод «центру тяжіння» (формула 3.15), що дозволяє забезпечити більш рівномірний розподіл ресурсів та мінімізувати середню відстань до споживачів:

$$x_k^{(z)} = \frac{\sum_{m=1}^{N} x_m q_m}{\sum_{m=1}^{N} q_m}, y_k^{(z)} = \frac{\sum_{m=1}^{N} y_m q_m}{\sum_{m=1}^{N} q_m}, \quad (3.15)$$

після чого нові координати записуються у масиви PCR[k,1],PCR[k,2] (рисунок 3.7).

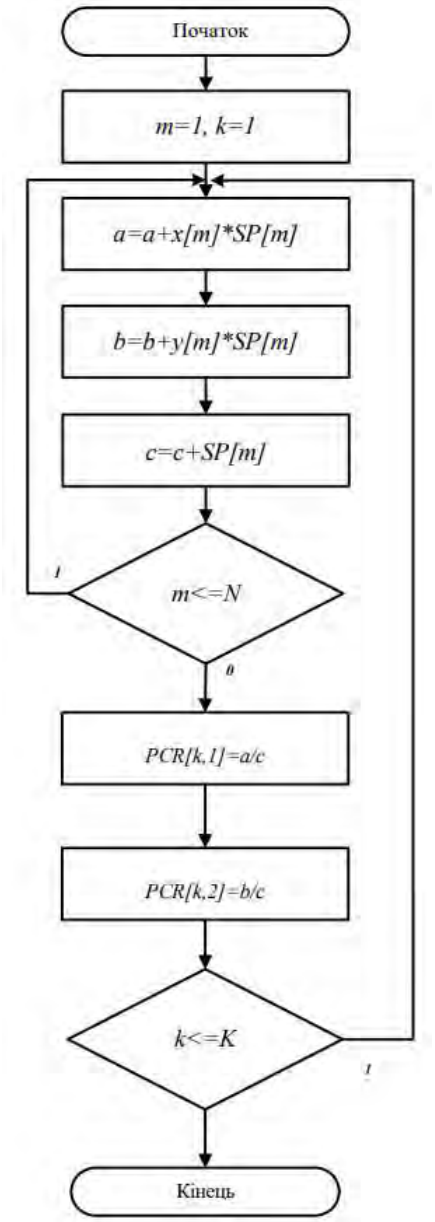


Рисунок 3.7 – Алгоритмічна модель розрахунку уточнених координат центрів акумуляції ресурсів на основі просторового розподілу попиту

6. Після оновлення координат визначають сумарну вартість доставки ресурсів від кожного ЦАР до закріплених підобластей. Її позначають F_i. Далі порівнюють результат на поточній ітерації з попереднім, щоб дізнатися, чи зменшується вартість і як сильно.

7. Якщо зміни у F_iнезначні, процедуру припиняють; інакше починають нову ітерацію з кроку 3, використовуючи скориговані координати центрів. Аналогічно можна змінювати K, повторюючи весь алгоритм для різної кількості ЦАР. У результаті одержують набір варіантів розміщення, серед яких обирають оптимальний за мінімальною вартістю перевезення або іншими заданими критеріями.

8. Формування списку закріплених підобластей і параметрів розміщення.

Після завершення ітераційного процесу алгоритм формує вихідні дані, а саме координати розташування кожного з K центрів, списки підобластей, закріплених за кожним центром, оцінку загальної вартості логістичного обслуговування F_i.

Ці результати дають змогу приймати управлінські рішення щодо розміщення центрів і формування маршрутів у мережевій логістичній системі, порівнюючи альтернативні сценарії (з різною кількістю ЦАР чи іншим розподілом попиту).

Після кожного оновлення розміщення центрів перевіряють, чи покращився критерій ефективності F_i. Цей ітераційний механізм повторюють доти, доки подальші зміни не дадуть помітного виграшу в результатах, або доки не буде досягнуто інших зупинних умов (обмеження за часом, кількістю ітерацій тощо). Якщо ж треба глибше проаналізувати різні схеми, змінюють K і знову проходять весь алгоритм, порівнюючи отримані витрати.

Отже, підсумком роботи цієї алгоритмічної схеми стає сформований набір координат проміжних центрів у межах області S, із відповідним розподілом підобластей (споживачів) між ними. Це створює основу для подальшої оптимізації маршрутів перевезень та ухвалення комплексних управлінських рішень у транспортно-розподільчих системах.

3.3 Розробка методу проіндексованих елементів для вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу

Метод проіндексованих елементів для розв’язання п’ятиіндексної транспортної задачі ґрунтується на методі нуль-перетворень (запропонованого в роботі [31] для триіндексних транспортних задач) для п’ятиіндексної задачі.

Для знаходження оптимального розв’язку п’ятиіндексної задачі розподілу неоднорідного ресурсу, що транспортується за допомогою різних передавальних елементів від виробника до споживача через центри акумуляції ресурсів (ЦАР), необхідно визначити провідні індексні елементи. Саме ці елементи формують значення цільової функції, яка мінімізує вартість розподілу ресурсу.

Для обчислення мінімальної вартості переміщення ресурсів розроблено метод розв’язання багатоіндексної задачі розподілу, який складається з послідовних етапів (див. Рисунок 3.8).

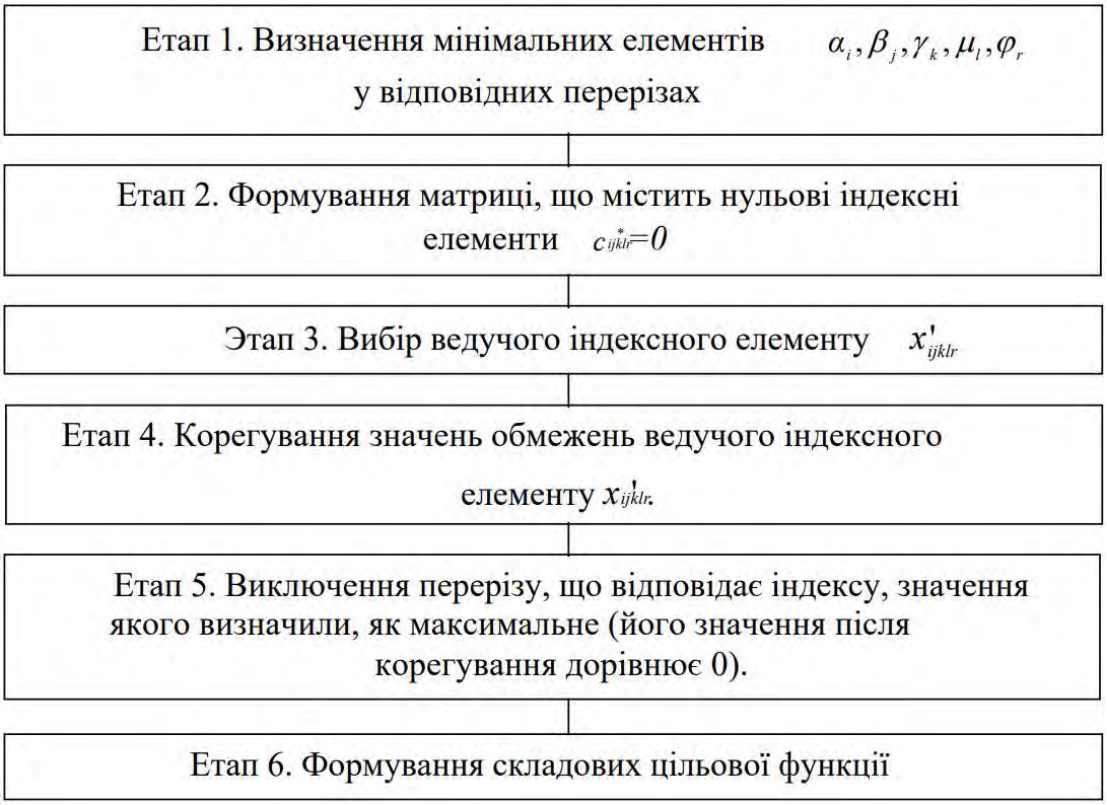


Рисунок 3.8 – Етапи формування багатоіндексної задачі методом проіндексованих елементів

Етапи розв’язання багатоіндексної задачі методом проіндексованих елементів:

1. Пошук мінімальних елементів: У кожному перерізі визначаються мінімальні елементи $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \mu_l, \varphi_r$ за формулою (3.16)

$$\begin{aligned}
&\alpha_i = \min_{j,k,l,r}\{c_{ijklr}\}, i \in \{1,2,\dots,I\}\\
&\beta_j = \min_{i,k,l,r}\{c_{ijklr} - \alpha_i\}, j \in \{1,2,\dots,J\}\\
&\gamma_k = \min_{i,j,l,r}\{c_{ijklr} - \alpha_i - \beta_j\}, k \in \{1,2,\dots,K\}\\
&\mu_l = \min_{i,j,k,r}\{c_{ijklr} - \alpha_i - \beta_j - \gamma_k\}, l \in \{1,2,\dots,L\}\\
&\varphi_r = \min_{i,j,k,l}\{c_{ijklr} - \alpha_i - \beta_j - \gamma_k - \mu_l\}, r \in \{1,2,\dots,R\}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

де: c_{ijklr} – матриця тарифів розподілу ресурсів; α_i – мінімальний елемент у *i*-му перерізі; β_j – мінімальний елемент у *j*-му перерізі; γ_k– мінімальний елемент у *k*-му перерізі; μ_l– мінімальний елемент у *l*-му перерізі; φ_r– мінімальний елемент у *r*-му перерізі.

2. Визначення нульових проіндексованих елементів: Використовуючи знайдені на першому етапі величини, обчислюємо нульові індексні елементи за формулою:

$$\mathrm{c}^*_{ijklr} = c_{ijklr} - \left(\alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \mu_l + \varphi_r\right) \tag{3.17}$$

результуюча матриця містить хоча б один нульовий індексний елемент у кожному перерізі (3.18)

$$\begin{aligned}
&\min_{j,k,l,r}\{\mathrm{c}^*_{ijklr}\} = 0, i \in \{1,2,\dots,I\}\\
&\min_{i,k,l,r}\{\mathrm{c}^*_{ijklr}\} = 0, j \in \{1,2,\dots,J\}\\
&\min_{i,j,l,r}\{\mathrm{c}^*_{ijklr}\} = 0, k \in \{1,2,\dots,K\}\\
&\min_{i,j,k,r}\{\mathrm{c}^*_{ijklr}\} = 0, l \in \{1,2,\dots,L\}\\
&\min_{i,j,k,l}\{\mathrm{c}^*_{ijklr}\} = 0, r \in \{1,2,\dots,R\}\\
&\mathrm{c}^*_{ijklr} \geq 0
\end{aligned} \tag{3.18}$$

3. Вибір провідних проіндексованих елементів: Серед нульових

проіндексованих елементів матриці c^*_{ijklr} визначають провідні, які формують оптимальне значення цільової функції. Для кожного нульового індексного елемента з множини $Z^0 = [ijklr]$, обчислюється x_{ijklr}, яке дорівнює мінімальному значенню обмежень для відповідних індексів. Серед мінімальних значень обмежень, що відповідають нульовим індексним елементам x_{ijklr}, обирається максимальне, а відповідний до нього елемент визначається як провідний індексний елемент x_{ijklr}.

4. Одержання множини нульових елементів: у результаті виконання перетворень (3.19–3.20) буде отримано множину нульових елементів $Z^0 = [(ijklr)]$, для яких значення $c^*_{ijklr} = 0$. Визначальною властивістю методу є те, що отримана матриця в результаті приведення містить $t \geq \max\{I, J, K, L, R\}$ нульових проіндексованих елементів. Ця властивість дозволяє обирати на кожному кроці обчислювальної процедури провідний індексний елемент серед нульових проіндексованих елементів $(ijklr) \in Z$ таким чином, щоб обране на цьому кроці значення x_{ijklr} було максимальним.

Для кожного індексного елемента з множини $Z^0 = [(ijklr)]$ визначається x_{ijklr}, яке дорівнює мінімальному значенню обмежень, заданих на кроці 1, за відповідними індексами (*ijklr*).

5. Перехід до наступного кроку (вилучення перерізу): Припустимо, найбільшим виявилося значення x_{ijklr} у зрізі x_{ijkl}, Тоді перед наступним кроком обчислювальної процедури відповідний зріз c^*_{ijklr} вилучають із матриці ${c_{ijkl}}^r$ і повторно виконують приведення матриці, доки не буде викреслено всі зрізи за певним індексом, що свідчитиме про вичерпання ресурсу або задоволення попиту.

6. Формування цільової функції: здійснюється шляхом підсумовування добутків провідного індексного елемента і відповідного йому значення c_{ijklr}.

Такі кроки повторюються, доки не буде повністю задоволено (або вичерпано) принаймні один з індексів задачі (наприклад, коли повністю покрито попит деякого споживача).

Послідовне застосування цієї процедури дозволяє досягти мінімального

приросту значення цільової функції на одиницю розподілюваного ресурсу на кожній ітерації обчислення.

В прикладних задачах кількість індексів може бути більшою за п’ять. У такому разі метод проіндексованих елементів для m-індексної задачі можна записати аналогічно:

$$c^*_{i_1 i_2 \dots i_m} = c_{i_1 i_2 \dots i_m} - (a^1_{i_1 i_2 \dots i_m} + a^2_{i_1 i_2 \dots i_{\tilde{S}}} + \dots + a^S_{i_1 i_2 \dots i_m}) \quad (3.19)$$

де

$$a^1_{i_1} = \min_{i_2 i_3 \dots i_m} \{c_{i_1 i_2 \dots i_m}\}$$

$$a^2_{i_2} = \min_{i_1 i_3 \dots i_m} \{c_{i_1 i_2 \dots i_m} - a^1_{i_1}\} \quad (3.20)$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$a^m_{i_m} = \min_{i_1 i_2 \dots i_{m-1}} \{c_{i_1 i_2 \dots i_m} - a^1_{i_1} - a^2_{i_2} - \dots - a^1_{i_{m-1}}\}$$

Таким чином, метод проіндексованих елементів може бути узагальнений на довільну кількість індексів, що робить його придатним для широкого класу задач розподілу ресурсів.

Методи розв’язання задач розподілу ресурсів мають широкий спектр застосувань, зокрема в економіці, логістиці, виробництві та дослідженні операцій. Не завжди вони пов’язані з доставкою матеріальних ресурсів до споживача: інколи йдеться про розподіл робочого часу, коштів або виробничих потужностей між різними видами діяльності. У загальному випадку задача розподілу ресурсів полягає в дотриманні всіх системних обмежень і забезпеченні ефективного функціонування інформаційної системи шляхом оптимального розподілу наявних ресурсів.

3.4 Розробка алгоритму вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу

Для розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, доцільно застосувати спеціалізовану покрокову процедуру, орієнтовану на

обчислення оптимального значення цільової функції та формування оптимального плану розподілу. Вхідними даними слугують: масив виробників (джерел) *I*; масив споживачів *J*; масив центрів акумуляції ресурсів *K*; масив видів ресурсів *R*; масив видів транспортних засобів (передавальних елементів) *L*. Основна ідея алгоритму полягає у поетапному визначенні базових складових оптимального плану на основі:

1. Виявлення нульових проіндексованих елементів у матриці вартості,
2. Послідовного вибору ведучого (провідного) індексного елемента та коригування обмежень,
3. Розрахунку підсумкової цільової функції,
4. Інтерпретації отриманих результатів.

Алгоритм має наступний вигляд:

Крок 1. «Введення початкових параметрів задачі» Для параметрів, які визначають множину *I*, необхідно задати дані, що описують продуктивність; для параметрів з множини *J* – попит; для параметрів з множини *K* – ресурсний обіг (ємність центрів акумуляції); для параметрів з множини *R* – кількість певного виду ресурсів; для параметрів з множини *L* – вантажопідйомність відповідного типу передавального засобу.

Далі необхідно визначити матрицю c_{ijklr}, що описує вартість розподілу одиниці *r*-го ресурсу з *i*-го центру виробництва до j-го центру споживання через k-й центр акумуляції ресурсів за допомогою передавального засобу *l*-го типу, де $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, r \in R$.

Крок 2. «Формування базових складових оптимального плану»

2.1. Визначення нульових проіндексованих елементів матриці c_{ijklr}

2.1.1. Відповідно до (3.10) обчислюються $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \mu_l, \varphi_r$

2.1.2. Відповідно до (3.9) обчислюється c^*_{ijklr}. За результатами розрахунків формується множина нульових проіндексованих елементів $Z^0 = [(ijklr)]$ для яких значення $c^*_{ijklr} = 0$.

2.2.Вибір ведучого індексного елемента:

2.2.1. Для кожного індексного елемента з множини $Z^0 = [(ijklr)]$,

визначається x_{ijklr}, що дорівнює мінімальному значенню обмежень, заданих на кроці 1, за відповідними індексами ($ijklr$)

2.2.2. Серед усіх знайдених x_{ijklr} обирається найбільше; відповідне йому значення позначається як x'_{ijklr} і вважається «ведучим індексним елементом».

2.2.3. Виконується коригування значень обмежень «ведучого» індексного елемента x'_{ijklr}.

2.2.4. Із матриці c_{ijklr} вилучається «зріз», що відповідає індексу, визначеному як максимальний (його значення після коригування дорівнює 0).

2.3. Формування масиву базових складових оптимального плану, кожен елемент якого обчислюється як добуток $x'_{ijklr} * c_{ijklr}$.

Крок 3. «Розрахунок значень цільової функції». Формується функція, що визначає оптимальну вартість розподілу одиниці r-го ресурсу з i-го центру виробництва до j-го центру споживання через k-й центр акумуляції ресурсів, за умови використання передавального засобу l-го типу ($i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, r \in R$). Згідно з кожним ведучим індексом x'_{ijklr} необхідно підставити c_{ijklr} і розрахувати цільову функцію за формулою (2.13).

Крок 4. «Інтерпретація отриманого розв’язку». Ця процедура полягає в зіставленні значень параметрів вихідних даних із розрахованими значеннями цільової функції та формуванні рекомендацій для кінцевого користувача системи.

На підставі наведеної покрокової процедури та опису в попередньому пункті, графічне подання (див. Рисунок 3.9) ілюструє остаточний алгоритм розв’язання задачі пошуку оптимального значення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу.

Рисунок 3.9 – Структурна схема алгоритму розв'язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу

Алгоритм починається з виконання кроку 1, що призначена для формування набору вихідних даних у форматі (1.22).

Як вихідні дані, необхідні для розв'язання п'ятимірної транспортної задачі (див. розділ 3.1), вводимо:

- **Post[i]** – одномірний масив, який визначає тип джерела ресурсу ($i=1...I$);
- **Potr[j]** – одномірний масив, який визначає тип споживача ресурсів ($j=1...J$);
- **CNM[k]** – одномірний масив, який визначає тип центру акумуляції ресурсів ($k=1...K$);
- **Trans[l]** – одномірний масив, який визначає тип передавального елемента ($l=1...L$);
- **Prod[r]** – одномірний масив, який визначає тип ресурсу ($r=1...R$);
- **A[i]** – одномірний масив, який визначає кількість ресурсів у і-му центрі виробництва (постачальника);
- **B[j]** – одномірний масив, який визначає загальний попит на ресурс для j-го центру споживання (споживача);
- **C[i,j,k,l,r]** – п'ятимірний масив, що містить значення вартості розподілу одиниці r-го ресурсу від і-го джерела до j-го споживача через k-й центр акумуляції з використанням передавального засобу l-го типу c_{ijklr}, заданий у вигляді NI-подання;
- **Q[k]** – одномірний масив, який визначає обмеження на обсяг для k-го типу центру акумуляції ресурсу;
- **D[l]** – одномірний масив, який визначає обмеження на обсяг перевезення для l-го виду передавального елемента;
- **P[r]** – одномірний масив, який визначає загальний обсяг r-го виду ресурсу.

Алгоритм підпрограми (див. рисунок 3.4) полягає в послідовному виконанні типових підпрограм формування одномірних масивів для параметрів **Post[i]**, **Potr[j]**, **CNM[k]**, **Trans[l]**, **Prod[r]**, **A[i]**, **B[j]**, **Q[k]**, **D[l]**, **P[r]**, а також п'ятимірного масиву **C[i,j,k,l,r]** (див. рисунки 3.10-3.13).

Рисунок 3.10 – Структурна схема підпрограми введення вхідних параметрів багаторівневої логістичної моделі розподілу ресурсів

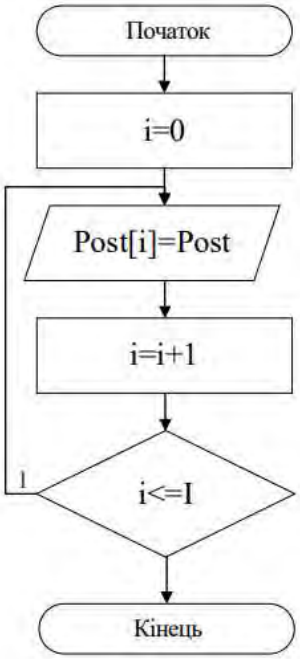


Рисунок 3.11 – Алгоритмічна модель формування одновимірного масиву параметрів постачальників ресурсів

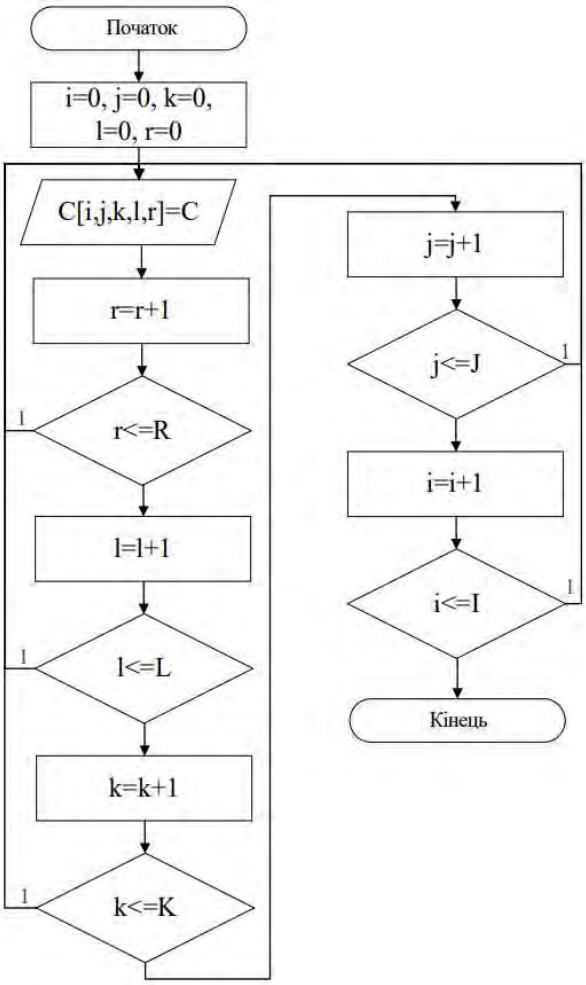


Рисунок 3.12 – Алгоритмічна модель формування багатовимірного масиву

Рисунок 3.13 – Алгоритмічна модель формування базових складових оптимального плану

Алгоритм підпрограми кроку 2. «Формування базових складових оптимального плану» (див. рисунок 3.14) описує послідовне виконання типових підпрограм формування одномірних масивів для параметрів.

Основні етапи реалізації:

1. Початкове формування допоміжного масиву**:**

Для уточнення масиву $C[i,j,k,l,r]$ використовується допоміжний масив $C_{\text{кор}}[i,j,k,l,r]$. На початковому етапі: $C_{\text{кор}}[i,j,k,l,r] = C[i,j,k,l,r]$.

2. Розрахунок уточнюючих коефіцієнтів:

Використовуючи формулу (3.9), обчислюються коефіцієнти $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \mu_l, \varphi_r$, які застосовуються для переформатування масиву $C_{\text{кор}}[i,j,k,l,r]$.

3. Формування масиву обмежень:

Масив обмежень на наявні ресурси $Ogr[s]$ визначається шляхом встановлення відповідності значенням $C_{\text{кор}}[i,j,k,l,r] = 0$.

Елемент масиву $Ogr[s]$ містить структуру полів, що відповідають:

- значенню параметра A[i];
- значенню параметра B[j];
- значенню параметра Q[k];
- значенню параметра D[l];
- значенню параметра P[r].

4. Визначення критичного показника:

Серед параметрів A[i], B[j], Q[k], D[l], P[r], що відповідають кожному елементу $C_{\text{кор}}[i,j,k,l,r] = 0$, обирається найменше значення. Серед отриманих найменших значень вибирається найбільше, після чого визначаються відповідні індекси [i,j,k,l,r].

5. Формування масиву критичних показників:

Створюється масив критичних показників $Z[p]$. Значення параметрів, які відповідають індексам максимального серед найменших значень обмежень, зменшуються на цю величину.

6. Оновлення масиву параметрів:

Після процедури віднімання найменшого значення з параметрів A[i], B[j], Q[k], D[l], P[r], визначається параметр, що дорівнює нулю. «Зріз», що відповідає нульовому значенню, видаляється з масиву параметрів як вичерпаний.

7. Повторення процедури:

Процедура повторюється, поки розмірність матриці $C_{\text{кор}}[i, j, k, l, r]$ не досягне нуля.

Як результат, алгоритм дозволяє послідовно формувати базові складові оптимального плану, уточнюючи розподіл ресурсів відповідно до заданих обмежень.

Алгоритм підпрограми кроку 3. «Розрахунок значень цільової функції». Цей етап передбачає поетапне формування функції оптимального розподілу ресурсів.

Реалізація:

1. Вхідні дані:
   - Масив $C[i, j, k, l, r]$, що містить значення вартості розподілу одиниці ресурсу;
   - Масив критичних значень $Z[p]$, сформований на попередньому етапі.
2. Розрахунок цільової функції:

Кожному елементу масиву $Z[p]$ відповідає елемент масиву $C[i, j, k, l, r]$. Сума добутків відповідних елементів двох масивів визначає значення цільової функції:

$$F = \sum_p Z[p] \ * \ C[i, j, k, l, r] \qquad (3.21).$$

3. Результат:

Значення F є оптимальною вартістю розподілу ресурсів відповідно до заданих обмежень і критеріїв.

Алгоритм підпрограми кроку 4. «Інтерпретація отриманого розв’язку». Цей етап забезпечує аналіз та представлення результатів розрахунків у вигляді рекомендацій.

4. Реалізація:
   1. Вхідні дані:
      - Масив критичних значень $Z[p]$;
      - Масиви параметрів $Potr[j], CRR[k], Trans[l], Prod[r]$.
   2. Процедура зіставлення:

Значення з масиву $Z[p]$ співставляються з параметрами масивів $Potr[j]$ (типи споживачів), $CRR[k]$ (центри акумуляції ресурсів), $Trans[l]$ (типи транспортних засобів), $Prod[r]$ (види ресурсів).

3. Рекомендації:

На основі проведеного аналізу видаються рекомендації щодо оптимального планування та розміщення потужностей, які забезпечують мінімальну вартість розподілу ресурсів. Результати дозволяють користувачу системи оцінити ефективність запропонованого плану та прийняти відповідні управлінські рішення.

4. Результат:

Побудований оптимальний план розподілу ресурсів із мінімальними витратами та детальні рекомендації для впровадження отриманого розв’язку.

3.5 Постановка і розв'язок експериментальної п’ятиіндексної задачі розподілу ресурсів

У цьому розділі розглядається експериментальна п’ятиіндексна задача розподілу ресурсів, яка покликана продемонструвати можливості та особливості застосування різних методів оптимізації, зокрема класичного методу потенціалів, , методу нуль-перетворень, а також розробленого методу проіндексованих елементів. Вихідними даними для задачі є певні множини обмежень та значення тарифів (вартостей перевезень/розподілу) для всіх комбінацій індексів, а також система нерівностей, що регламентує допустимі обсяги постачань.

Для означеної задачі використовується п’ятиіндексна модель з множинами:

$$A = \{a_i\} = \{7, 7, 16\},$$
$$B = \{b_j\} = \{1, 12, 9, 8\},$$
$$D = \{d_k\} = \{34\}, \tag{3.22}$$

$$V = \{v_r\} = \{3, 5, 22\},$$
$$Q = \{q_l\} = \{6, 4\}.$$

Змінні задачі $X = \{x_{ijkrl}\}$, де $i = 1,2,3;\ j = 1,2,3,4;\ k = 1;\ r = 1,2,3;\ l = 1,2$. відбивають кількість ресурсів, що планується постачати, а також відповідають певній комбінації «джерело–споживач–тип процесу/параметра–підклас (вид) ресурсу–часовий чи інший індекс». Потрібно знайти оптимальний план розподілу X^*, який мінімізує сумарну вартість перевезень, тобто цільову функцію:

$$\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{1}\sum_{r=1}^{3}\sum_{l=1}^{2} c_{ijkrl}\ x_{ijkrl}, \tag{3.23}$$

за умови, що:

1. $\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{1}\sum_{r=1}^{3}\sum_{l=1}^{2} x_{ijkrl} \le a_i, \quad i = 1,2,3.$
2. $\sum_{i=1}^{3}\sum_{k=1}^{1}\sum_{r=1}^{3}\sum_{l=1}^{2} x_{ijkrl} \le b_j, \quad j = 1,2,3,4.$
3. $\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{r=1}^{3}\sum_{l=1}^{2} x_{ijkrl} \le d_k, \quad k = 1.$
4. $\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{1}\sum_{l=1}^{2} x_{ijkrl} \le v_r, \quad r = 1,2,3.$ (3.24)
5. $\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{1}\sum_{r=1}^{3} x_{ijkrl} \le q_l, \quad l = 1,2.$
6. $x_{ijkrl} \ge 0 \quad \forall\, i, j, k, r, l.$

Тарифи c_{ijkrl} (вартості перевезень/розподілу) задано для всіх можливих комбінацій індексів (i,j,k,r,l). У нашому прикладі ці значення (задаються згідно з даними в завданні), наприклад: $c_{11111} = 5, c_{12111} = 1, c_{13111} = 9, \dots \dots, c_{34132} = 2.$

Для порівняння ефективності різних підходів до розв’язання такої п’ятиіндексної задачі було обрано чотири методи. Перший метод – це класичний метод потенціалів [19, 30, 45, 68–75], історично широко застосовуваний для розподільчих задач лінійного програмування, а також апробований на двоіндексних і триіндексних варіантах задачі [19, 31]. Другий – метод потенціалів [91]. Третій – метод нуль-перетворень, сутність якого полягає в поетапному коригуванні тарифів на кожній ітерації за допомогою параметрів $\alpha_i, \beta_j,. \gamma_k,. \varphi_r,. \mu_l,..$ І, нарешті, четвертий – розроблений метод проіндексованих елементів, спрямований на узгоджене врахування невизначеностей у п’ятиіндексній задачі.

Класичний метод потенціалів потребує двох основних етапів: побудова

опорного плану (початкового розв'язку) та ітеративний пошук оптимального плану. Для розглядуваної задачі, аби отримати опорний план, зазвичай застосовуються відомі процедури (наприклад, метод «північно-західного кута» чи метод мінімального елемента). Далі, в ході ітераційного процесу, на кожному кроці визначаються оцінки для вільних клітин матриці за допомогою відповідних потенціалів α,β,γ,ϕ,μ а потім виконується коригування завантажень у базисних і небазисних клітинах. Після 14 ітерацій (окрім побудови початкового опорного плану) було знайдено оптимальний план

:$X = \{x^*_{ijkrl}\} = \{ x^*_{11111} = 1 , x^*_{12131} = 6,\ x^*_{23121} = 1 , x^*_{23122} = 1, x^*_{22131} = 6, x^*_{33112} = 2, x^*_{33122} = 4 , x^*_{33132} = 2, x^*_{34131} = 8 \}$.

Мінімальну вартість розподілу ресурсів, визначену цільовою функцією, отримано у вигляді: $F(X^*) = 113$.

Розв'язання трьохіндексних розподільчих задач розглянуто в роботі [91]. У цьому підрозділі розглянемо розв'язання п'ятиіндексної розподільчої задачі, де необхідно знайти цільову функцію, що визначає вартість розподілу ресурсів. У цій задачі цільова функція представлена у вигляді функції: $F(X) = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{r=1}^{R}\sum_{l=1}^{L} c_{ijkrl}x_{ijkrl}$.

Результатом розв'язання задачі є визначення оптимального плану розподілу ресурсів, що відповідає оптимальному значенню цільової функції: $F(X) = (38, 132, 98, 31)$.

У прикладі, розв'язаному методом потенціалів, вихідні значення цільової функції використовувалися без жодних перетворень. Натомість у методі нуль-перетворень коефіцієнти c_{ijkrl} на кожній ітерації перераховуються за наступною формулою:

$$c'_{ijkrl} = c_{ijkrl} - \alpha_i - \beta_j - \gamma_k - \phi_r - \mu_l,$$

де $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \phi_r, \mu_l$ – обчислювані параметри у відповідному зрізі матриці вартості.

Після проведення восьми ітерацій було знайдено план задачі:

$$X^* = \{x^*_{ijkrl}\} = \{x^*_{11111} = 1,\ x^*_{13111} = 1,\ x^*_{12131} = 5,\ x^*_{22131} = 7,\ x^*_{33112} = 1,\ x^*_{33122} = 5,\ x^*_{33132} = 2,\ x^*_{34132} = 8\}.$$

Оптимальне значення цільової функції, що визначає вартість розподілу ресурсів, становить: $F(X^*) = 114$.

Розв'язання п'ятиіндексної задачі методом проіндексованих елементів

Відповідно до розробленого алгоритму, представленого в розділі 3.3, на першому етапі алгоритму розв'язання багатоіндексної задачі виконуються обчислення провідних проіндексованих елементів.

Результатом обчислень є формування плану розподілу ресурсів: $X^* = \{x_{ijkrl}\}$,

який визначає наступне значення цільової функції: $F(X) = (35{,}136{,}100{,}32)$.

Одержані інтервальні або векторні значення оптимальної вартості дозволяють керівнику логістичної інформаційної системи чи аналітику оцінити ризики й переваги різних сценаріїв постачань, виходячи з того, що реальні дані можуть коливатися.

Таким чином, наведена експериментальна задача ілюструє відмінності в підходах до розв'язання багатоіндексних розподільчих проблем, а також демонструє переваги й недоліки кожного з методів. Класичні методи потенціалів і нуль-перетворень дозволяють знайти оптимальний план у разі точних вихідних даних, але вони можуть давати різні результати залежно від особливостей вибору опорного плану.

3.6 Оцінка ефективності застосування методу проіндексованих елементів під час вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу

Аналіз процесу розв'язання багатоіндексних задач розподілу ресурсів демонструє, що збільшення розмірності задачі призводить до різкого зростання

обчислювальної складності й часу знаходження оптимального рішення. У такій ситуації одним із найважливіших критеріїв вибору методу є його здатність ефективно працювати при великих розмірах вхідних даних, враховуючи водночас специфіку задачі. У цьому підрозділі наведено результати експериментальних досліджень, покликані продемонструвати порівняльні характеристики методу проіндексованих елементів, класичного методу потенціалів, а також низки інших відомих підходів.

З метою отримання узагальнених висновків було проведено серію з 100 експериментів на персональному комп’ютері з такими технічними характеристиками:

- процесор: Intel Core i5-10400 2.9GHz / 12MB;
- оперативна пам’ять: 16 ГБ;
- операційна система: Windows 11 64-bit.
- Середовище розробки Python 3.10

Для визначення впливу розмірності на «глибину» ітеративного процесу (тобто кількість кроків, необхідних для знаходження оптимального рішення) було проведено 100 запусків із варіюванням розмірності багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу. На рисунку 3.14 ілюструються середні значення кількості ітерацій, отримані за результатами експериментів.

Загальний висновок полягає в тому, що для розв’язання задачі методом потенціалів потрібно, у середньому, утричі чи вчетверо більше ітерацій (не враховуючи додаткових ітерацій для формування початкового опорного плану), аніж при використанні методу проіндексованих елементів. Такий результат пояснюється тим, що класичний метод потенціалів на кожному кроці здійснює обчислення потенціалів для великої кількості клітин та повторює процедуру коригування плану, доки не виконаються всі умови оптимальності. Метод же проіндексованих елементів спрямований на опрацювання найбільш вагомих (провідних) компонентів задачі й може значно швидше звузити пошук до необхідного набору базисних змінних.

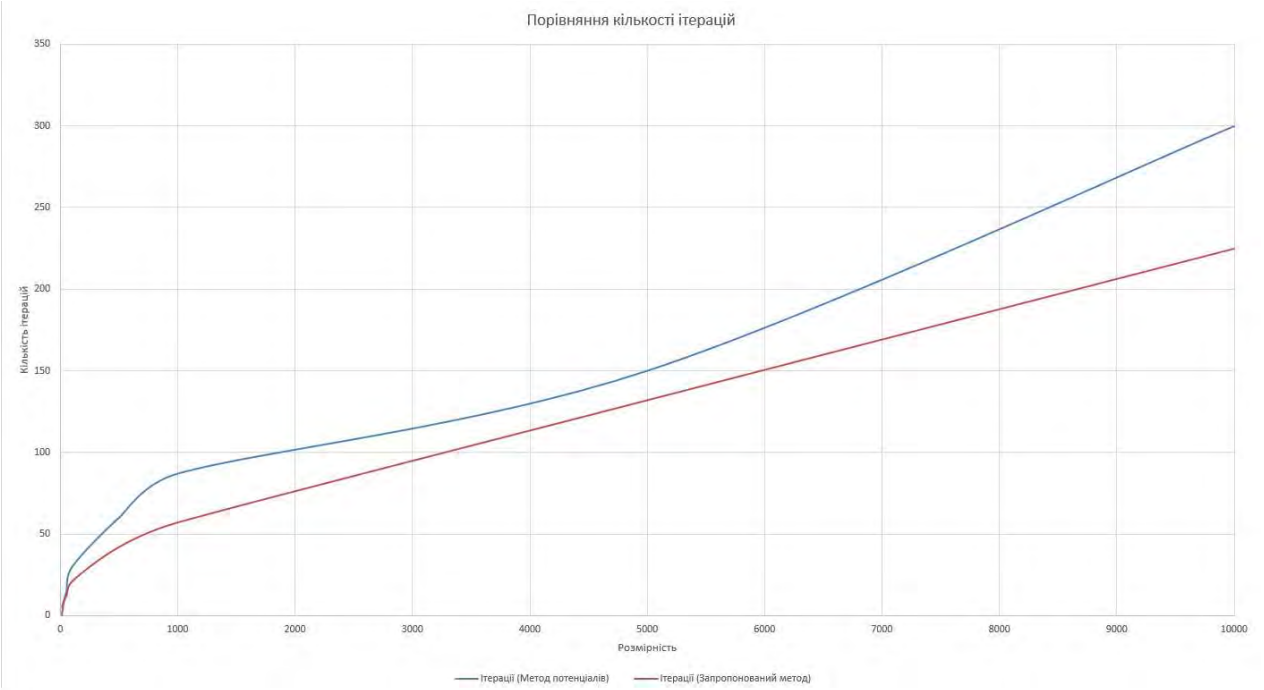


Рисунок 3.14 – Аналіз залежності кількості ітерацій від розмірності задачі

Наступним критерієм оцінювання ефективності алгоритму є загальний час розрахунків, витрачений на пошук оптимального розв’язку. На рисунку 3.15 наведено усереднені показники часу для різних методів розв’язання залежно від розмірності задачі.

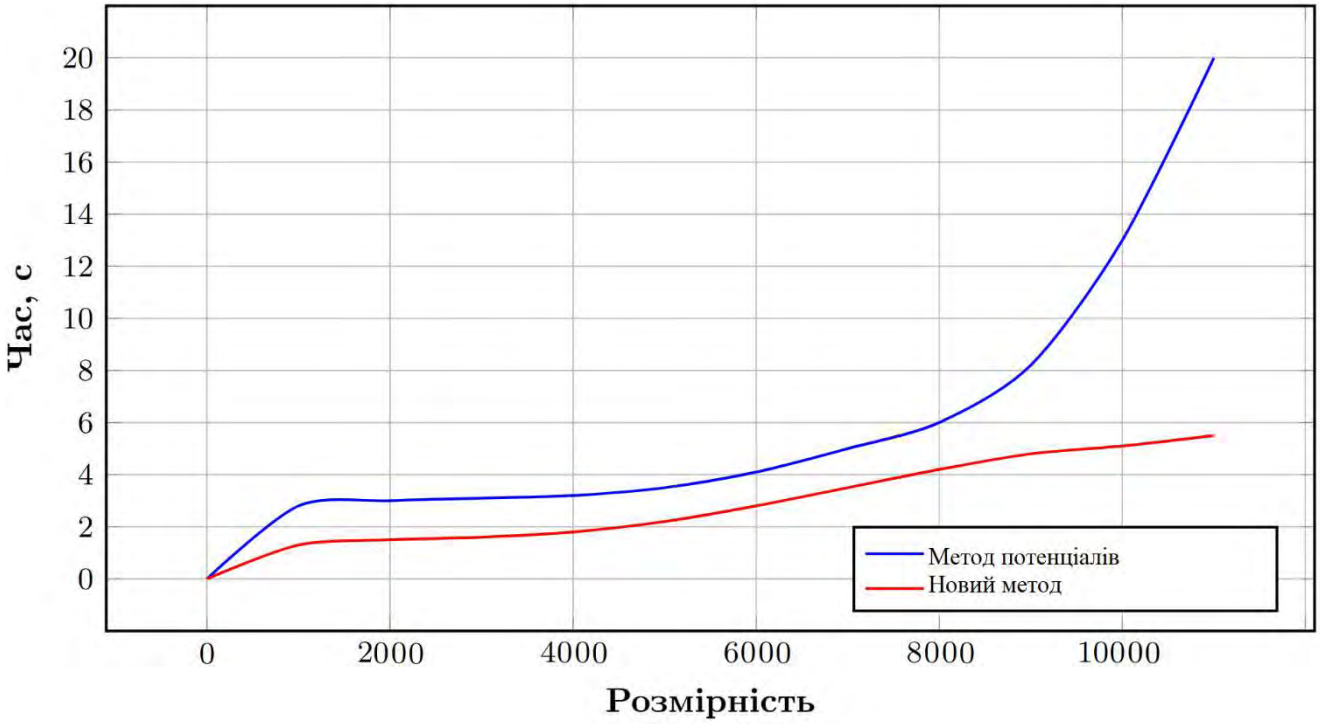


Рисунок 3.15 – Аналіз залежності часу розв’язання задачі від її розмірності

Зокрема, зафіксовано такі ключові факти:

1. При відносно невеликій розмірності (порядку 10^4змінних) різниця між методом потенціалів і методом проіндексованих елементів становить у середньому 4 секунди на користь методу проіндексованих елементів.

2. Із подальшим збільшенням розмірності (наприклад, до 10^5змінних) час розв'язання задачі методом проіндексованих елементів стає меншим більш ніж на 2000 секунд порівняно з методом потенціалів. Це свідчить про високу обчислювальну ефективність методу проіндексованих елементів для великорозмірних задач, особливо в контексті оперативного планування, де час ухвалення рішення часто є критичним.

До основної причини такої різниці належить те, що метод потенціалів змушений на кожній ітерації двічі розв'язувати системи лінійних рівнянь (зокрема, для обчислення потенціалів і для переносу/коригування плану), що накладає істотні обмеження на масштабованість. Натомість метод проіндексованих елементів має більш гнучку структуру ітеративного процесу, враховує провідні (найсуттєвіші) індекси, й, таким чином, швидше досягає умови оптимальності.

На рисунку 3.16 проілюстровано залежність відносної різниці (похибки) між цільовими функціями, отриманими методом потенціалів та методом проіндексованих елементів, від розмірності задачі.

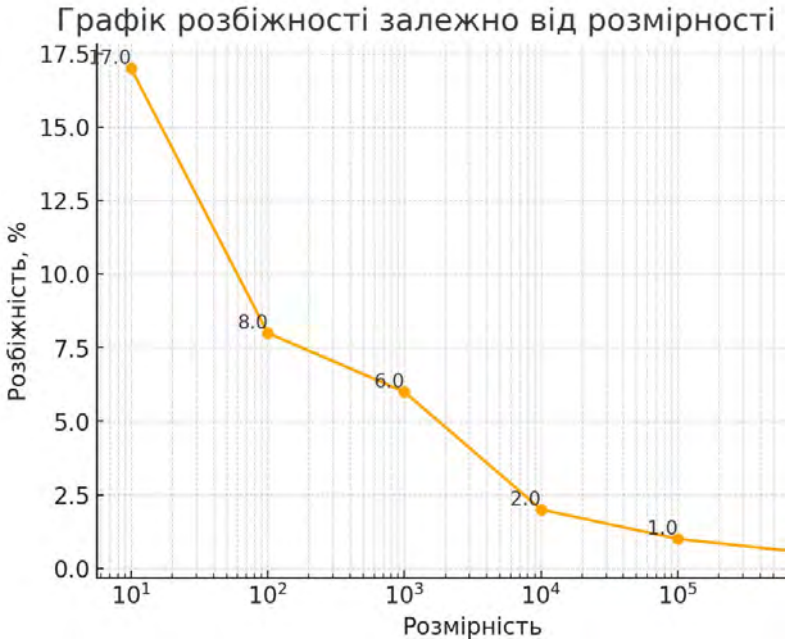


Рисунок 3.16 – Аналіз точності розв'язання задачі

Результати моделювання підтвердили, що зі зростанням числа індексів і параметрів у постановці відхилення розв'язку, знайденого методом проіндексованих елементів, від рішення, одержаного методом потенціалів, зменшується. При досягненні розмірності задачі 10^5 похибка становить лише 1%. Це є додатковим доказом того, що метод проіндексованих елементів здатен утримувати належну точність, водночас перевершуючи традиційні методи за швидкістю.

Для узагальнення отриманих результатів досліджень у таблиці 4.14 наведено порівняльну характеристику різних підходів до розв'язання багатоіндексних задач розподілу ресурсів. При оцінці враховано такі критерії: здатність алгоритму розв'язувати проблему виродженості, придатність для великих розмірностей та можливість забезпечити розв'язання задачі у прийнятний для практичних цілей термін.

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика методів розв'язання багатоіндексних задач

Метод	Розв'язання проблеми виродженості	Розв'язання задач великої розмірності	Урахування нечітких параметрів	Допустимий час розв'язання задачі
Метод потенціалів	Ні	Ні	Ні	Ні
Метод потенціалів із нечіткими параметрами	Ні	Ні	Так	Ні
Метод нуль-перетворень	Так	Так	Ні	Так
Метод проіндексованих елементів	Так	Так	Так	Так

Отже, отримані результати дають підстави стверджувати, що метод проіндексованих елементів є оптимальним інструментом для вирішення багатоіндексних задач розподілу ресурсів у реальних умовах, оскільки:

1. Забезпечує мінімальні витрати машинного часу та оперативний пошук рішення навіть за великої розмірності задачі (до 10^5 змінних і більше).
2. Забезпечує стабільну точність розв'язку при збільшенні простору пошуку,

що підтверджено значенням погрішності приблизно 0,5% на рівні 10^5 змінних.

3. Дозволяє розв'язувати проблему виродженості, яка часто заважає класичному методу потенціалів ефективно працювати у задачах високої розмірності.

Таким чином, метод проіндексованих елементів можна рекомендувати для оперативно-виробничого планування, проектування чи реорганізації транспортно-розподільчих систем, коли необхідно швидко й надійно знайти оптимальний план перевезень ресурсів.

3.7 Паралельна реалізація методу проіндексованих елементів у багатоіндексній задачі транспортного типу

Метод проіндексованих елементів, що описаний у розділі 3.3, є розширенням методу нуль-перетворень, пристосованого до задач із п'ятьма та більше індексами.

Основна ідея паралельної реалізації полягає в тому, щоб розділити простір змінних $x_{i,j,k,l,m}$ на кілька блоків за групами постачальників I_α або за іншими індексами. Тоді кожен блок уміщатиме порівняно невелику підмножину комбінацій (i,j,k,l,m), що значно знижує обсяг обчислень для одного процесу. Після знаходження локальних планів у кожному блоці (за допомогою методу проіндексованих елементів у «звуженій» постановці) виконується процедура узгодження, яка передбачає відновлення глобальних обмежень і, за потреби, повторний запуск локальних підзадач із оновленими параметрами (зокрема, дуальними оцінками чи «штрафами»).

Щоб оцінити ефективність паралельного підходу, було проведено серію тестів на задачах із різною розмірністю множин I, J, K, L, M. Усе програмне забезпечення реалізовано мовою Python із використанням багатопроцесної моделі multiprocessing. Було обрано кількість паралельних процесів у діапазоні від 2 до 16,

з урахуванням кількості доступних фізичних ядер процесора. Також варіювалися розмірності задачі від «помірної» |I|=10,|J|=5,… до «великої» |I|≈100,|J|≈50, при цьому зміни пропорційно вносилися й до множин K, L, M.

Код на мові програмування Python, що реалізує комп'ютерний розв'язок багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, з використанням методу Данцига–Вулфа, можна побачити в додатку 1.

На рисунку 3.17 наведено графік, що ілюструє залежність часу обробки задачі від кількості процесів при розв'язанні методу проіндексованих елементів.

По осі абсцис відкладено число паралельних процесів (від 1 до 16), а по осі ординат — загальний час розрахунку (у секундах) для задачі середньої розмірності (|I|=30,|J|=20,|K|=2,|L|=2,|M|=2. Видно, що перехід від 1 процесу (послідовний режим) до 4 процесів дає скорочення часу майже в 3,5 рази (тобто прискорення приблизно на 70–75% від ідеального). Збільшення кількості процесів до 8 і 16 дає подальше зниження часу, хоча приріст уже не настільки істотний, оскільки починають відігравати роль комунікаційні витрати та синхронізація на етапах узгодження.

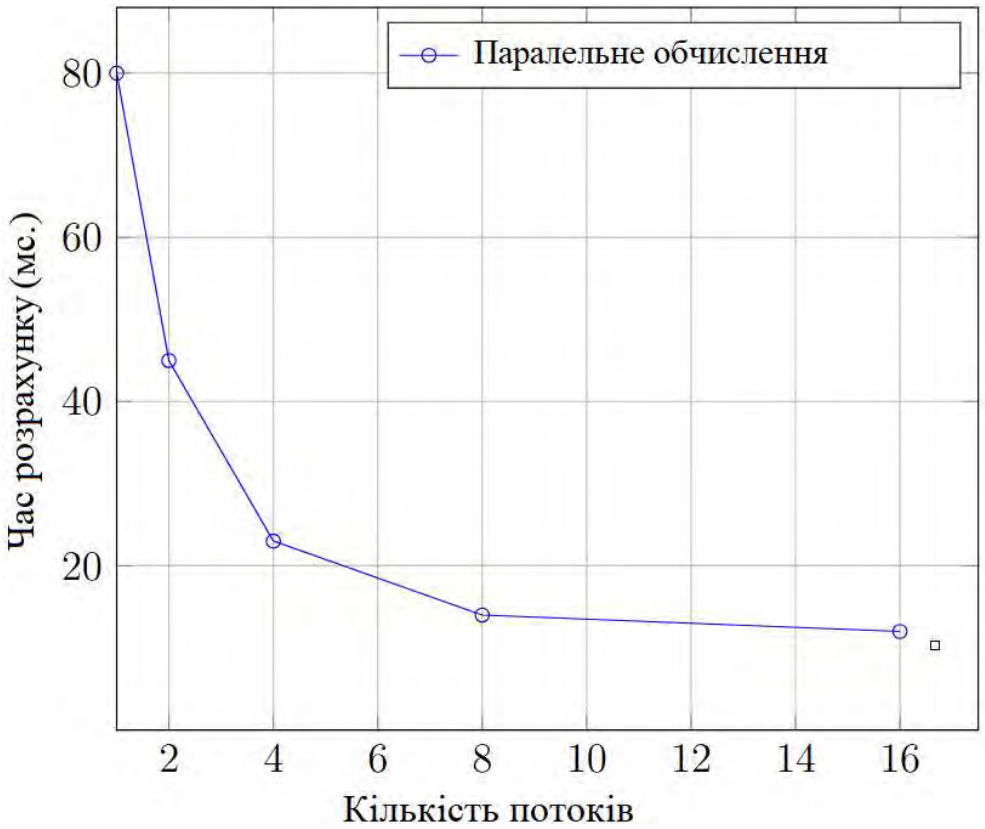


Рисунок 3.17 – Залежність часу розрахунку задачі від кількості потоків

На рисунку 3.18 продемонстровано, як змінюється час розв’язання (по осі ординат, у секундах) залежно від сукупної розмірності задачі (по осі абсцис), при фіксованій кількості процесів (8 процесів). Розмірність задачі тут вимірюється умовною мірою, яка пропорційна добутку |I|×|J|×|K|×|L|×|M|. На графіку наведено дві криві: послідовний метод проіндексованих елементів і паралельний варіант, реалізований за допомогою декомпозиції. Зі зростанням розмірності у послідовного варіанта час збільшується досить різко (приблизно в кубі чи й більше, оскільки метод нуль-перетворень у високих розмірностях має суттєві витрати). Паралельна версія зростає повільніше й залишається в прийнятних межах навіть при підвищенні розмірності задачі приблизно в 2–5 разів, що підтверджує суттєву вигоду від застосування паралельних обчислень.

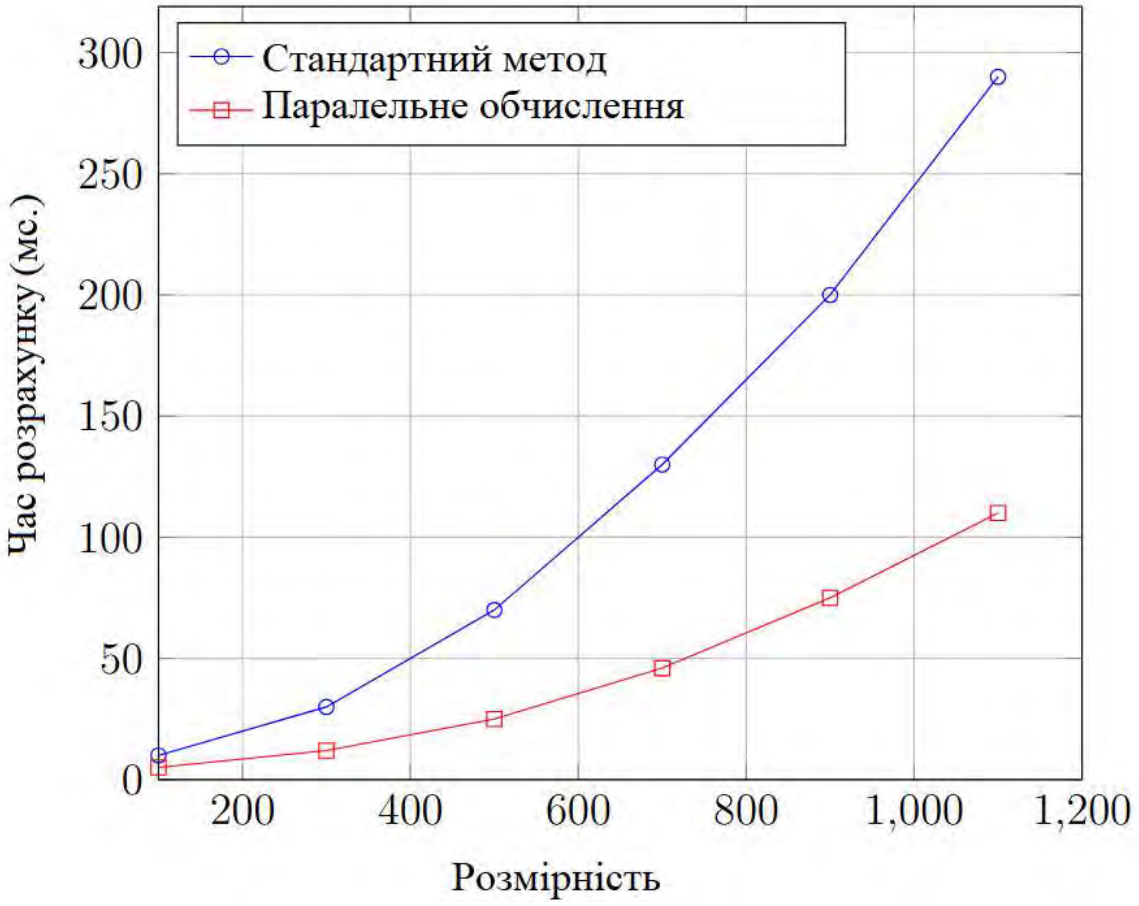


Рисунок 3.18 – Порівняння часу розрахунку задачі різними методами

Аналіз обчислювальних експериментів показав, що найбільший виграш досягається у випадку, коли паралелізується саме та частина методу

проіндексованих елементів, яка відповідає найбільшим обсягам обчислень (тобто коли кількість комунікацій між блоками є відносно невелика). Завдяки цьому вдається здобути близько 75–85% від ідеальної швидкодії при 4–8 процесах, а для 16 процесів ефективність залишається на рівні 60–70% від теоретичної, що все одно досить високе значення для задач великої розмірності. Подивитись код програми для вирішення задачі можна у додатку 1.

Подальшим кроком може бути оптимізація синхронізаційних етапів, а також розробка динамічного механізму балансування, коли підзадачі перерозподіляються між процесами залежно від поточного навантаження. Крім того, варто розглянути можливість інтеграції з методами прогнозування логістичного попиту, щоб коригування розв’язку відбувалося з випередженням змін у системі.

Таким чином, паралельна реалізація методу проіндексованих елементів забезпечує відчутну економію часу для великомасштабних п’ятиіндексних задач транспортного типу і має виражений потенціал подальшого удосконалення.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі розроблено метод формалізації та алгоритм розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, що зумовлює зручну структуризацію вихідних даних і дає змогу відобразити різноманітність реальних логістичних сценаріїв. Продемонстровано, що використання п’ятиіндексної постановки сприяє більш повному урахуванню особливостей мережі (види ресурсів, типи транспорту, центри акумуляції), а також забезпечує гнучке адаптування моделей до можливих змін у середовищі постачань.

Важливим результатом є обґрунтування методу проіндексованих елементів, який не потребує побудови опорного плану і тим самим зменшує ймовірність появи вироджених ситуацій та зациклювання в процесі пошуку оптимального розв’язку. Така властивість методу набуває особливого значення у великих задачах із

кількома індексами, де класичний метод потенціалів може стикатися зі значними труднощами або надмірною витратою обчислювальних ресурсів. Запропоновано також механізм адаптивного коригування параметрів задачі в режимі реального часу, що уможливлює оперативне реагування на зміну попиту чи конфігурації логістичних ланцюгів.

Доведено, що паралельне застосування методу проіндексованих елементів дає змогу значно скоротити загальний час обчислень, при цьому зберігається коректність ітеративних процедур нуль-перетворень у кожному локальному блоці. Така технологія виявляється корисною для багатоядерних процесорів, кластерних та хмарних обчислень, дозволяючи гнучко нарощувати продуктивність і розв’язувати задачі з великим числом змінних за обмежений час.

Звернено увагу на метод декомпозиції, який у деяких випадках дозволяє розбити п’ятиіндексну постановку на менші задачі (наприклад, дві або більше трьохіндексних), що суттєво спрощує аналіз і розрахунки. Однак показано, що ефективність такого розбиття залежить від наявності попередньо закріплених постачальників і споживачів за конкретними центрами акумуляції ресурсів. Якщо таке закріплення відсутнє й потрібно знаходити оптимальні зв’язки в межах повної мережі, застосовується п’ятиіндексна модель без спрощень. Запропоновані критерії доцільності декомпозиції дають можливість гнучко обирати стратегію розв’язання залежно від логістичних умов та обмежень.

Розкрито широкий спектр практичного використання багатоіндексних методів не лише для класичних завдань транспортно-розподільчого характеру, а й у сферах управління інформаційними потоками, розподілу обчислювальних ресурсів у мережевих системах і виробничого планування. Завдяки універсальності підходів, сформованих на основі транспортних задач, багатоіндексні моделі ефективно розв’язують різноманітні економічні й технічні проблеми, пов’язані з раціональним розподілом обмежених ресурсів.

У розділі розглянуто алгоритмічні аспекти реалізації як паралельної схеми методу проіндексованих елементів, так і процедур визначення оптимального розташування центрів акумуляції ресурсів з урахуванням багатьох змінних

параметрів. Отримані результати демонструють можливість істотного зниження сукупних логістичних витрат при застосуванні розроблених алгоритмів на практиці. Така адаптаційна здатність рішень є особливо актуальною у висококонкурентному середовищі, де оперативність і оптимальність процесів постачання можуть стати визначальними факторами успішності підприємства.

Таким чином, результати, висвітлені у цьому розділі, підкреслюють практичну значущість розроблених підходів для низки виробничих, транспортних та логістичних задач, а також підтверджують їхню гнучкість в умовах динамічних змін і масивних обсягів даних. Це формує основу для впровадження розв’язувальних методів багатоіндексних задач у сучасні інформаційні системи управління логістикою.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДОСТАВКИ ТОВАРІВ

4.1 Моделювання процесу доставки товарів у мережевих логістичних системах

Постановка багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу (див. розділ 1.1) передбачає урахування параметрів, що зумовлює потребу в адаптації класичних моделей і алгоритмів. У цьому контексті автоматизована система вимагає наявності додаткового модуля для інтерпретації результатів у вигляді рекомендацій для забезпечення транспортно-розподільних операцій. Один із ефективних підходів до вирішення поставленої задачі може стати технологія Data Mining, методи якої розроблені для пошуку та виявлення в даних прихованих зв'язків і взаємозалежностей, що дозволяють визначати залежності та синтезувати дедуктивну інформацію для її подання кінцевому користувачу для прийняття управлінських рішень. Також, за необхідності, в системі може бути передбачений модуль конвертації результатів у формати, які використовуються в автоматизованих системах підтримки діяльності підприємств (xml, json).

Реальна ринкова ситуація вимагає урахування швидкозмінних параметрів, наприклад, зміни кон'юнктури ринку, непередбачувані коливання вартості ресурсів і попиту, що вимагає розробки швидких і ефективних алгоритмів рішення розподільчої задачі. У цьому контексті можливе використання технологій аналітичної обробки даних у реальному часі, наприклад, OLAP (Online Analytical Processing), включаючи технології обробки багатовимірних баз даних MOLAP (Multidimensional OLAP), реляційних баз даних ROLAP (Relational OLAP) та гібридних даних HOLAP (Hybrid OLAP). При впровадженні зазначених алгоритмів доцільно застосовувати технології паралельної обробки даних, включаючи хмарні технології розподіленої обробки, коли в процес обчислень залучається необхідна

кількість обчислювальних машин.

Математична модель та методи пошуку оптимального плану мають бути орієнтовані на високу розмірність завдання, у зв’язку з цим, методи рішення завдань розподілу повинні бути адаптовані для вирішення подібних завдань. Доцільно використання багатовимірних баз даних на базі платформ, наприклад, Oracle, Informix, MS SQL Server тощо, а також технологій хмарного зберігання даних.

На рисунку 4.1 зображено модульну структуру комплексного рішення для автоматизації задач розподілу ресурсів.

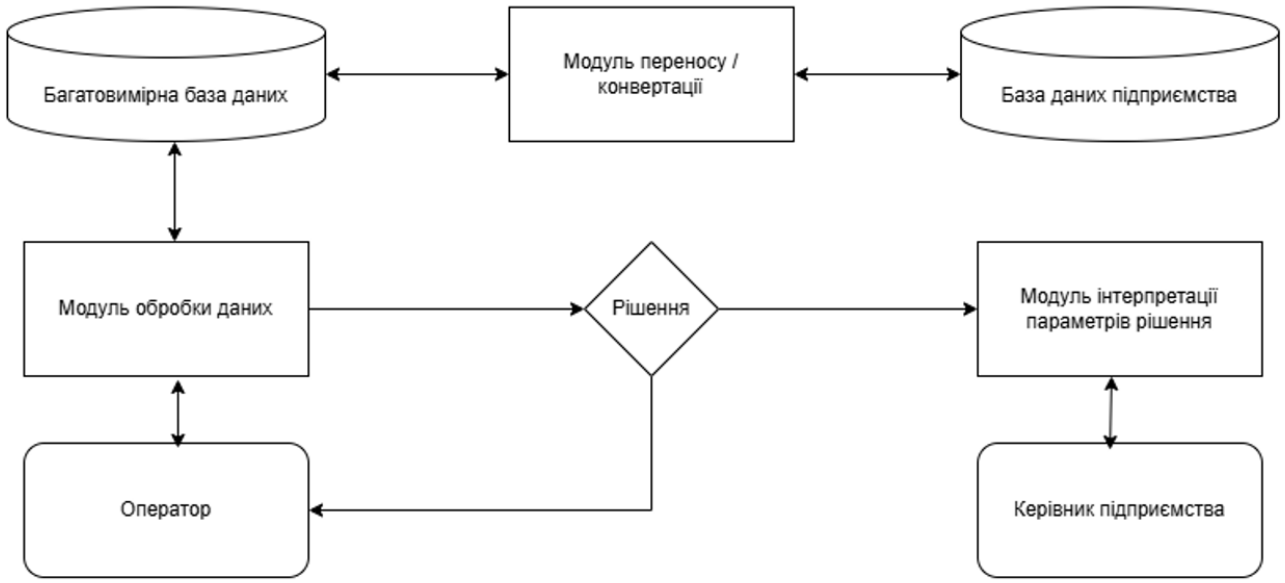


Рисунок 4.1 - Структурно-функціональна модель системи автоматизації задач розподілу ресурсів

Основним модулем є "Модуль обробки даних", який забезпечує вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу. Формування вихідних даних для розв'язання цієї задачі здійснюється за допомогою багатовимірної бази даних (БД). Заповнення багатовимірної бази даних може відбуватися через безпосередній ввід або шляхом переносу та конвертації існуючих баз даних підприємства. Для цих цілей у системі доцільно передбачити модуль переносу/конвертації.

Для зберігання багатовимірної бази даних можуть використовуватися

хмарні технології. Функції формування логіки роботи системи та принципів інтерпретації вихідних параметрів мають бути покладені на відповідну Базу знань, яка формується на основі знань експертів. Отримане рішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу має бути інтерпретовано у терміни мови, зрозумілої кінцевому користувачу системи – керівнику підприємства. Ці функції мають бути покладені на модуль інтерпретації параметрів рішення, який встановлює відповідність між числовими параметрами рішення і лінгвістичними конструкціями (назви виробників, споживачів, ресурсів тощо), відповідними словесній постановці задачі розподілу ресурсів.

Таким чином, завдяки комплексному автоматизованому підходу можна не лише спростити процес підготовки та введення даних, а й отримати гнучке інформаційне середовище для швидкого пошуку оптимальних планів розподілу ресурсів у мережевих логістичних системах. Це особливо актуально в умовах динамічних змін зовнішнього середовища, коли оперативне рішення задач розподілу стає конкурентною перевагою для підприємства.

4.2 Модель програмного застосунку «LAP» для автоматизації задач розміщення і розподілу ресурсів у логістичних мережах

Транспортно-розподільчим системам притаманна особлива специфіка, оскільки вони об’єднують різні види діяльності, зокрема [11, 12, 16, 108]:

- управління запасами у виробництві;
- надання транспортних послуг;
- визначення оптимальних обсягів ресурсів;
- прогнозування попиту;
- оперативне планування й управління.

Однією з ключових проблем у роботі ТРС є мінливість вихідних даних про базові елементи системи (див. розділ 1.2). Зокрема, до них належить виробнича

потужність постачальників, попит споживачів, пропускна спроможність центрів накопичення ресурсів, доступні обсяги ресурсів, вантажопідйомність транспортних ліній і вартість перевезень. Усі ці параметри можуть змінюватися під впливом зовнішніх факторів (кон'юнктури ринку, сезонності, логістичних обмежень тощо) та внутрішніх умов (збої у виробництві, недоступність транспорту, перерозподіл ресурсів).

Як свідчать результати проведеного аналізу, ефективне управління й оптимізація багатопланових процесів ТРС неможливі без використання сучасних інформаційних технологій. У розділі 4.1 (див. рисунок 4.1) наведено структуру типової системи автоматизації розподілу ресурсів, сформовану відповідно до визначених у дисертації цілей і завдань. На ринку представлена низка програмних продуктів класів MRP (Material Requirements Planning), ERP (Enterprise Resource Planning) і SCM (Supply Chain Management), які дозволяють частково розв'язувати окремі завдання транспортно-розподільчих систем.

Утім, аналіз цих програмних рішень виявив низку спільних недоліків. Зокрема, більшість з них:

1. Не підтримує роботу з неформальними або слабо формалізованими процесами.
2. Не містить універсальних інструментів оцінювання якості планових рішень.
3. Не враховує специфіки стратегічного планування.

Крім того, чинні програмні рішення переважно не здатні коректно обробляти дані, що зазнають значних змін. На практиці це призводить до обмеженої придатності типових SCM-інструментів для задач проектування нової або вдосконалення існуючої транспортно-розподільчої системи. Отже, виникла необхідність у створенні проблемно-орієнтованого програмного забезпечення, що забезпечує підтримку процесів стратегічного, тактичного та оперативного планування.

З метою вирішення окреслених у дисертації завдань було розроблено спеціалізований програмний застосунок «LAP». Він забезпечує моделювання та оптимізацію інформаційних процесів у мережевих логістичних системах із

застосуванням багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу (Рисунок 4.2).

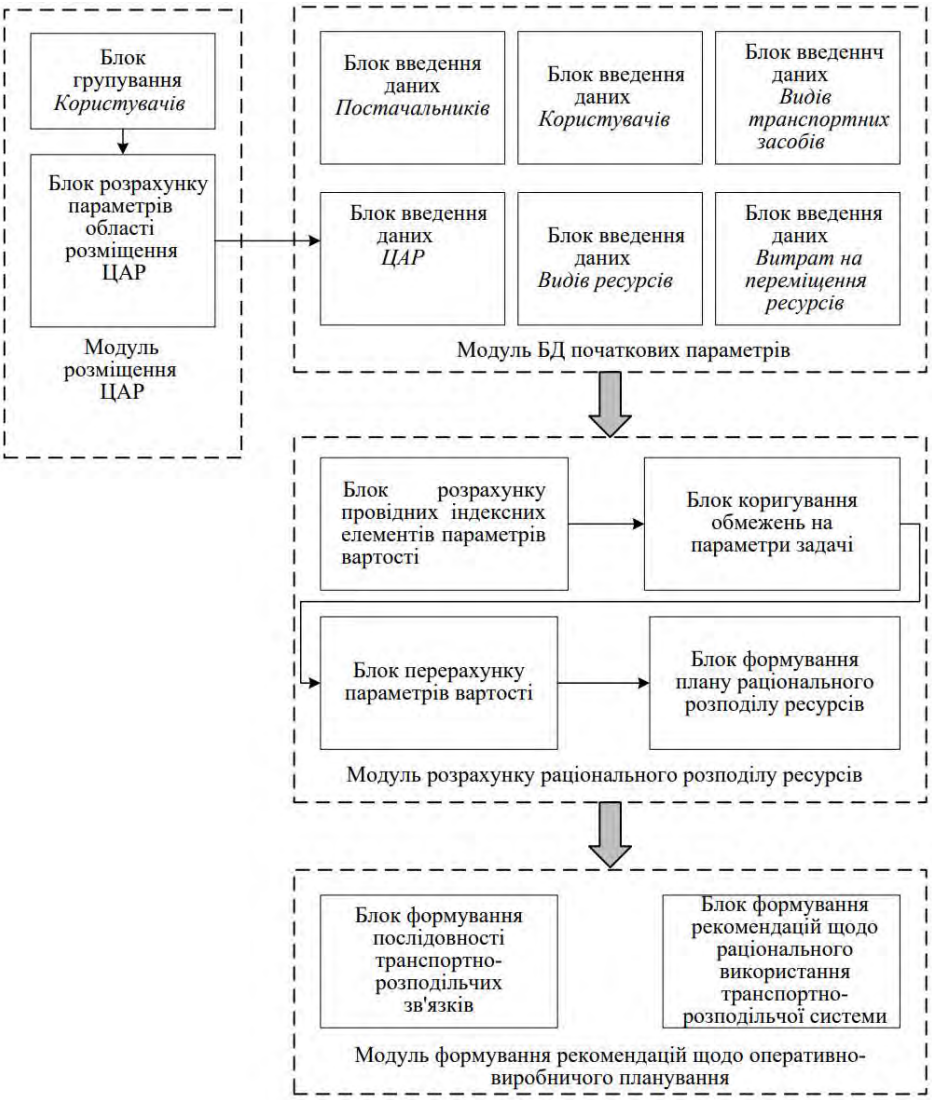


Рисунок 4.2. – Структурно-функціональна модель інформаційної системи «LAP» для автоматизації задач розміщення та розподілу ресурсів

Розроблений програмний застосунок складається з чотирьох основних модулів:

- модуль бази даних вихідних параметрів;
- модуль розміщення центрів накопичення ресурсів;
- модуль розрахунку оптимального розподілу ресурсів;
- модуль формування рекомендацій з оперативно-виробничого планування.

Розглянемо особливості роботи цього програмного застосунку.

Модуль бази даних вихідних параметрів є початковою складовою даного

застосунку і використовується для введення параметрів задачі.

Модуль розрахунку оптимального розподілу ресурсів призначений для проведення експериментальних досліджень та пошуку оптимального рішення багатоіндексної задачі розподілу ресурсів. Його робота здійснюється за наступним алгоритмом:

- проводиться розрахунок проіндексованих елементів бази даних вартості перевезення та визначається провідний індексний елемент;
- виконується коригування значень обмежень, що відповідають провідному індексному елементу;
- за отриманими значеннями обмежень параметрів задачі виконується перерахунок бази даних вартості перевезення;
- формуються результати оптимального плану перевезення.

Модуль формування рекомендацій з оперативно-виробничого планування забезпечує:

- встановлення зв’язків між параметрами задачі відповідно до сформованого плану перевезення;
- розробку рекомендацій для оперативно-виробничого планування з урахуванням обмежень параметрів задачі.

За результатами роботи першого та другого модулів користувач отримує рішення розробленої моделі п’ятиіндексної задачі розподілу ресурсів.

Модуль розміщення центрів накопичення ресурсів забезпечує, у разі потреби, закріплення центрів споживання за центрами накопичення ресурсів. У такому випадку п’ятиіндексна задача трансформується у дві триіндексні.

На відміну від традиційних рішень ERP/SCM-класу, програмний застосунок «LAP» реалізує модель та індексний підхід до оцінювання параметрів. Це дає змогу адекватно відображати мінливість і багатовимірність реальних логістичних систем, що функціонують у нестабільному ринковому середовищі. Усе це підтверджує доцільність та ефективність розробленого підходу для розв’язання задач розподілу ресурсів за умов невизначеності і дозволяє використовувати результати апробації у реальних транспортно-розподільчих системах.

4.3 Введення, обробка та оптимізація даних у інформаційній системі «LAP» для розв'язання багатоіндексної задачі транспортного типу

Першим етапом роботи із інформаційною системою «LAP» є заповнення бази даних початковими параметрами, необхідними для розв'язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу. З цією метою було модифіковано стандартний сервіс «LAP», що дозволило реалізувати механізм введення даних.

Приклад набору початкових даних для виробників/постачальників наведено у таблиці 4.1:

Таблиця 4.1 – Дані обсягів виробництва

Джерела ресурсів	**α**	**β**	**Обсяги ресурсів A**	**Обсяги ресурсів B**
1. Джерело	2540	2752	128625	145025
1.1 Джерело	120	143	2345	2500
111. Ресурс	5	5	100	110
112. Ресурс	6	5	250	270
113. Ресурс	7	4	195	210
114. Ресурс	8	8	80	100
115. Ресурс	4	8	150	160
…				
1.2 Джерело	112	118	2250	2500
1.3 Джерело	98	65	1200	1450
1.4 Джерело	69	75	800	905
1.5 Джерело	45	45	585	635
1.6 Джерело	103	142	1900	2205
1.7 Джерело	80	92	450	465
1.8 Джерело	186	200	2545	2900
1.9 Джерело	45	64	600	750
1.10 Джерело	55	69	950	1010
…				

Для введення таких даних реалізовано спеціальний модуль, що відображає інформацію про джерела ресурсів у зручній для оператора формі (Рисунок 4.3).

Окрім перегляду й редагування записів, модуль забезпечує перевірку коректності введених значень та їх узгодженість із іншими параметрами бази даних

Контрагенти

Найменування	Дії
Джерела	
Джерело 1	
Джерело 1.1	Змінити Видалити
Джерело 1.2	Змінити Видалити
Джерело 1.3	Змінити Видалити
Джерело 1.4	Змінити Видалити
Джерело 1.5	Змінити Видалити
Джерело 1.6	Змінити Видалити
Джерело 1.7	Змінити Видалити
Джерело 1.8	Змінити Видалити

Рисунок 4.3 – База даних джерел ресурсів

Аналогічний функціонал передбачено і для споживачів, де в базі даних задаються заплановані обсяги попиту (табл. 4.2). Цей підхід дає змогу аналітику або оператору формувати заявки на конкретний період, який також задається через спеціалізоване вікно введення (Рисунок 4.5).

Контрагенти

Найменування	Дії
Споживачі	
Споживач 1	
Споживач 1.1	Змінити Видалити
Споживач 1.2	Змінити Видалити
Споживач 1.3	Змінити Видалити
Споживач 1.4	Змінити Видалити
Споживач 1.5	Змінити Видалити
Споживач 1.6	Змінити Видалити
Споживач 1.7	Змінити Видалити
Споживач 1.8	Змінити Видалити

Рисунок 4.4 – База даних споживачів

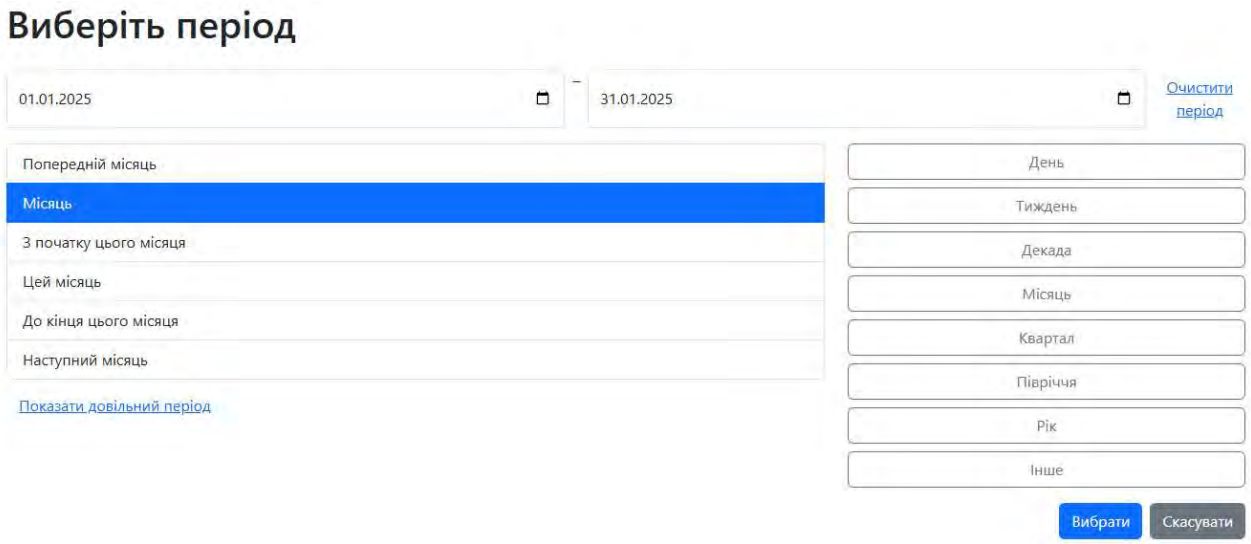


Рисунок 4.5 – Вікно введення періоду часу

Таблиця 4.2 – Плановий попит на ресурси

Споживачі	α	β	Обсяги попиту A	Обсяги попиту B
1. Споживач	1805	2006	98525	130048
1.1 Споживач	115	128	1978	2100
Ресурс 1.1	2	2	88	101
Ресурс 3.4	2	5	50	65
Ресурс 5.12	5	4	185	220
Ресурс 9.11	2	2	20	30
Ресурс 12.4	9	8	145	162
…				
1.2 Споживач	98	87	1250	1400
1.3 Споживач	88	78	1400	1450
1.4 Споживач	44	27	800	905
1.5 Споживач	105	100	440	450
1.6 Споживач	72	89	1700	1980
…				

Програмний застосунок «LAP» також передбачає окремі модулі для введення даних щодо центрів накопичення ресурсів (Рисунок 4.6), видів продукції (Рисунок 4.7) та типів транспортних засобів (Рисунок 4.8). Такі модулі дозволяють описати мережу логістичної системи з детальним урахуванням пропускних спроможностей, номенклатури продукції, а також особливостей транспортної інфраструктури.

Рисунок 4.6 – База даних центрів накопичення ресурсів

Модуль, призначений для роботи з видами продукції, дає змогу фіксувати характеристики ресурсів, їхні категорії та параметри, необхідні для подальшої логістичної оптимізації. Це забезпечує точне планування перевезень та управління запасами.

Рисунок 4.7 – База даних видів продукції (ресурсів)

Окремо розроблено інструмент для внесення інформації про транспортні засоби. Він дозволяє визначати параметри місткості, вантажопідйомності, витрат пального та інших характеристик, що впливають на вибір оптимального маршруту перевезення.

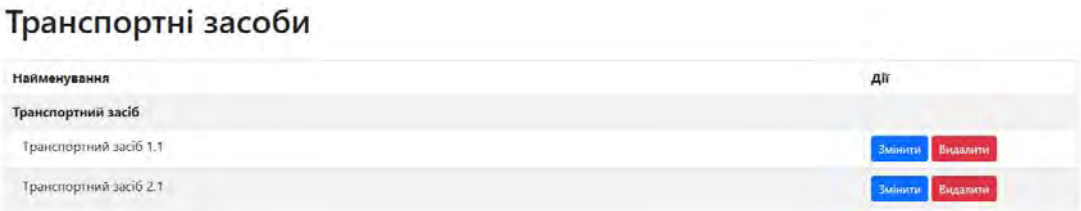


Рисунок 4.8 – База даних видів транспортних засобів

Одним із ключових моментів є визначення вартості перевезення (Рисунок 4.9). У системі реалізовано можливість автоматичного формування попередньої

бази даних тарифів з огляду на характеристики вантажу, транспортного засобу, відстані та низки інших чинників. За потреби експерт може коригувати ці значення, спираючись на власні галузеві знання або оперативну інформацію щодо цін на паливо, дорожніх зборів, страховок тощо.

Економічні звіти Вартість перевезення

N	Виробник	Споживач	Проміжний центр	Вид номенклатури	Вид транспорту	Вартість
1	Джерело 1.2	Споживач 1.3	ЦАР 1.2	Ресурс 1.1	Транспортний засіб 1.1	(4; 5; 12; 14;)
2	Джерело 1.2	Споживач 1.5	ЦАР 1.2	Ресурс 1.4	Транспортний засіб 1.1	(2; 4; 10; 13;)
3	Джерело 1.2	Споживач 1.7	ЦАР 1.2	Ресурс 1.7	Транспортний засіб 2.1	(5; 4; 7; 14;)
4	Джерело 1.2	Споживач 1.7	ЦАР 2.1	Ресурс 1.4	Транспортний засіб 1.1	(4; 5; 7;)
5	Джерело 1.2	Споживач 1.8	ЦАР 2.1	Ресурс 1.6	Транспортний засіб 1.1	(2; 3; 4; 7;)
6	Джерело 1.2	Споживач 1.8	ЦАР 2.1	Ресурс 1.7	Транспортний засіб 1.1	(1; 1; 10; 10;)

Рисунок 4.9 – База даних вартості перевезення ресурсів (тарифи)

Перелічені вище бази даних містять структуровану інформацію, необхідну для аналізу, зокрема дані про виробників і види ресурсів, споживачів, центри накопичення, а також про вартість розподілу ресурсів визначеними передавальними елементами. Бази знань експертів призначені для довгострокового зберігання даних. Завдяки можливості перенесення та конвертації даних засобами застосунку «LAP», користувач має змогу розширювати ці бази для подальшого використання й аналізу.

Після введення вихідних параметрів, на основі розробленого в розділі 3 методу розв’язання багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, проводиться розрахунок оптимального розподілу ресурсів. Отримані результати можуть бути представлені користувачу у вигляді звіту за визначальним параметром (див. рисунок 4.10).

Вибір варіанта звіту

- Основний
- По ЦАР
- По Джерелах
- По Споживачах
- По Ресурсах
- По Транспортним засобам

Вибрати Скасувати

Рисунок 4.10 – Вікно вибору звіту за параметром

Крім того, користувач може отримати рекомендації щодо оптимізації транспортно-розподільчої системи (див. рисунок 4.11).

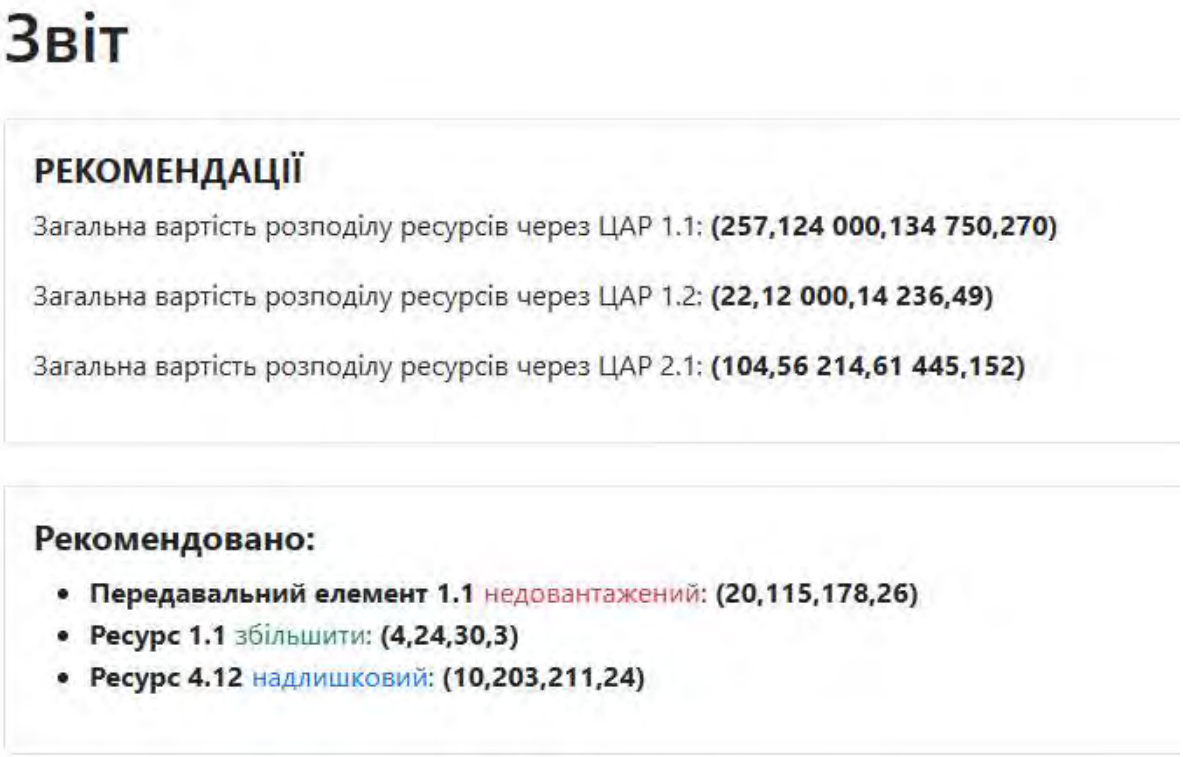


Рисунок 4.11 – Вікно рекомендацій

У результаті прогонів алгоритму і аналізу вихідних даних система пропонує набір рішень, що забезпечують оптимальне розв’язання задачі розподілу ресурсів з метою задоволення попиту споживачів. Це дозволяє приймати ефективні рішення з оперативного планування та управління матеріальними, інформаційними та іншими потоками.

4.4 Розгортання інформаційної логістичної системи на основі CI/CD-процесів та контейнеризації

Процес розгортання розробленого програмного забезпечення в інформаційних логістичних системах передбачає тісну інтеграцію етапів

безперервної інтеграції (Continuous Integration, CI) та безперервної доставки (Continuous Deployment, CD) засобами інформаційних технологій. Це дає змогу суттєво підвищити якість програмного коду, зменшити ризики збоїв на виробничому середовищі та спростити управління кількома паралельними середовищами. Ключовим елементом такого підходу є наявність централізованого репозиторію, куди інженери завантажують зміни коду та з якого ініціюється вся послідовність тестових і деплоймент-процедур. У системі керування версіями застосовується практика створення окремих гілок для нових функціональностей чи виправлення помилок, що надає можливість локалізувати зміни та підвищує прозорість процесу. Після завершення розробки кожної функції або виправлення коду формується Pull Request, котрий проходить обов'язкову перевірку у межах PR Pipelines. На цій стадії переважно виконуються статичний аналіз коду, лінтинг, початкові тести та інші валідаційні кроки. Якщо результат є успішним, відбувається злиття гілки із загальною гілкою інтеграції (наприклад, Main або Develop), після чого запускаються CI Pipelines, орієнтовані на побудову проекту, виконання широкого кола тестів (юніт-, інтеграційних, іноді функціональних) і формування підсумкових артефактів. Зібрані застосунки пакуються в Docker-образи, які публікуються в Azure Container Registry із чіткою системою маркування версій, що дозволяє оперативно відстежувати релізи та історію змін.

Подальший етап, який у загальному ланцюжку відповідає за власне розгортання, забезпечується CD Pipelines. Вони беруть контейнерні образи з реєстру та розгортають їх у кількох середовищах, зокрема в aks-mhp-dat-dev (розробницькому), aks-mhp-dat-test (тестовому) та aks-mhp-dat-prod (виробничому). Конфігурація середовищ описується набором маніфестів, які містять відомості про топологію сервісів, кількість реплік, параметри масштабування, змінні середовища та інші складові, необхідні для коректного розгортання у Kubernetes-кластерах. При цьому додаткова увага приділяється захисту конфіденційних даних: система безпеки відповідає за надання секретів (credentials) та налаштування доступу до кластерів і реєстру. Перед початком розгортання виконується аутентифікація та встановлюються строго обмежені дозволи, аби знизити ймовірність

неправомірного доступу до контейнерів чи конфігурацій.

Суттєвий аспект успішної роботи логістичних інформаційних систем пов'язаний із підтримкою та оновленням баз даних, часто реалізованих у вигляді MySQL у середовищах dev, test і prod. Для цих цілей створено спеціалізований pipeline (наприклад, dat-db-schema-deploy), який отримує секрети для підключення до кожної з баз даних, генерує пакет оновлень (SQL-скрипти), що описують зміни в схемі, і проводить обов'язковий Dry Run. Завдяки Dry Run оператор або інтеграційна служба може оцінити потенційні наслідки застосування змін (наприклад, внесення нових таблиць, зміну типів полів чи видалення застарілих структур). Якщо результат попередньої перевірки свідчить про безпеку й доречність оновлень, оператор надає дозвіл на застосування їх до відповідної середовищної бази даних. Така схема дає змогу уникнути неконтрольованих збоїв і суттєвих втрат даних при міграції, а також спрощує підтримку кількох версій схеми в різних етапах життєвого циклу системи.

Крім веб-орієнтованих компонентів, сучасна логістична система нерідко включає мобільні застосунки, котрі повинні взаємодіяти з центральним сервером і надавати кінцевому користувачеві можливість відстежувати доставлення або робити замовлення. Для збирання таких мобільних клієнтів (Android/iOS) використовується pipeline ci\publish\mobile, який запускається на спеціалізованому MacOsAgent. Завдяки цьому розробники можуть автоматично отримувати версії застосунку під обидві платформи, виконувати тести, завантажувати їх у внутрішні системи контролю якості чи на майданчики тестувальників (TestFlight, Google Play Internal Testing) і, зрештою, формувати розгорнуті звіти про статус збирання, покриття тестами та виявлені дефекти. Це допомагає гарантувати, що мобільні застосунки залишатимуться узгодженими з оновленнями бекенду, а релізи відбуватимуться в уніфікований спосіб.

Таким чином, уся послідовність дій – від моменту внесення змін у репозиторій до публікації зібраних контейнерів і оновлення схеми бази даних – контролюється за допомогою єдиної CI/CD-платформи (ADO Pipelines). Кожен крок супроводжується механізмами перевірки, тестування та валідації, що

мінімізує ймовірність критичних помилок на виробничому середовищі. Злагоджений розподіл ролей у цьому процесі (інженер розробляє функціонал, система CI перевіряє цілісність, система CD розгортає зміни) дає змогу досягти високої швидкості релізів і надійності, украй важливих для динамічних інформаційних логістичних систем. Завдяки використанню контейнеризації та Kubernetes впровадження нових версій програмного забезпечення відбувається прозоро, з можливістю тестувати та поступово виводити на ринок оновлення без зупинок критичних процесів. Цей підхід також суттєво підвищує масштабованість рішень, оскільки достатньо просто додати або перепризначити ресурси у кластері залежно від поточних вимог до продуктивності. Усе це підтверджує відповідність обраної моделі розгортання потребам сучасної логістики, де гнучкість, надійність і швидка реакція на зміни ринку мають вирішальне значення.

На схемі (Рисунок4.12) представлена архітектура CI/CD конвеєра для розгортання контейнеризованих застосунків. Процес охоплює побудову контейнерів, їх реєстрацію в сховищі та розгортання в середовищах розробки, тестування та продуктивного використання.

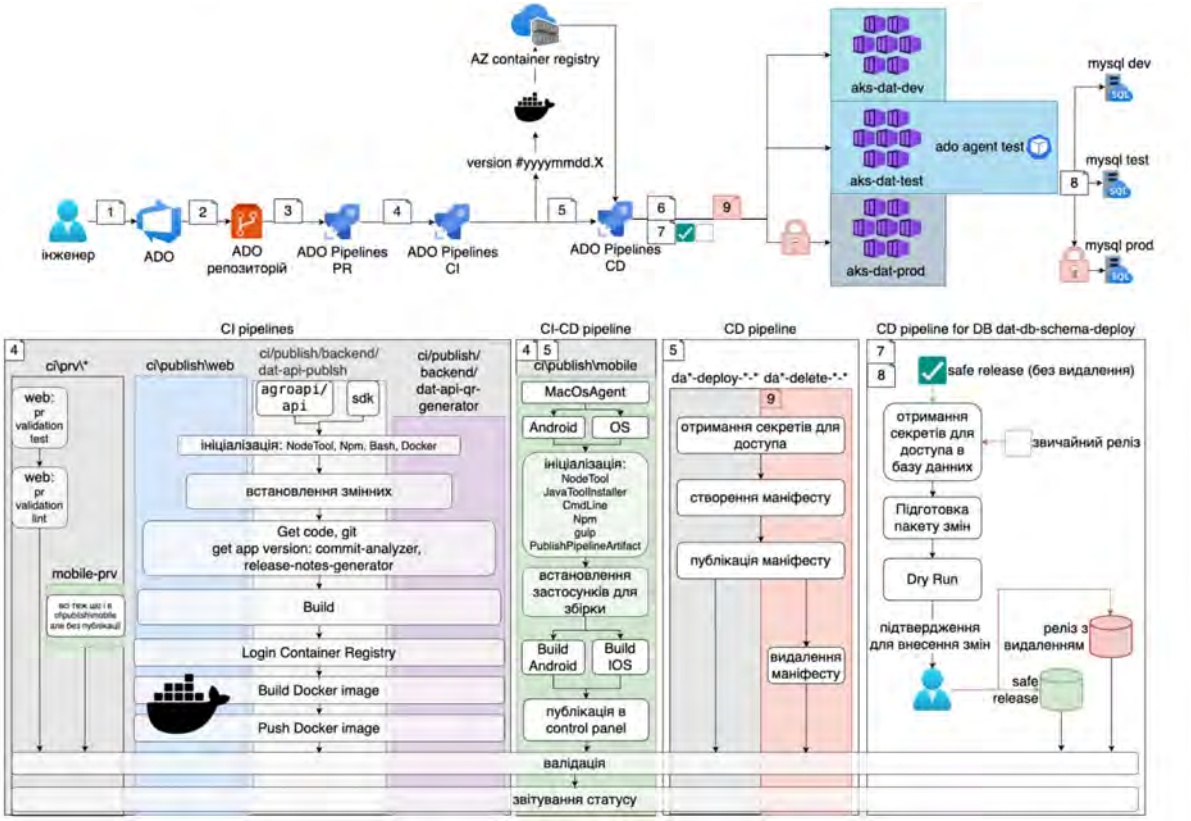


Рисунок 4.12 – CI/CD процеси для контейнеризованих додатків

Схема (Рисунок4.13) демонструє архітектуру логістичної інформаційної системи, яка включає компоненти для управління доступом, маршрутизацію трафіку, моніторинг та захист даних. Використано інтеграцію з Azure AD, Kubernetes, базами даних та іншими інформаційними системами.

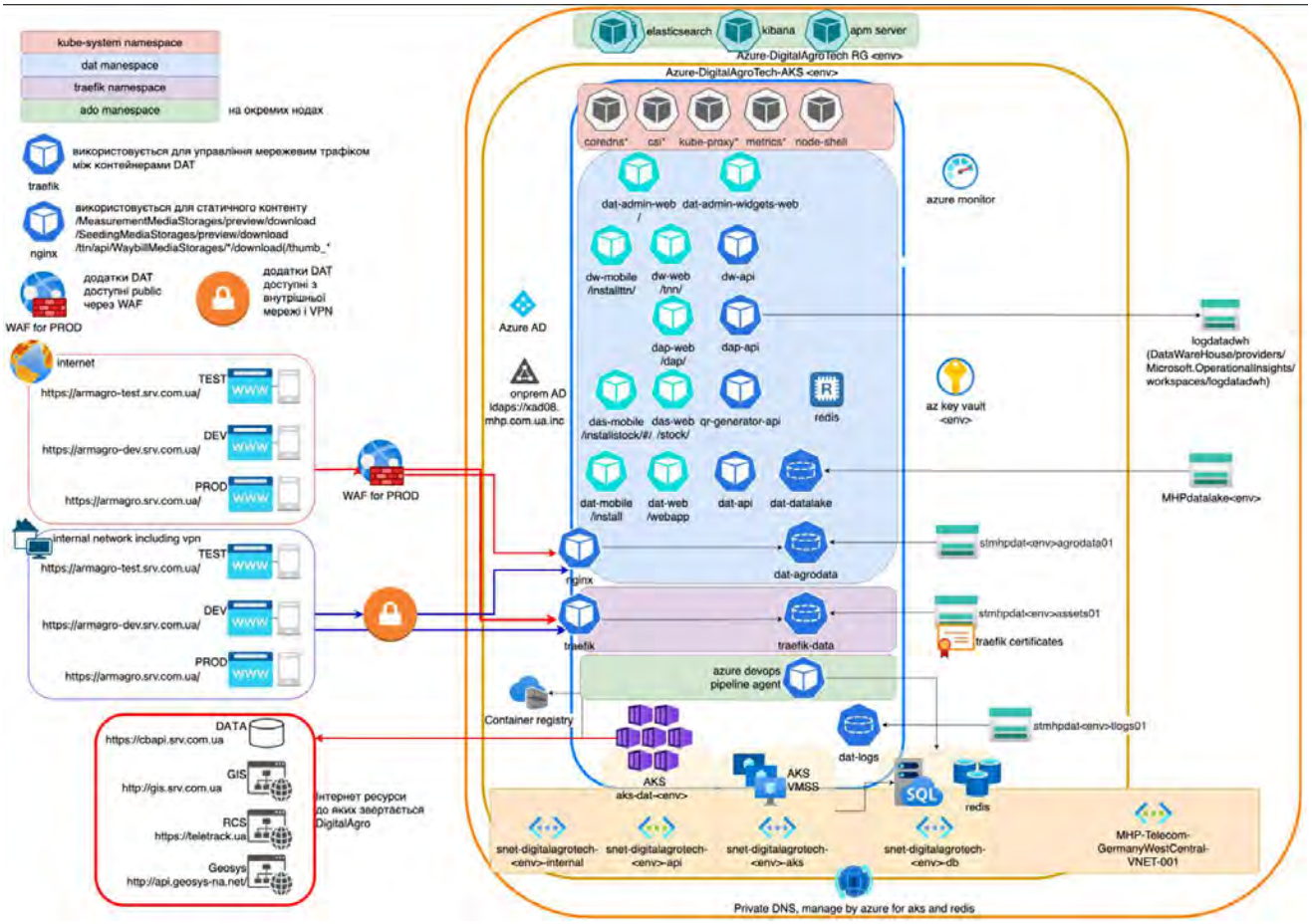


Рисунок 4.13 – Інфраструктура логістичної інформаційної системи

4.5 Реалізація задачі раціонального розміщення центрів акумуляції ресурсів в інформаційній системі «LAP»

Параметри попиту можуть змінюватися залежно від зовнішніх і внутрішніх факторів. Це впливає на застосування класичних методів розподілу ресурсів. З огляду на це, у дослідженні використовуються адаптивні моделі, які дозволяють враховувати варіативність вихідних параметрів.

Для реалізації методів розміщення центрів акумуляції ресурсів (ЦАР) було розроблено інформаційне забезпечення, що ґрунтується на сучасних інформаційних WEB-технологіях. Це забезпечення включає набір модулів, які дають змогу:

- вводити вихідні дані;
- визначати географічне розташування (координати) центрів акумуляції ресурсів;
- розраховувати загальну вартість транспортування ресурсів через ці центри;
- формувати рекомендації щодо оптимізації логістичних процесів.

Після запуску системи користувач отримує доступ до головного меню (Рисунок 4.14), яке забезпечує навігацію між модулями.

Рисунок 4.14 – Головне меню програми

Інформаційне забезпечення дозволяє користувачу послідовно виконувати всі необхідні операції для визначення зони раціонального розташування ЦАР. У даному прикладі система використовується для моделювання розміщення центрів у рамках агропромислового підприємства.

На рисунку 4.15. відображає перелік створених моделей, упорядкованих за назвами, роками, статусами та датами створення. Інтерфейс дозволяє переглядати статус кожної моделі і дату її створення. Цей модуль використовується для зберігання моделей у стані на певну дату. Оскільки планування може змінюватись, а також додаватись нові поля, модуль дозволяє зафіксувати витрати ресурсів і розрахунки показників і ЦАР, на конкретний момент часу. Таким чином, кожна модель є своєрідною "збереженою версією" стану даних і розрахунків на момент її створення чи затвердження.

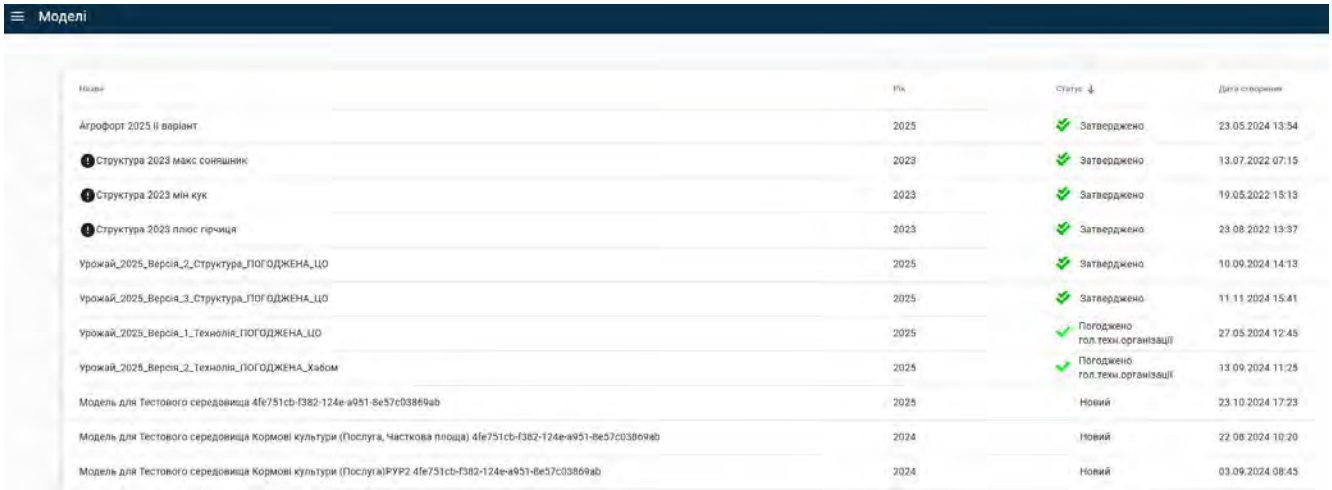


Рисунок 4.15 – Список моделей

Для контролю процесу затвердження моделей у системі реалізовано механізм відстеження історії змін (Рисунок 4.16). Він дозволяє переглядати етапи погодження моделі, починаючи від її створення до фінального затвердження.

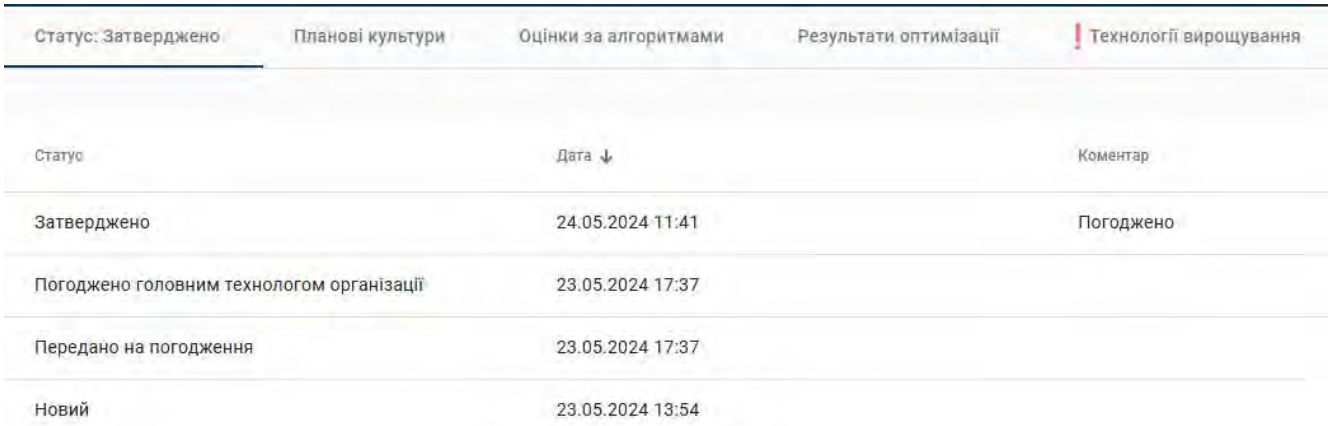
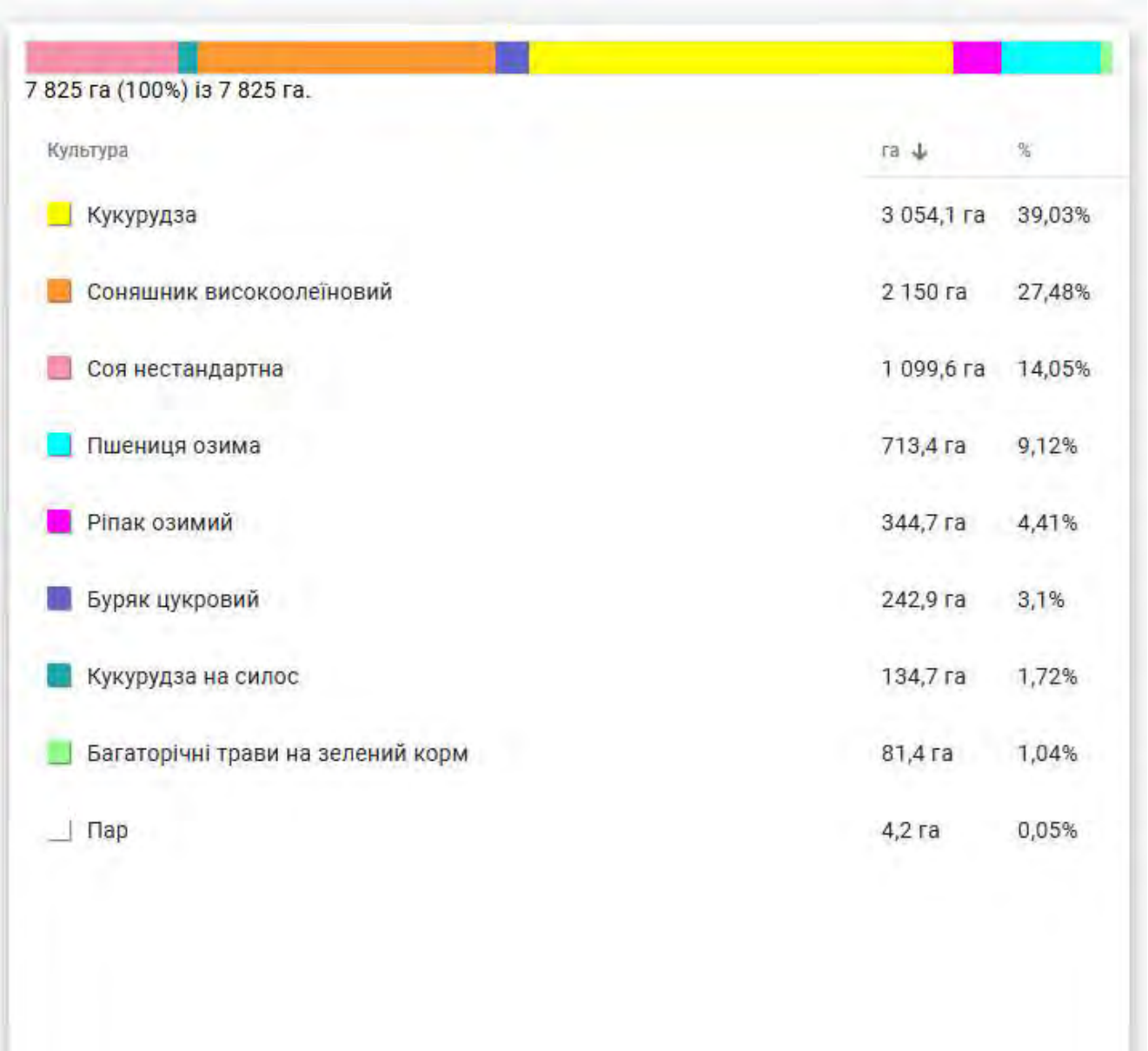


Рисунок 4.16 – Статуси моделей

Розподіл планових культур на визначеній території подано у вигляді таблиці та кольорової шкали (Рисунок 4.17). Користувач може швидко оцінити відсоткове співвідношення культур, їхню площу та географічне розташування на інтерактивній карті.



Культура	га	%
Кукурудза	3 054,1 га	39,03%
Соняшник високоолеїновий	2 150 га	27,48%
Соя нестандартна	1 099,6 га	14,05%
Пшениця озима	713,4 га	9,12%
Ріпак озимий	344,7 га	4,41%
Буряк цукровий	242,9 га	3,1%
Кукурудза на силос	134,7 га	1,72%
Багаторічні трави на зелений корм	81,4 га	1,04%
Пар	4,2 га	0,05%

Рисунок 4.17 – Планові культури

Після отримання початкових результатів система пропонує можливість оптимізації розподілу культур таким чином, щоб максимально ефективно використовувати доступні ресурси. При цьому враховуються агротехнологічні особливості, стан ґрунтів, історія внесення добрив та інші фактори. Результати оптимізації візуалізуються у вигляді графічних схем (Рисунок 4.18).

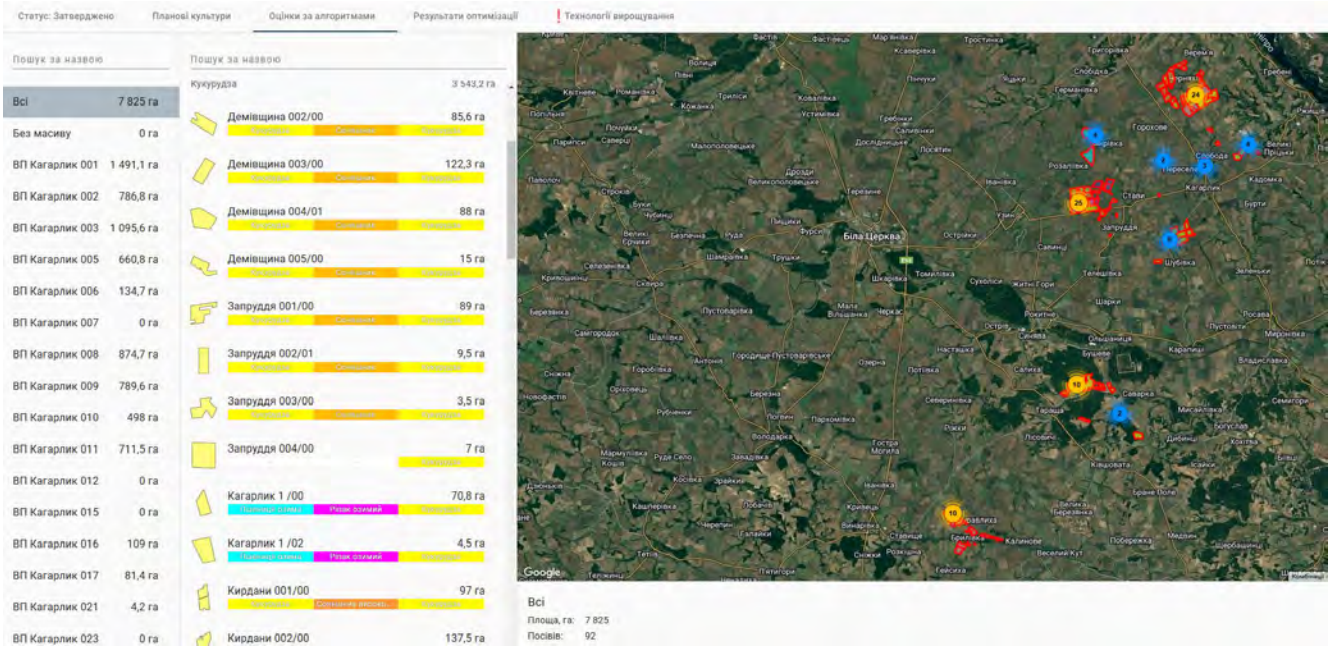


Рисунок 4.18 – Результати оптимізації

Після отримання результатів, система дозволяє перерозподілити культури на полях таким чином, щоб задовільнити потреби користувача на кількість отриманої продукції, при цьому намагаючись підібрати для культури потрібні поля, враховуючи стан ґрунту, тип ґрунту, внесені добрива попередніх періодів, і намагається розмістити їх таким чином, щоб поля з однаковими культуами знаходились поруч. Система надає доступ до детального плану технологічних операцій, що включає підготовку ґрунту, посів, внесення добрив та інші етапи. Інформація подається у вигляді інтерактивного списку із можливістю коригування параметрів (Рисунок 4.19). На лівій панелі присутні список підрозділів, відповідних площ з урахуванням оптимально підібраних параметрів культур. Центральна панель являє собою таблицю з історією сівозмін за роками, що показує, як змінюється розподіл культур у часі, інформація візуалізована за рахунок відтворення кольорових індикаторів кожної культури. Права панель являє карта з розташуванням полів та культур.

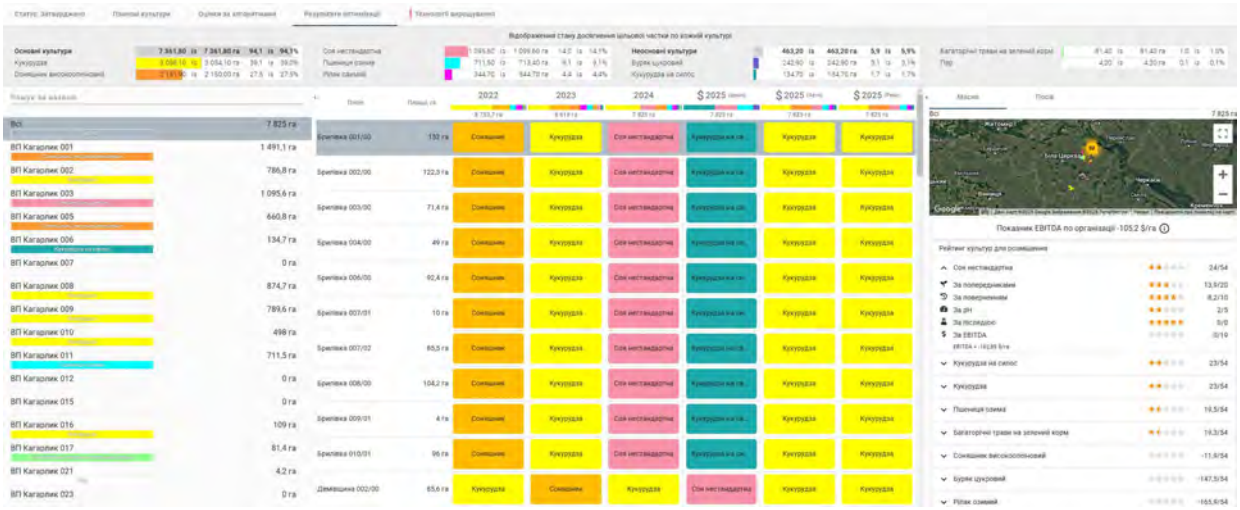


Рисунок 4.19 – План технологічних операцій

Для формування вихідних даних моделювання система дозволяє користувачу задавати параметри зон попиту та географічне розташування ЦАР. На рисунку 4.20 зображено екран вибору регіонів та визначення їхніх характеристик. У ньому представлено інформацію про етапи обробки ґрунту, підготовки насіння, посіву та внесення добрив із зазначенням термінів, норм витрат і можливих альтернатив. Візуалізуються попередження про порушення технологічних термінів або інші зауваження. Інтерфейс дозволяє користувачеві контролювати виконання операцій і вносити зміни в технологічні карти, оптимізуючи процес вирощування культур.

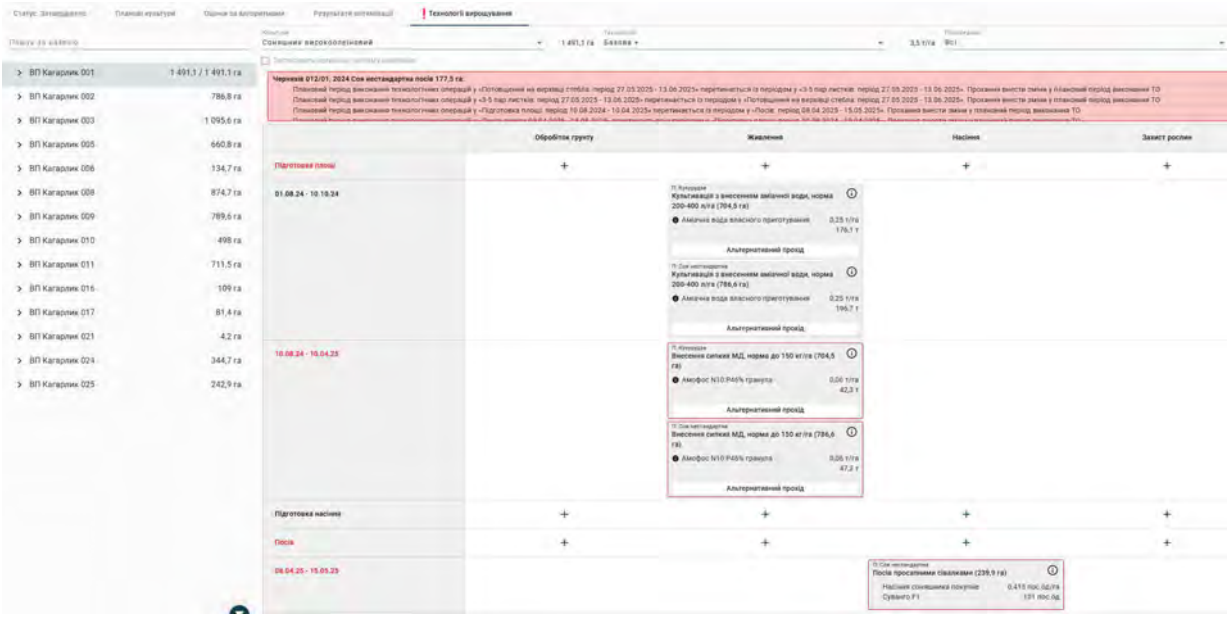
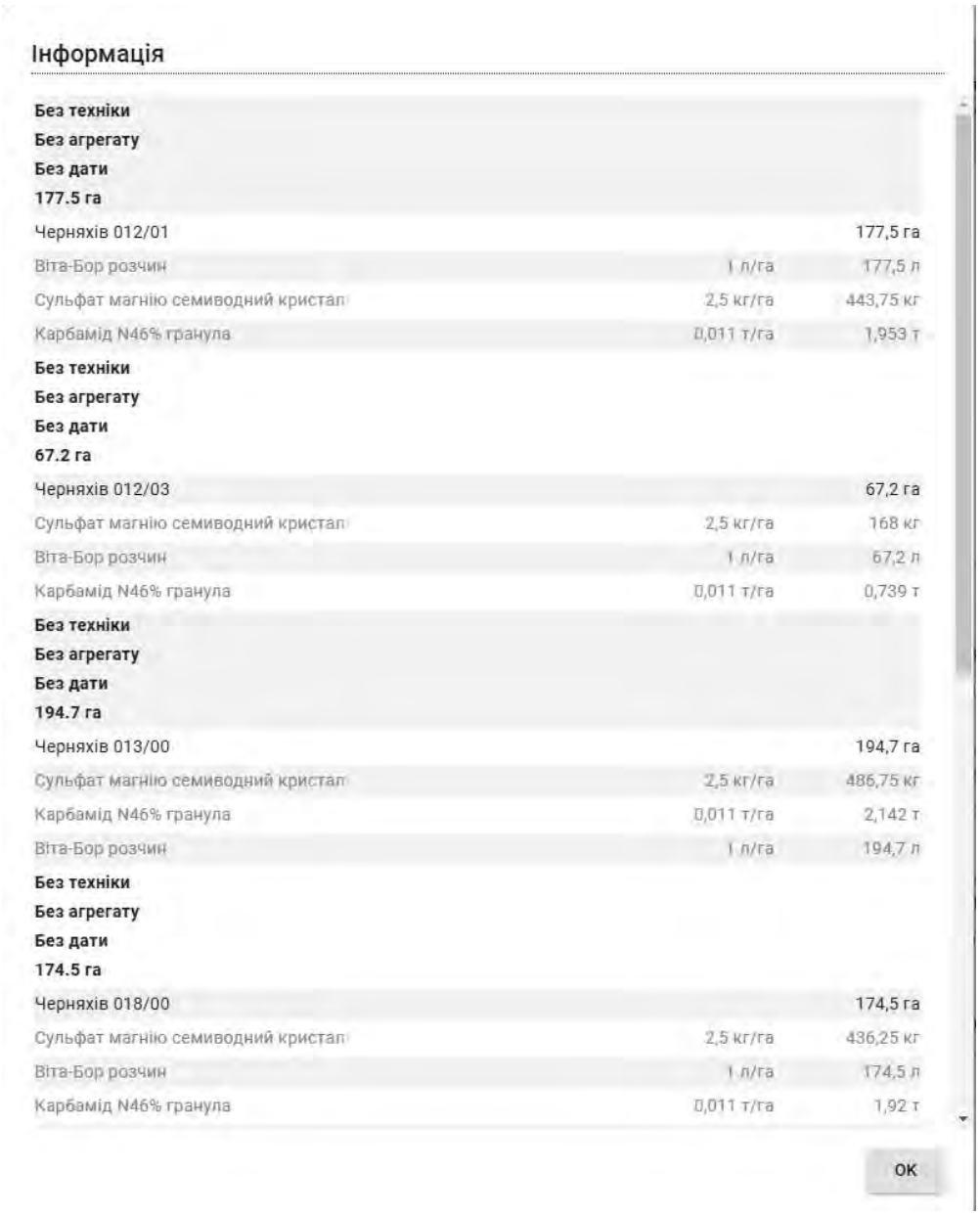


Рисунок 4.20 – Технології вирощування

Екран надає детальну інформацію про ресурси, необхідні для виконання технологічних операцій на окремих масивах. У ньому вказано площу, відсутність техніки, агрегатів чи конкретної дати, а також перелік і норми витрат добрив та інших матеріалів (наприклад, карбамід, сульфат магнію, розчини). Цей модуль використовується для точного планування ресурсів і оцінки їхніх витрат на запланованих ділянках.



Інформація

Без техніки		
Без агрегату		
Без дати		
177.5 га		
Черняхів 012/01		177,5 га
Віта-Бор розчин	1 л/га	177,5 л
Сульфат магнію семиводний кристал	2,5 кг/га	443,75 кг
Карбамід N46% гранула	0,011 т/га	1,953 т
Без техніки		
Без агрегату		
Без дати		
67.2 га		
Черняхів 012/03		67,2 га
Сульфат магнію семиводний кристал	2,5 кг/га	168 кг
Віта-Бор розчин	1 л/га	67,2 л
Карбамід N46% гранула	0,011 т/га	0,739 т
Без техніки		
Без агрегату		
Без дати		
194.7 га		
Черняхів 013/00		194,7 га
Сульфат магнію семиводний кристал	2,5 кг/га	486,75 кг
Карбамід N46% гранула	0,011 т/га	2,142 т
Віта-Бор розчин	1 л/га	194,7 л
Без техніки		
Без агрегату		
Без дати		
174.5 га		
Черняхів 018/00		174,5 га
Сульфат магнію семиводний кристал	2,5 кг/га	436,25 кг
Віта-Бор розчин	1 л/га	174,5 л
Карбамід N46% гранула	0,011 т/га	1,92 т

OK

Рисунок 4.21 – Деталізація ресурсів і операцій

Саме завдяки даним, що записуються на формі, що зображена на двох попередніх рисунках, система розподіляє культури по полях.

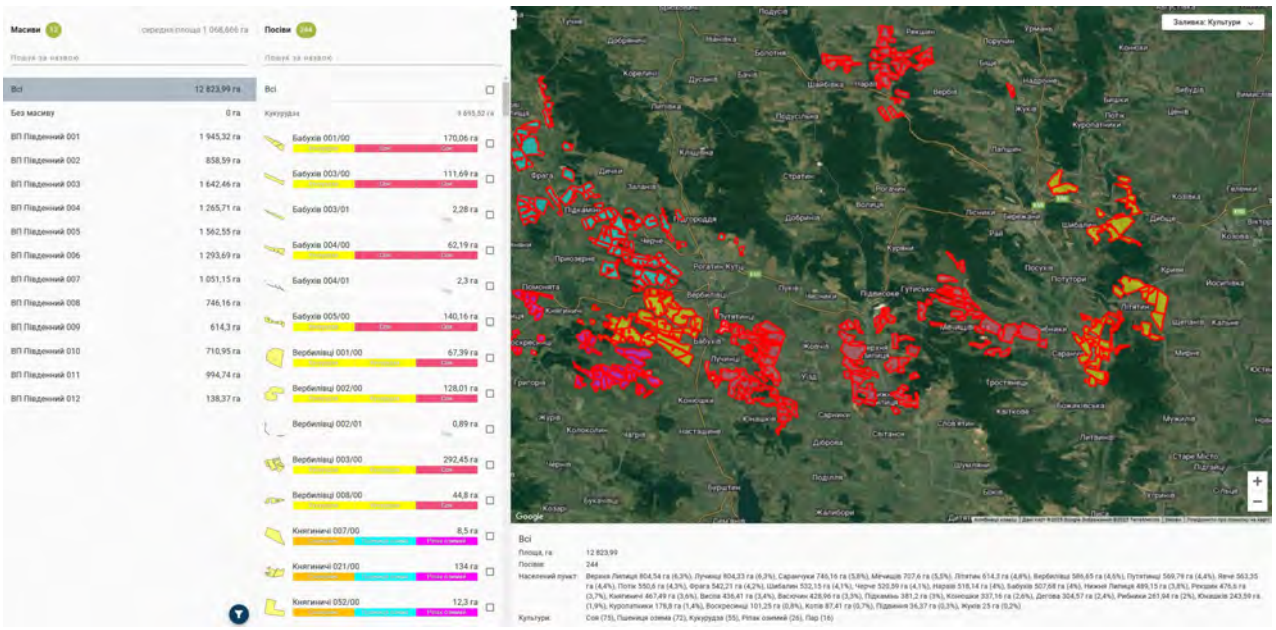


Рисунок 4.22 – Розподіл культур по відповідних полях

Екран (Рисунок 4.23) відображає інтерактивну карту, яка дозволяє переглядати земельні масиви та їхні посіви. Ліва панель містить список полів і пов’язану з ними інформацію, а права частина показує розташування полів на карті. Інтерфейс підтримує пошук, фільтрацію та деталізацію даних. На даному етапі потрібно відібрати ті поля, для яких система буде визначати точку ЦАР.

При наближенні карти на ній відображаються кількість полів, що на даний момент можна побачити на карті. Даний ефект можна побачити на рисунку 2.18.

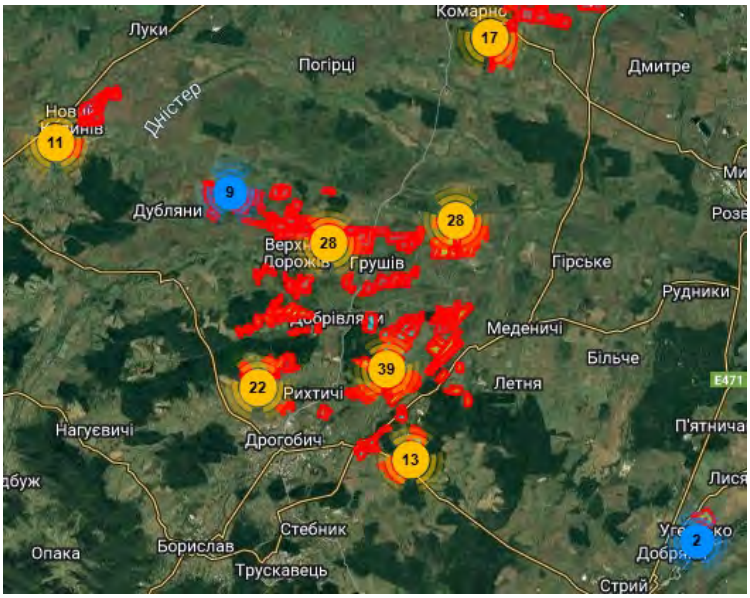


Рисунок 4.23 – Завдання зон попиту (районів).

Для демонстрації роботи виберемо один підрозділ з полями і визначимо для нього місце для ЦАР. Район підрозділу видно на рисунку 4.24.

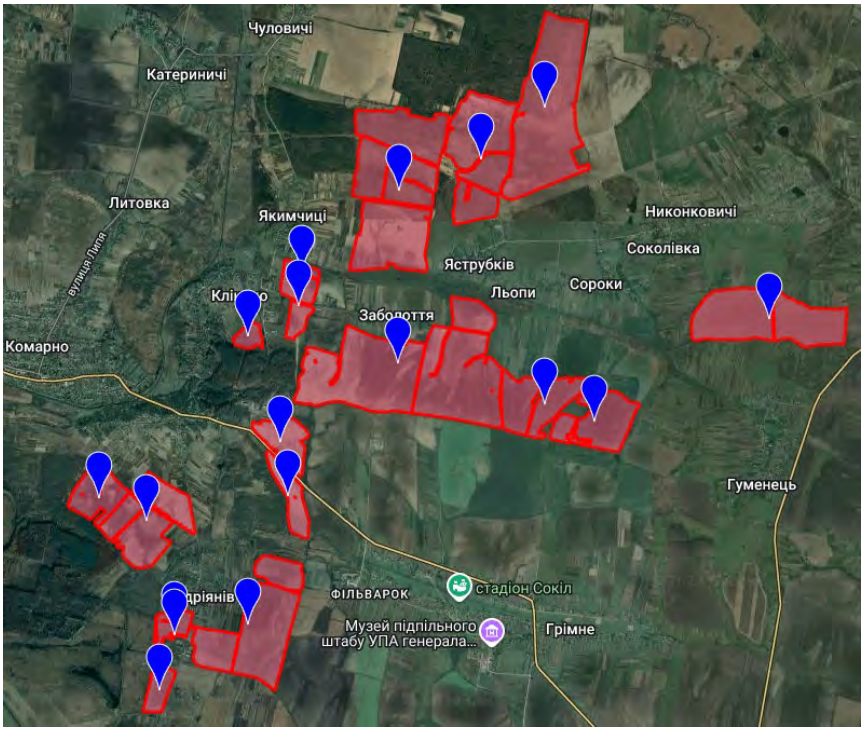


Рисунок 4.24 – Завдання параметрів зони попиту (району)

Таким чином, можна переглянути вхідні параметри для практичного прикладу. Припустимо, задано область, що включає дев’ять зон попиту (підрозділів), параметри яких наведено на рисунку 4.25.

	A	B	C	D	E
1	Підрозділ	α	β	A	B
2	Кагарлик 001	31	33	585	662
3	Кагарлик 001/00	5	6	100	110
4	Кагарлик 001/01	12	14	300	340
5	Кагарлик 001/02	6	6	105	117
6	Кагарлик 001/03	6	2	50	62
7	Кагарлик 001/04	4	2	30	33
8	Кагарлик 002	7	5	200	210
10	Кагарлик 003	14	15	290	340
14	Кагарлик 004	17	20	365	420
18	Кагарлик 005	9	9	160	165
20	Кагарлик 006	8	12	320	350
21	Кагарлик 007	9	12	185	200
23	Кагарлик 008	7	9	120	127
25	Кагарлик 009	10	12	220	225
28					

Рисунок 4.25 – Завдання параметрів попиту для кожної зони (району).

На наступному етапі користувачу необхідно задати параметри ЦАР, включаючи пропускну здатність (ємність) і координати географічного

розташування.

Для введення параметрів географічного розташування користувач може ввести координати вручну (Рисунок 4.26), вказати місцезнаходження центру акумуляції безпосередньо на карті інформаційно-картографічної служби або автоматично розрахувати раціональне місце розташування ЦАР для даних точок попиту (Рисунок 4.27).

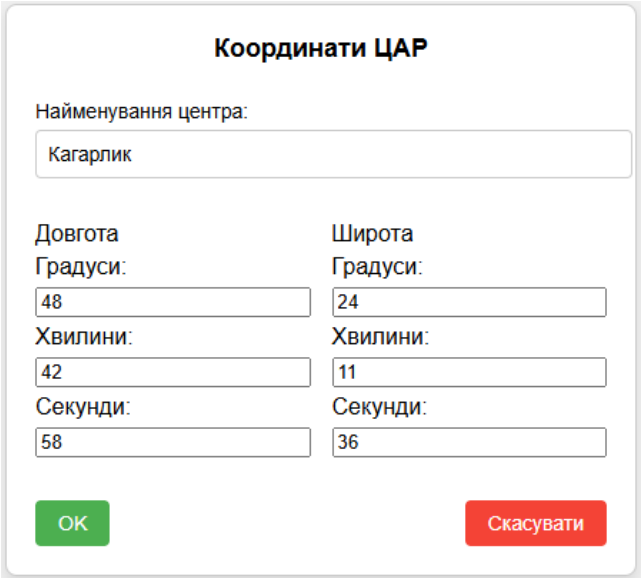


Рисунок 4.26 – Завдання географічних координат ЦАР вручну.

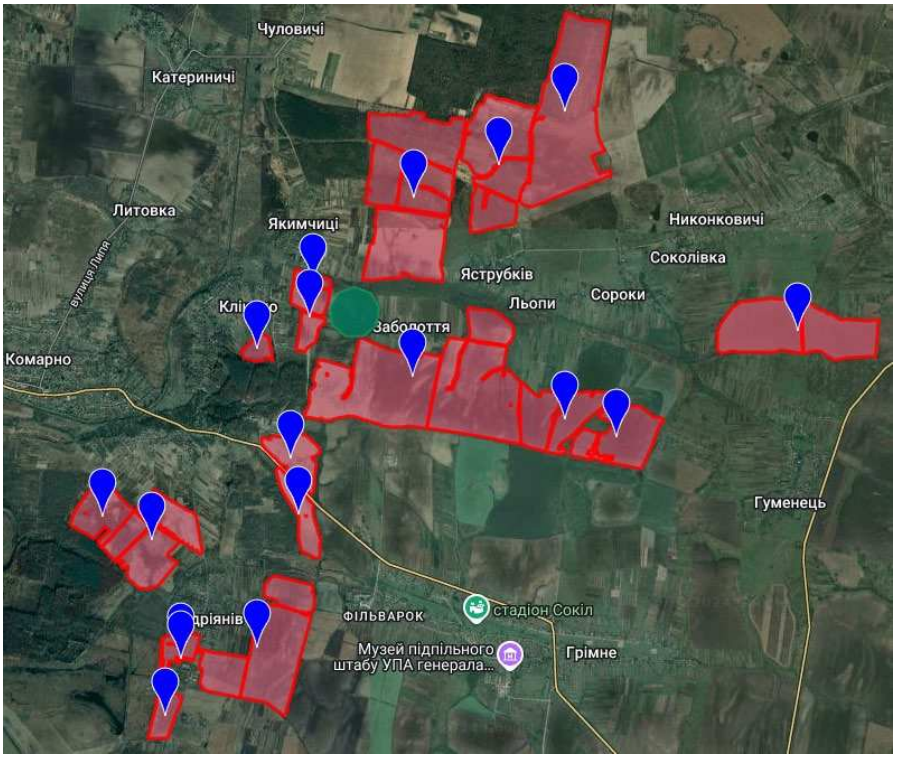


Рисунок 4.27– Зона розташування ЦАР.

Наступним етапом є визначення пропускної здатності (ємності) кожного ЦАР. Користувач має натиснути на центр, після чого система запропонує ввести значення параметрів ємності (Рисунок 4.28).

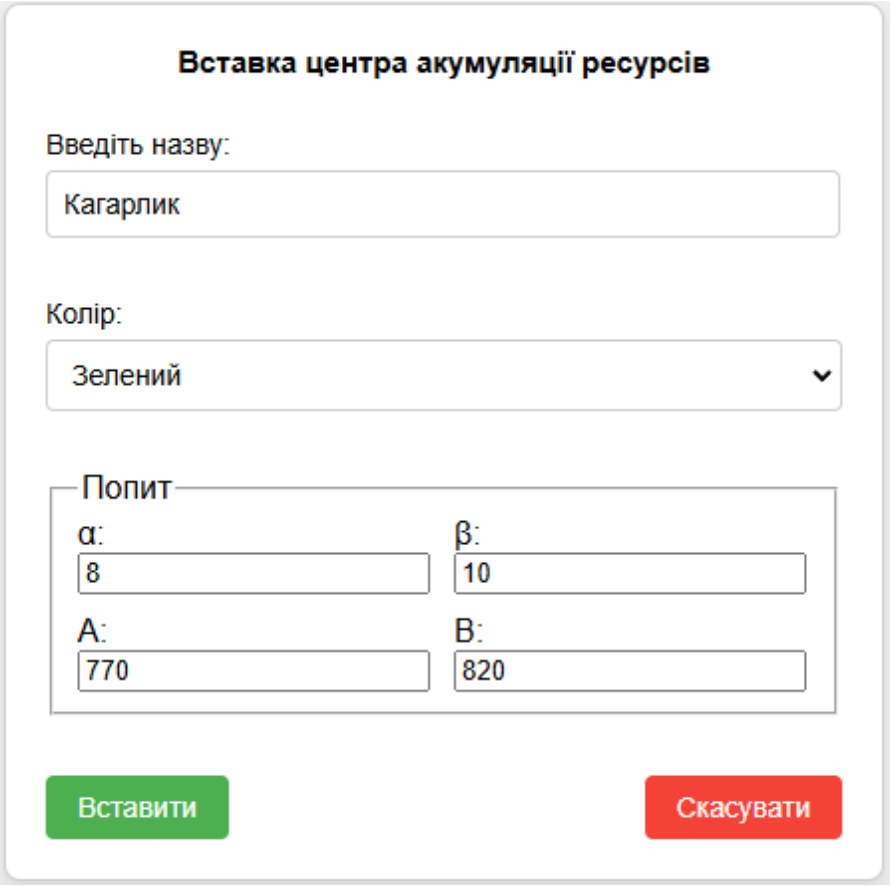


Рисунок 4.28 – Завдання пропускної здатності (ємності) ЦАР.

Для розглянутого прикладу визначено три центри акумуляції ресурсів, параметри яких наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри центрів акумуляції ресурсів

ЦАР	Ємність				Координати	
	α	β	A	B	довгота	широта
Кагарлик	10	18	1000	1100	48°42' 58"	24° 11' 36"
Кагарлик 2	9	7	800	820	48°44' 23"	23° 12' 44"
Кагарлик 3	8	10	770	820	48°41' 57"	24° 11' 96"

На цьому процес введення вихідних даних завершено.

Програма, використовуючи розроблений метод та алгоритми, виконує розрахунок і надає користувачу для аналізу такі параметри:

– відстань від кожного центру акумуляції ресурсів до центру зони попиту (району);

– значення потенціалів взаємозв’язків центрів акумуляції ресурсів із зонами попиту (районами), на основі яких здійснюється групування зон попиту (районів) за центрами акумуляції;

– значення ступеня належності зони попиту (району) до центрів акумуляції ресурсів.

Для розглянутого прикладу визначено параметри, що задають відстані від кожного ЦАР до центру зони попиту (району) (Рисунок 4.29), а також значення потенціалів взаємозв’язків ЦАР із зонами попиту (районами) (Рисунок 4.30). На основі цих даних здійснено групування зон попиту (районів) за центрами акумуляції (таблиця 2.4)

Матриця відстані

	Кагарлик 001/00	Кагарлик 002/00	Кагарлик 003/00	Кагарлик 004/00	Кагарлик 005/00	Кагарлик 006/00	Кагарлик 007/00	Кагарлик 008/00	Кагарлик 009/00
Кагарлик 1	0,00|0,00|38,92|38,92|	0,00|0,00|17,22|17,22|	0,00|0,00|41,7|41,7|	0,00|0,00|23,95|23,95|	0,00|0,00|21,17|21,17|	0,00|0,00|15,49|15,49|	0,00|0,00|44,70|44,70|	0,00|0,00|45,46|45,46|	0,00|0,00|40,70|40,70|
Кагарлик 2	0,00|0,00|25,56|25,56|	0,00|0,00|43,4|43,4|	0,00|0,00|41,13|41,13|	0,00|0,00|32,63|32,63|	0,00|0,00|36,5|36,5|	0,00|0,00|21,13|21,13|	0,00|0,00|24,64|24,64|	0,00|0,00|28,32|28,32|	0,00|0,00|38,86|38,86|
Кагарлик 3	0,00|0,00|28,58|28,58|	0,00|0,00|23,62|23,62|	0,00|0,00|38,39|38,39|	0,00|0,00|28,46|28,46|	0,00|0,00|28,46|28,46|	0,00|0,00|33,26|33,26|	0,00|0,00|26,91|26,91|	0,00|0,00|31,39|31,39|	0,00|0,00|19,13|19,13|

Перерахувати координати ЦАР

Відміна

Рисунок 4.29 – Таблиця відстаней

На основі розрахованих параметрів сформовано таблицю значень потенціалів взаємозв’язків центрів акумуляції ресурсів із зонами попиту (Рисунок 2.26).

Матриця потенціалів

	Кагарлик 001/00	Кагарлик 002/00	Кагарлик 003/00	Кагарлик 004/00	Кагарлик 005/00	Кагарлик 006/00	Кагарлик 007/00	Кагарлик 008/00	Кагарлик 009/00
Кагарлик 1	23,03|33,32|410,38|510,84	1,03|1,26|12,89|26,44	3,40|5,22|66,95|85,55	40,11|57,42|709,00|897,42	1,09|1,21|15,07|17,09	1,24|2,16|35,37|42,55	0,21|0,33|3,63|4,32	0,18|0,27|2,70|3,14	0,59|0,84|10,70|12,63
Кагарлик 2	2,28|2,61|27,62|43,33	0,32|0,51|10,19|22,57	0,64|0,77|10,96|12,69	0,38|0,75|10,22|12,92	4,08|4,49|51,24|67,23	0,61|0,94|17,20|20,15	0,69|0,93|10,24|11,78	0,22|0,34|3,66|4,13	0,70|0,90|12,50|13,60
Кагарлик 3	1,51|1,59|23,46|27,21	1,54|0,79|22,40|24,11	0,54|1,00|15,82|19,01	0,45|0,51|7,77|9,17	0,68|0,67|10,09|10,66	0,20|0,20|3,49|6,10	1,23|1,58|29,56|32,83	4,62|5,97|69,30|75,24	10,35|11,64|182,58|151,40
	29,74|38,22|471,46|583,38	2,38|2,55|45,40|73,13	5,40|6,99|83,73|119,04	41,14|58,68|726,00|919,11	5,76|6,37|86,30|93,01	2,05|2,26|38,16|58,06	2,03|2,75|34,47|38,94	5,36|6,39|75,72|82,51	11,85|13,58|205,94|217,11

Перерахувати координати ЦАР

Відміна

Рисунок 4.30 – Таблиця значень потенціалів

Отримані дані використовуються для групування зон попиту (районів) за центрами акумуляції ресурсів. Результати закріплення зон попиту наведені в

таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Закріплення зон попиту за центрами акумуляції

№	Назва	ЦАР
1	Кагарлик 001/00	Кагарлик 1
2	Кагарлик 002/00	Кагарлик 1
3	Кагарлик 003/00	Кагарлик 1
4	Кагарлик 004/00	Кагарлик 1
5	Кагарлик 005/00	Кагарлик 1
6	Кагарлик 006/00	Кагарлик 2
7	Кагарлик 007/00	Кагарлик 2
8	Кагарлик 008/00	Кагарлик 2
9	Кагарлик 009/00	Кагарлик 3

Для оцінки параметрів поточного стану розподільчої системи інформаційне забезпечення надає зведені дані щодо вартості розподілу ресурсів за заданого розташування ЦАР. Таким чином, для розглянутого прикладу вартість переміщення ресурсів за заданого розташування ЦАР представлена на рисунку 4.31.

Вартість перевезення

ЦАР	α	β	A	B
Кагарлик 1	892,77	1295,73	98587,00	109821,00
Кагарлик 2	403,68	403,68	7176,54	7400,81
Кагарлик 3	333,66	724,42	26973,80	28660,80
Загалом:	**1630,11**	**2423,83**	**132737,34**	**145882,61**

Рисунок 4.31 – Розрахунок вартості переміщення

Як зазначено в розділі 1.8, завдання параметрів задачі дозволяє забезпечити збалансованість рішення:

Після виконання всіх розрахунків інформаційне забезпечення надає користувачу:

- дані про групування зон попиту (районів) за ЦАР;
- розраховане значення вартості розподілу ресурсів за заданого розташування ЦАР;
- рекомендації щодо уточнення (коригування) координат ЦАР у вигляді рекомендованих зон;
- розраховане значення вартості розподілу ресурсів за уточненого (скоригованого) розташування ЦАР;
- оцінку вартості розподілу ресурсів до/після уточнення розташування ЦАР.

Для розглянутого прикладу рекомендації, надані інформаційним забезпеченням, зображені на рисунку 4.32.

Рекомендації користувачу

Розраховано:

Групування:

Кагарлик	Кагарлик 001/00	Кагарлик 002/00	Кагарлик 003/00	Кагарлик 004/00	Кагарлик 005/00
Кагарлик 2	Кагарлик 006/00	Кагарлик 007/00	Кагарлик 008/00		
Кагарлик 3	Кагарлик 009/00				

Загальна вартість перевезення при даному групуванні:

α	β	A	B
1630,11	2423,83	132737,34	145882,61

РЕКОМЕНДОВАНО:

Координати областей розташування проміжних центрів:

Проміжний центр	Довгота	Широта
Кагарлик	48°42' 58"	24° 11' 36"
Кагарлик 2	48°44' 23"	23° 12' 44"
Кагарлик 3	48°41' 57"	24° 11' 96"

Загальна вартість перевезення при рекомендованих параметрах:

α	β	A	B
1310,06	2363,00	112449,09	119894,09

ВИСНОВОК: Вартість перевезення при рекомендованих параметрах: ЗМЕНШЕНО НА 14.97%

Зберегти | Друк | ОК | Відміна

Рисунок 4.32 – Рекомендації користувачу

Таким чином, застосування методу групування, дозволило визначити закріплення зон попиту за ЦАР відповідно до розрахованих потенціалів взаємозв'язків. Коригування координат ЦАР (метод центра тяжіння) відбулося з використанням отриманих результатів, що дозволило зменшити загальну вартість транспортування на 14,97%. Завдання параметрів задачі надало змогу визначати розташування ЦАР не як точку, а як область, що відповідає найкращій зоні розміщення.

4.6 Порівняльна оцінка результатів при варіації умов побудови транспортно-розподільчої системи

Окрім отриманих у розділі 4.5 результатів, у процесі дослідження можливо здійснювати модифікацію початкових параметрів і умов задачі для поглибленого аналізу функціонування транспортно-розподільчої системи (ТРС). Такий підхід дозволяє оцінити гнучкість системи та її здатність адаптуватися до змінних умов експлуатації.

Можливі варіації у структурі ТРС можуть включати:

- зміну кількості ЦАР;
- зміну значень пропускної спроможності (потужності) ЦАР;
- зміну ступеня належності областей (районів) попиту до центрів акумуляції ресурсів.

Оптимізація кількості ЦАР може передбачати їхнє додавання або вилучення залежно від змін у потребах регіону чи стратегічних цілей управління транспортною мережею. Така варіація є особливо важливою на ранніх етапах проектування ТРС, коли здійснюється оцінка ефективності різних сценаріїв розвитку системи.

Зокрема, збільшення кількості ЦАР може сприяти зменшенню навантаження на окремі центри та скороченню витрат на транспортування, тоді як зменшення їхньої кількості потребує відповідного перерозподілу ресурсів між

існуючими вузлами. Оцінка таких змін здійснюється шляхом аналізу вартості перевезень, ступеня завантаження ЦАР та рівномірності розподілу ресурсів.

Коригування значень пропускної спроможності центрів акумуляції ресурсів є доцільним у випадках тимчасових коливань попиту або змін в інфраструктурній доступності регіону. Врахування цих параметрів дозволяє ефективніше управляти розподілом ресурсів, запобігати надмірному завантаженню окремих ЦАР та підвищувати загальну продуктивність ТРС.

Зміна ступеня належності районів до центрів акумуляції ресурсів може бути спричинена зовнішніми факторами, зокрема:

- змінами конкурентного середовища;
- коливаннями у структурі попиту;
- змінами в логістичних характеристиках регіонів.

Перегрупування районів може впливати на ефективність роботи ТРС, оскільки від цього залежить оптимальність розподілу вантажопотоків і транспортних витрат.

Для ілюстрації впливу зазначених факторів розглянемо модельний сценарій, у якому до існуючої структури ТРС додається новий центр акумуляції ресурсів – «Кагарлик-4». Його основні параметри наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Параметри доданого центру акумуляції ресурсів «Кагарлик-4»

ЦАР	Ємність (α\alpha)	Ємність (β\beta)	Координати(довгота, широта)
Кагарлик-4	8	10	48°42'10" 24°12'30"
Новий	8	10	48°41'45" 24°11'50"

Додавання нового центру спричиняє перегрупування районів попиту, що відображено у таблиці 2.8. Зокрема, деякі райони, які раніше обслуговувалися іншими ЦАР, тепер закріплені за новим центром. Така реорганізація може бути наслідком зміни транспортних зв’язків або переваг у розподілі навантаження між центрами.

Таблиця 4.6 – Закріплення районів попиту за ЦАР після додавання нового центру

№	Назва	ЦАР
1	Кагарлик 001/00	Кагарлик-1
2	Кагарлик 002/00	Кагарлик-1
3	Кагарлик 003/00	Кагарлик-1
4	Кагарлик 004/00	Кагарлик-1
5	Кагарлик 005/00	Кагарлик-4
6	Кагарлик 006/00	Кагарлик-2
7	Кагарлик 007/00	Кагарлик-2
8	Кагарлик 008/00	Кагарлик-3
9	Кагарлик 009/00	Кагарлик-3

Як видно з таблиці 4.6, після додавання ЦАР «Новий» відбулася реорганізація транспортного розподілу: райони Кагарлик-006/00, Кагарлик-007/00 та Кагарлик-008/00 були перенаправлені до нового центру. Внаслідок цього за ЦАР «Кагарлик-3» закріплено чотири райони замість трьох, тоді як за ЦАР «Кагарлик-2» не залишилося жодного району.

Вартість переміщення ресурсів до та після коригування координат центрів акумуляції ресурсів подано на рисунку 4.33.

Матриця потенціалів перерахунок

ЦАР	Вартість перевезення	Вартість перевезення (перерахунок)
Кагарлик	1 238,51 | 1 828,40 | 79 893,80 | 90 193,20	1 002,20 | 1 228,55 | 62 317,64 | 70 350,70
Кагарлик 2	0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00	0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00
Кагарлик 3	333,66 | 724,42 | 26 973,80 | 28 660,80	293,60 | 609,18 | 23 467,20 | 24 648,30
Кагарлик 4	402,10 | 361,14 | 14 695,68 | 9 044,22	378,10 | 299,25 | 7 217,41 | 7 506,70
Загалом:	1 974,27 | 2 913,96 | 115 563,28 | 127 898,22	1 673,90 | 2 424,58 | 93 002,25 | 102 505,70

Перерахувати координати центрів Відміна

Рисунок 4.33 – Значення вартості переміщення при збільшенні кількості центрів акумуляції ресурсів.

Оцінка вартості переміщення ресурсів до та після змін у розташуванні ЦАР представлена у таблиці 4.7. Вона відображає, як модифікація структури ТРС впливає на сукупні витрати системи.

Таблиця 4.7 – Зведені значення вартості розподілу ресурсів

ЦАР	**Вартість перевезення (α\alpha)**	**Вартість перевезення (β\beta)**
Кагарлик-1	1 238,51	1 820,22
Кагарлик-2	403,68	1 175,00
Кагарлик-3	333,66	724,42
Кагарлик-4	947,12	1 523,77
Загалом	**2 923,97**	**5 243,41**

Аналіз значень підтверджує, що при розміщенні центрів акумулювання у рекомендованих областях загальна вартість транспортування зменшилась.

Відповідно до зазначених значень, розглянемо випадок при зменшенні кількості центрів акумуляції ресурсів. Для прикладу, розглянутого в розділі 4.5, проведемо аналіз ефективності побудови транспортно-розподільчої системи з двома ЦАР. Як розглянуті центри оберемо Кагарлик-1 та Кагарлик-3, оскільки за ними закріплено найбільшу кількість районів попиту.

Після коригування конфігурації центрів акумуляції ресурсів проведено аналіз вартості транспортування до та після змін. Основним завданням такого аналізу є оцінка впливу зміни кількості центрів та перерозподілу ресурсів на загальні витрати системи.

Як показують результати, після перегрупування районів попиту загальна вартість транспортування змінилася. Додавання нового центру акумуляції ресурсів дозволило зменшити відстані доставки для певних регіонів, однак у той же час спричинило необхідність оптимізації логістичних маршрутів. Для детального порівняння наведемо параметри задачі для двох ЦАР у таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Параметри задачі для двох ЦАР

ЦАР	Ємність (α\alpha)	Ємність (β\beta)
Кагарлик-1	15	22
Кагарлик-3	12	18

На основі запропонованих змін проведено перерозподіл районів попиту між ЦАР. Це вплинуло на закріплення областей постачання, що подано у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Закріплення ЦАР після зменшення їх кількості

№	Назва	ЦАР
1	Кагарлик 001/00	Кагарлик-1
2	Кагарлик 002/00	Кагарлик-1
3	Кагарлик 003/00	Кагарлик-1
4	Кагарлик 004/00	Кагарлик-1
5	Кагарлик 005/00	Кагарлик-1
6	Кагарлик 006/00	Кагарлик-3
7	Кагарлик 007/00	Кагарлик-3
8	Кагарлик 008/00	Кагарлик-3
9	Кагарлик 009/00	Кагарлик-3

Вартість розподілу ресурсів до та після коригування координат центрів акумулювання ресурсів наведено на рисунку 2.30.

Матриця потенціалів перерахунок

Вартість перевезення	Вартість перевезення (перерахунок)
1 820,20 | 2 223,15 | 115 075,00 | 126 824,00	1 375,23 | 1 670,63 | 87 457,26 | 96 386,24
0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00	0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00
333,66 | 724,42 | 26 973,80 | 28 660,80	293,60 | 609,18 | 23 467,20 | 24 648,30
0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00	0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00
2 153,80 | 2 947,57 | 142 048,80 | 155 484,80	1 668,83 | 2 279,81 | 110 924,46 | 121 034,54

Перерахувати координати центрів Відміна

Рисунок 4.34 – Значення вартості розподілу при зменшенні кількості акумуляційних центрів.

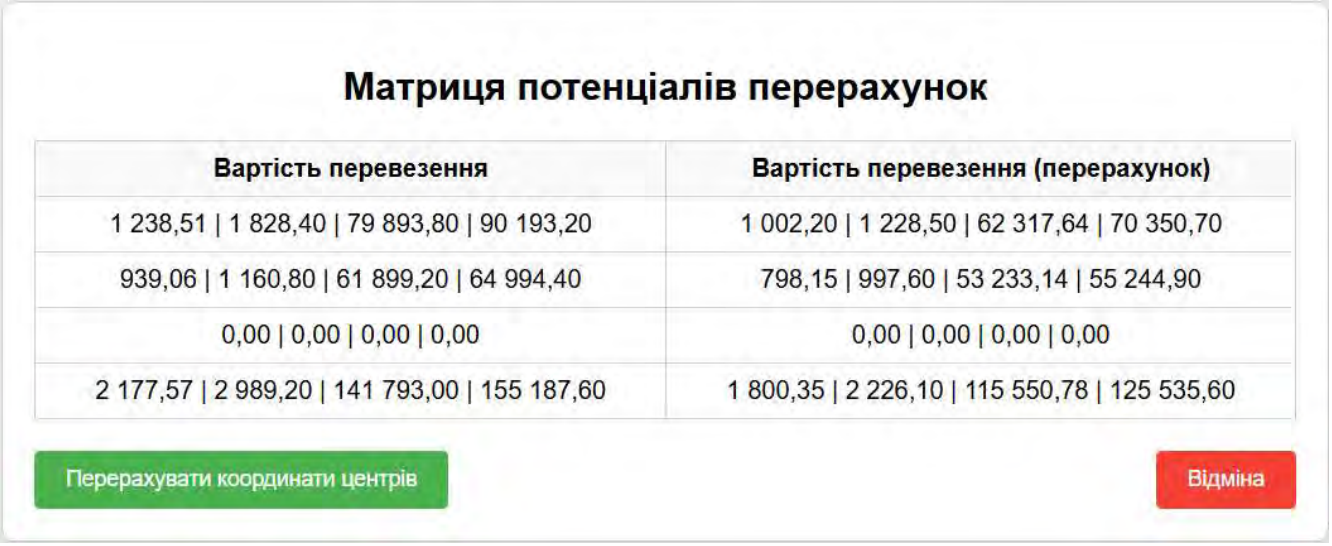
Зменшення кількості центрів акумуляції ресурсів призвело до зміни вартості перевезень. Оцінка цих змін дає можливість оцінити ефективність нового розподілу та сформувати рекомендації щодо подальшої оптимізації транспортно-розподільчої системи. Відповідні результати наведено в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Зведені значення вартості розподілу ресурсів

ЦАР	**Вартість перевезення (α\alpha)**	**Вартість перевезення (β\beta)**
Кагарлик-1	1 002,21	1 223,15
Кагарлик-3	1 175,05	1 882,40
Загалом	**2 177,57**	**3 105,55**

Аналіз значень підтверджує, що при розміщенні центрів акумулювання у Аналіз отриманих значень підтверджує, що раціональне розміщення центрів акумуляції сприяє зниженню загальної вартості транспортування. У випадку коригування конфігурації ТРС шляхом зменшення кількості центрів спостерігається загальне зниження витрат, що підтверджується результатами таблиці 4.10.

Затрати на транспортування ресурсів до та після коригування координат центрів наведено на рисунку 4.35.



Матриця потенціалів перерахунок

Вартість перевезення	Вартість перевезення (перерахунок)
1 238,51 | 1 828,40 | 79 893,80 | 90 193,20	1 002,20 | 1 228,50 | 62 317,64 | 70 350,70
939,06 | 1 160,80 | 61 899,20 | 64 994,40	798,15 | 997,60 | 53 233,14 | 55 244,90
0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00	0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00
2 177,57 | 2 989,20 | 141 793,00 | 155 187,60	1 800,35 | 2 226,10 | 115 550,78 | 125 535,60

Перерахувати координати центрів

Відміна

Рисунок 4.35 – Значення затрат на розподіл ресурсів при зміні потужності центрів акумуляції ресурсів.

Коригування потужності центрів акумуляції ресурсів дозволяє зменшити витрати на транспортування завдяки ефективнішому розподілу ресурсів. Вартість перевезення до та після зміни потужності ЦАР наведена у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Зведені значення вартості перевезення

ЦАР	**Вартість перевезення (α)**	**Вартість перевезення (β)**	**Зменшення вартості**
Кагарлик-1	1 238,51	1 882,40	14,5%
Кагарлик-3	1 002,21	1 223,15	17,2%
Загалом	**2 177,57**	**3 105,55**	**15,8%**

Аналіз отриманих даних показує, що розміщення центрів акумуляції у рекомендованих регіонах сприяє зменшенню загальних транспортних витрат. Розглянемо також зміну ступеня належності районів попиту до центрів акумуляції.

Розглянемо випадок зі зміною значень ступеня належності областей попиту (районів) до центрів акумулювання ресурсів.

Використовуючи рівняння (2.17), можна розрахувати ступінь належності кожного району попиту до відповідного ЦАР. Для прикладу, розглянутий випадок представлено на рисунку 4.36.

Матриця приналежності

	Кагарлик 001/00	Кагарлик 002/00	Кагарлик 003/00	Кагарлик 004/00	Кагарлик 005/00	Кагарлик 006/00	Кагарлик 007/00	Кагарлик 008/00	Кагарлик 009/00
Кагарлик	0,95	0,51	0,81	0,99	0,61	0,87	0,15	0,04	0,06
Кагарлик 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Кагарлик 3	0,05	0,49	0,19	0,01	0,39	0,13	0,85	0,96	0,94
Кагарлик 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Перерахувати координати центрів Відміна

Рисунок 4.36 – Значення ступеня належності ЦАР.

Як видно на рисунку, для області попиту «Кагарлик» ступінь належності до центру «Кагарлик-2» становить 0,51, а до центру «Кагарлик-3» – 0,49. Таким чином, область попиту закріплена за ЦАР «Кагарлик». У разі потреби можливе переназначення цієї області до іншого центру.

Оцінка результатів варіації умов побудови транспортно-розподільчої системи представлена у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Результати порівняльної оцінки варіацій умов побудови ТРС

Вартість розподілу		***α***	***β***	***A***	***B***	**Зниження витрат (%)**
№ варіанту	**ЦАР**					
1	Кагарлик-1 Кагарлик-2 Кагарлик-3	1310,06	2363,00	112449,02	119894,09	15%
2	Кагарлик-1 Кагарлик-2 Кагарлик-3 Кагарлик-4	1673,90	2424,58	93002,25	102505,70	20%
3	Кагарлик-1 Кагарлик-3	1668,83	2279,81	110924,46	121034,54	22%
4	Кагарлик-1 Кагарлик-2 (збільшення ємності)	1800,35	2226,10	115550,78	125535,6	18%
5	Кагарлик-1	1014,50	1728,5	158135,78	170958,50	26%

Результати показують, що коригування координат центрів акумуляції призвело до зниження загальної вартості транспортування на від 15% до 26%. Це підтверджує ефективність застосування методики раціоналізації розміщення ЦАР. Остаточний аналіз результатів моделювання подано на рисунку 4.37.

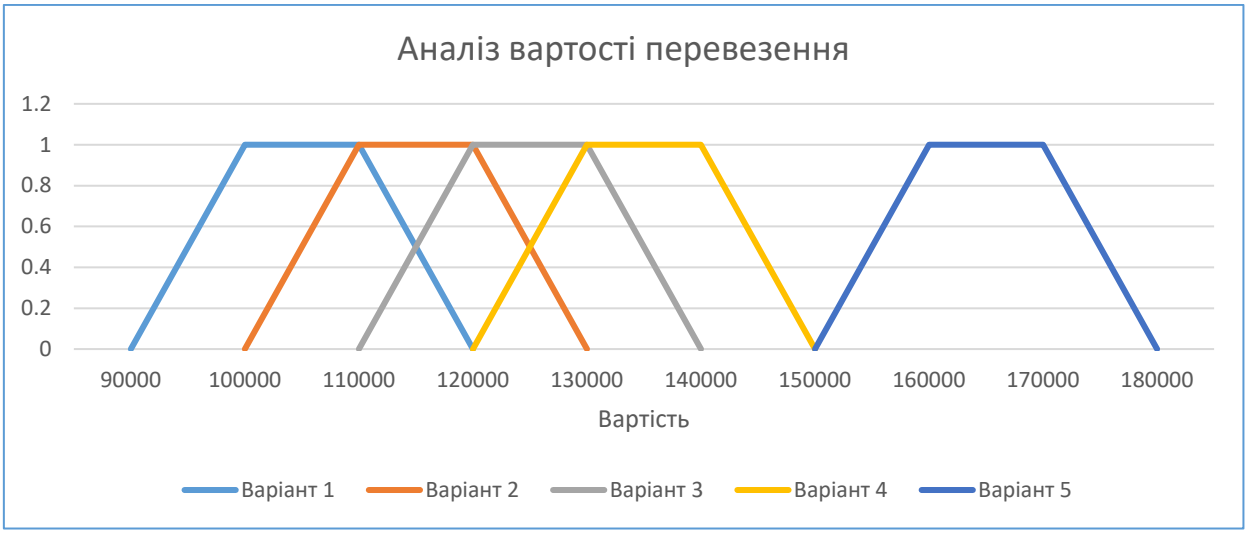


Рисунок 4.37 – Аналіз вартості розподілу ресурсів при даному розрахунку.

Запропоноване інформаційне забезпечення дозволяє користувачам

візуалізувати вартість транспортування. Це надає можливість проводити аналіз різних варіантів розміщення центрів акумуляції.

Для оцінки ефективності методу раціонального розміщення ЦАР результати варіацій умов побудови ТРС порівнюють із результатами групування областей попиту, розрахованих такими методами:

G – гірський метод, який визначає центри групування шляхом обчислення потенціалів кожної точки. Попит та потужність ЦАР не враховуються.

NM = {G, Z} – розроблений метод, що враховує всі взаємозв'язки й дозволяє коригувати координати ЦАР відносно областей попиту.

Результати порівняльної оцінки цих методів подано в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Результати порівняльної оцінки методів групування

Метод	Загальна вартість α	Загальна вартість β	Зниження витрат (%)
G	3 500,00	5 300,00	–
NM	2 950,00	4 250,00	25%

Аналіз показує, що метод {G, V} дозволяє знизити витрати на 10% у порівнянні з методом G, а розроблений метод NM забезпечує зниження до 25%. Це свідчить про ефективність застосування запропонованого підходу для раціонального розміщення ЦАР.

4.7 Візуалізація витрат підприємства засобами Microsoft Power BI

У цьому розділі описано функціонал і приклади звітів, реалізованих у середовищі Power BI (PBI) для аналізу економічних та організаційних показників аграрного виробництва. Матеріал охоплює структуру даних, особливості відображення витрат та планових показників у розрізі культур, а також механізми глибокої деталізації й фільтрації. На рисунку 4.38 представлено приклад звіту з аналізу економічних показників у розрізі посівів і культур.

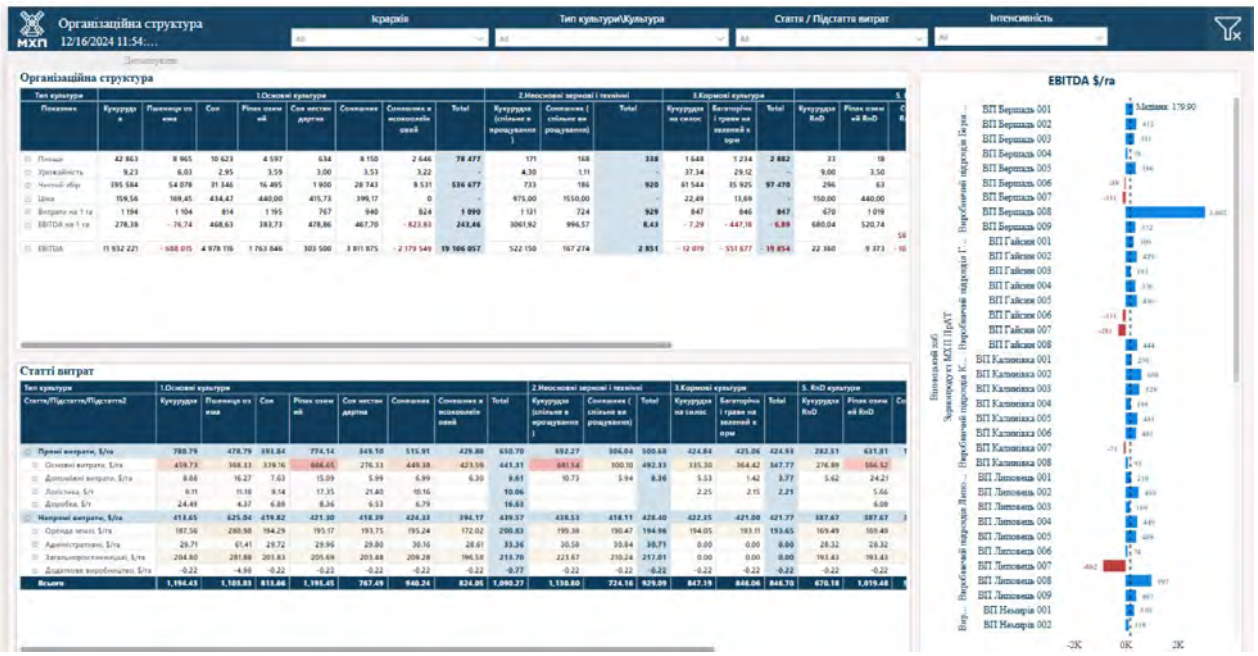


Рисунок 4.38 – сторінка звіту з витратами по статтям і по організаційній структурі

Основними параметрами, що оцінюються в моделі, є:

Площа планової культури – абсолютний показник, що відображає кількість гектарів, запланованих для засіву певною культурою.

Урожайність планової культури – відносний показник, що демонструє запланований обсяг збору культури з одного гектара (т/га). Розрахунок базується на історичних даних фактичної урожайності та характеристиках попередніх культур.

Чистий збір планової культури – абсолютний показник, який визначається як добуток планової урожайності та площі посіву. Він відображає очікувану масу продукції в тоннах.

Ціна продажу 1 тонни культури – вартісний показник, що характеризує планову ціну реалізації (в $/т).

Витрати на 1 гектар – відносний показник, що враховує сукупні витрати на технологічне забезпечення вирощування культури на одиницю площі (в $/га).

EBITDA на 1 гектар – фінансовий показник, що розраховується як різниця між доходами від реалізації продукції та витратами на її вирощування. Формула розрахунку: $EBITDA_{1\ \text{га}} = (\text{Чистий збір} \times \text{Ціна культури}) - \text{Витрати}$.

Загальний показник EBITDA – інтегральний фінансовий показник, що обчислюється як добуток EBITDA на 1 гектар на площу посіву. Він демонструє загальну прибутковість у розрізі культур.

Таке групування показників забезпечує ефективний аналіз економічної доцільності вирощування культур та дозволяє здійснювати порівняльну оцінку ефективності агрономічних моделей.

Аналіз структури організаційних даних та витрат за посівами і культурами

На рисунку Б.1, що знаходиться у додатку 2, наведено інтерфейс системи для аналізу верхньорівневих показників у розрізі посівів та культур.

Звіт включає такі елементи:

1. Останній час оновлення звіту – фіксує час останнього збереження даних, що дозволяє відстежувати актуальність показників.
2. Набір фільтрів – забезпечує одночасний відбір даних на двох сторінках системи: "Організаційна структура + Статті витрат" та "Номенклатура + Статті витрат". Набір фільтрів включає:
   - Ієрархія – дозволяє вибирати дані відповідно до ієрархічної структури організації.
   - Тип культури/Культура – забезпечує фільтрацію посівів за плановими культурами або групами культур.
   - Стаття/Підстаття витрат – визначає витрати, що враховуються у розрахунках EBITDA; не обрані підстатті у розрахунках участі не беруть.
   - Інтенсивність – дозволяє відбирати посіви за їх інтенсивністю.
3. Інструмент скидання фільтрів – забезпечує повернення до вихідного стану фільтрації даних.
4. Деталізація запису – при виборі рівня ієрархії у таблиці "Організаційна структура" автоматично переносить користувача до відповідної сторінки "Номенклатура + Статті витрат" зображено на рисунку Б.2, що знаходиться у додатку 2.
5. Інструменти керування таблицею – стандартний набір інструментів Power BI, що включає можливість змінювати рівень деталізації, експортувати дані,

розгортати таблицю на повний екран, створювати сповіщення тощо.

6. Таблиця "Організаційна структура" – відображає макропоказники, структуровані за ієрархією посівів та культур.

7. Діаграма "EBITDA $/га" – візуалізує значення показників та медіанних значень, що дозволяє виявляти аномалії та відхилення в розрізі посівів. Обрані елементи автоматично фільтрують дані у таблицях.

8. Таблиця "Статті витрат" – містить відносні витрати, зважені на площу посівів ($/га), деталізовані за основними підстаттями, зокрема:

- Прямі витрати -> Живлення $/га – відображають вартість добрив, використаних у технологічних операціях, залежно від моделі LAP.
- Прямі витрати -> Насіння $/га – показують витрати на насіння, зокрема гібриди, залежно від регіональної специфіки.
- Прямі витрати -> Захист рослин $/га – включають вартість засобів захисту рослин відповідно до обраної моделі LAP.

Крім того, таблиця враховує дані з файлу "LAP_Зведені моделі_Витрати", що містить середні витрати по підприємствах і культурах. Для навігації між сторінками передбачено кнопку "Повернутися".

Верхньорівневий аналіз за статтями витрат, які задаються користувачем у файлі LAP_Зведені моделі_Витрати, охоплює ключові категорії, що дозволяють оцінити економічну ефективність сільськогосподарської діяльності на макрорівні, що зображено на рисунку Б.3, що знаходиться у додатку 2.

У рамках цього аналізу виокремлюються такі групи витрат:

Прямі витрати включає витрати, безпосередньо пов’язані з виробничим процесом, такі як:

– Енергоносії – витрати на пальне та інші енергетичні ресурси, необхідні для роботи техніки та обладнання.

– Оплата праці – видатки на заробітну плату персоналу, залученого до вирощування, обслуговування та збору врожаю.

– Послуги (Вирощування та збирання) – витрати, пов’язані з залученням сторонніх організацій або ресурсів для виконання операцій вирощування, догляду за

культурами та збору врожаю.

– Логістика – витрати на транспортування продукції, зокрема перевезення врожаю з полів до місць зберігання чи переробки.

– Доробка – витрати на післязбиральну обробку врожаю, включаючи сушіння, сортування та пакування.

Непрямі витрати охоплює витрати, які мають опосередкований вплив на виробничий процес, такі як:

– Оренда – видатки, пов’язані з орендою землі, техніки чи інших ресурсів, необхідних для господарської діяльності.

– Загальнорослинницькі витрати – витрати на загальні заходи з догляду за рослинами, які не підпадають під окремі категорії.

– Адміністративні витрати – видатки на забезпечення функціонування управлінського апарату, включаючи оплату праці адміністративного персоналу.

– Сервісні служби – витрати, пов’язані з обслуговуванням техніки, обладнання чи інших ресурсів, необхідних для виробництва.

Низькорівневий аналіз витрат забезпечує деталізацію до рівня конкретних матеріальних ресурсів (ТМЦ) та хімічних елементів, що використовуються у виробництві. Зокрема:

– Прямі витрати -> Живлення – витрати на закупівлю добрив та їх внесення відповідно до технологічних вимог.

– Прямі витрати -> Насіння – видатки на насіннєвий матеріал, включаючи високоякісні гібриди, які використовуються у виробничому процесі.

– Прямі витрати -> Захист рослин – витрати на засоби захисту рослин, такі як гербіциди, інсектициди та фунгіциди, що забезпечують захист культур від шкідників і хвороб.

Такий поділ дозволяє здійснювати як загальний аналіз економічної ефективності, так і детальне вивчення витрат, що сприяє оптимізації витрат і підвищенню рентабельності сільськогосподарського виробництва. Дане представлення зображено на рисунку Б.4, що знаходиться у додатку 2.

Опис виглядає так:

1. Останній час оновлення звіту – відображає актуальність представлених даних.

2. Набір фільтрів, що діють одночасно на дві сторінки "Організаційна структура + Статті витрат" та "Номенклатура + Статті витрат". Основні елементи фільтрів:

- Ієрархія – дозволяє вибір даних за рівнями організаційної структури.
- Тип культури/Культура – забезпечує відбір посівів за їх плановою культурою або групою культур.
- Торгова група (діє лише на цій сторінці) – фільтрує дані за торговими групами номенклатури.
- Стаття/Підстаття витрат – визначає витрати за відповідними статтями чи підстаттями. Підстатті, що не обрані, не враховуються у розрахунках EBITDA.
- Номенклатура (діє лише на цій сторінці) – забезпечує фільтрацію даних за номенклатурою (ТМЦ).
- Інтенсивність – відбирає посіви за рівнем їх інтенсивності.

3. Інструмент скидання фільтрів – дозволяє повернути всі фільтри на сторінці у початковий стан.

4. Таблиця "Статті витрат" – відображає агреговані відносні показники витрат у розрізі підстатей для всіх посівів, що входять до аналізу.

- Витрати, представлені у таблиці, зважуються на площу посівів, до яких вони застосовуються.
- Для підстатей, таких як "Логістика" та "Доробка", під час агрегації витрат на верхні рівні здійснюється перехід з $/т до $/га, що реалізується шляхом множення на урожайність відповідного посіву.

5. Діаграма "Витрати $/га" – містить графічне представлення витрат на одиницю площі ($/га) для кожного виробничого підрозділу. Вертикальна пунктирна лінія позначає медіанне значення витрат, що дозволяє виявляти

аномальні відхилення або ефективність окремих підрозділів.

6. Таблиця "Номенклатура" – деталізує витрати за елементами номенклатури, включаючи специфікацію культур, типів матеріальних цінностей (ТМЦ) та підстатей витрат. Основні показники:

- Площа посіву, га – загальна площа посівів для кожної культури.
- Площа внесення, га – площа, на яку застосовано відповідні ТМЦ чи операції.
- Кількість – обсяг використаних ресурсів у натуральних одиницях вимірювання.
- Вміст елемента – концентрація чи кількість діючих речовин у ТМЦ.
- Норма на посів, од. вим./га – нормативна кількість ТМЦ, що використовується на 1 га посіву.
- Норма на внесення, од. вим./га – кількість ТМЦ, яка застосовується на 1 га внесення.
- Ціна ТМЦ, $/од. вим. – вартість одиниці матеріальних цінностей.
- Витрати, $/га – підсумкова вартість витрат у розрахунку на гектар.

Таке розширене групування дозволяє деталізувати витрати та їхні компоненти як на рівні виробничих підрозділів, так і на рівні конкретних культур чи ресурсів, забезпечуючи ефективний інструмент для аналізу й оптимізації виробничих процесів.

Зважування показника "Витрати $/га" працює за принципом, що зображений на рисунку Б.5, що знаходиться у додатку 2.

Представлення номенклатура складається з 4 частин: по культурі, по торг. групі, по орг структурі, по ном групі. Представлення по культурі можна побачити на рисунку Б.6, що знаходиться у додатку 2.

На зображенні представлено таблицю у форматі звітної панелі або аналітичного модуля агровиробничої системи, яка демонструє дані в розрізі культур, підкультур і засобів, пов’язаних із вирощуванням сільськогосподарських культур. Ліва частина таблиці містить перелік основних категорій, таких як "Основні культури", під якими розташовані підрозділи, наприклад, "Кукурудза",

"Пшениця озима", "Соя" та інші. Для кожної культури відображено додаткові підгрупи, що включають насіння, добрива, біопрепарати, засоби захисту рослин. Усередині підгруп вказані конкретні товари, наприклад, "Біопрепарат Екосектрі Триходерма КС концентрат суспензії" або "Біопрепарат Сциходія розини".

Права частина таблиці містить числові дані, організовані у форматі колонок, серед яких тип одиниці виміру, наприклад, літри (л) або гектари (га), загальна площа, на якій висаджено або заплановано посів культури, фактична площа, на якій застосовано добрива, препарати чи інші засоби, кількість використаного матеріалу в зазначених одиницях виміру, а також вихід елементів живлення, отриманих з використаного матеріалу. Додатково вказуються норми витрат матеріалу: норма витрат на гектар посіву та норма витрат на гектар внесення. У колонках відображається вартість одиниці матеріалу у доларах США та розрахункові витрати на гектар у доларах США.

У нижній частині таблиці представлений підсумковий рядок "Total", який відображає сукупні значення за всіма культурами. Цей підсумок дозволяє користувачам отримати загальну картину витрат, площ та використаних ресурсів у межах усієї виробничої діяльності. Такий інтерфейс надає можливість детального аналізу витрат та ресурсів у розрізі культур і матеріалів, сприяючи оптимізації аграрного виробництва та ефективному управлінню ресурсами. Даний рисунок Б.7 можна побачити у додатку 2.

На наданому зображенні відображено таблицю, в якій дані структуровані у вигляді ієрархічного списку номенклатури аграрних ресурсів, зокрема добрив. Ліва частина таблиці містить вкладену систему категоризації, що спершу демонструє загальні групи, такі як «Азотні добрива», «Калійні добрива», «Комплексні добрива», а при їх розкритті розкриває конкретні позиції товарів. Верхня панель таблиці обладнана фільтрами та перемикачами для зміни способу відображення даних, таких як «По культури», «По торг. групі», «По оргструктурі», «По ном. групі», а також вибір періоду «Рік/Місяць внесення».

Права частина таблиці містить числові та вартісні показники, представлені у стовпчиках, серед яких:

- «Площа посіву, га» – загальна площа земельних ділянок, на яких використовують даний ресурс;
- «Площа внесення, га» – фактична площа внесення конкретного виду добрив;
- «Кількість, кг» або інша одиниця виміру – обсяг ресурсу, використаного для внесення;

«Ціна $/од» – вартість однієї одиниці ресурсу;

- «Витрати, $/га» – розрахункові витрати на одиницю площі;
- «Загальна вартість, $» – сукупна вартість витрат на певний ресурс.

Зображення ілюструє аналітичну звітну таблицю агровиробничої системи, На рисунку Б.8 (додаток Б) представлено аналітичну звітну таблицю агровиробничої інформаційної системи, яка забезпечує моніторинг використання різних видів добрив залежно від сільськогосподарських культур, класифікаційних груп, регіонального розподілу або організаційної структури. У структурі таблиці передбачено відображення площ внесення, обсягів використаних ресурсів та пов’язаних із цим витрат. Такий інтерфейс забезпечує зручні засоби для комплексного аналізу та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері аграрного виробництва.

Рисунок Б.9 (додаток Б) ілюструє ієрархічну таблицю, що структуровано за ознаками культур, географічних або організаційних підрозділів, а також окремих виробничих одиниць. Таблиця реалізує ієрархічний підхід до подання даних, де верхній рівень містить агреговану інформацію, а нижчі рівні — деталізовані аналітичні показники, що дозволяє ефективно аналізувати інформацію на різних рівнях деталізації.

На рисунку Б.10 (додаток Б) відображено представлення, що складається з п’яти таблиць, кожна з яких містить повний набір аналітичних показників до їх обробки в інших підсистемах. Зокрема, таблиця «Хім елементи» містить інформацію про обсяги використання окремих хімічних елементів у межах відповідних посівних площ.

Рисунок Б.11 (додаток Б) демонструє таблицю «Орг структура», у якій

відображено агроекономічні показники: кожен рядок відповідає конкретній земельній ділянці, культурі або часовому періоду, а стовпці — різним категоріям витрат і доходів, що виникають у межах виробничої діяльності.

На рисунку Б.12(додаток Б) наведено таблицю «Номенклатура», яка містить перелік використаних ресурсів (у тому числі засобів захисту рослин, добрив, матеріалів для обробки полів тощо) разом із відповідною довідковою інформацією. Таблиця може застосовуватись як інструмент планування й оцінки витрат на агротехнологічні операції.

Рисунок Б.13 (додаток Б) ілюструє таблицю «Вартість палива», у якій подано витрати на паливно-мастильні матеріали та оплату праці, що супроводжують виконання технологічних операцій у сільському господарстві.

На рисунку Б.14 (додаток Б) представлено таблицю «Технологія помісячно», що містить інформацію про проведення посівних робіт з деталізацією за місяцями початку відповідних агротехнологічних процесів.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дисертаційної роботи виконано розробку та впровадження інформаційної системи доставки товарів у мережевих логістичних системах.

Проведено детальне моделювання процесів доставки з урахуванням варіабельності ключових логістичних параметрів, що дозволило обґрунтувати вимоги до архітектури інформаційної системи та визначити її функціональні компоненти.

На основі результатів аналізу транспортно-розподільчих систем запропоновано модель програмного застосунку «LAP», який орієнтований на автоматизацію задач розміщення та оптимального розподілу ресурсів у мережевих логістичних мережах.

Розроблена структура програмного забезпечення включає модулі введення

вихідних даних, модуль розміщення центрів акумуляції ресурсів, модуль розрахунку оптимального розподілу та модуль формування рекомендацій з оперативно-виробничого планування.

Особливу увагу приділено автоматизації процесів введення даних, які включають обсяги виробництва, попит споживачів, характеристики транспортних засобів, тарифи на перевезення та параметри центрів накопичення ресурсів. Запропонована система забезпечує не лише введення даних, а й перевірку їх коректності, узгодження із загальними обмеженнями задачі та адаптацію до змінних умов ринку.

Для забезпечення надійної обробки даних реалізовано багаторівневу архітектуру баз даних з можливістю масштабування та хмарного зберігання інформації.

Використання технологій багатовимірної обробки даних (OLAP) і паралельної обробки дозволяє оперативно здійснювати розрахунок рішень у задачах великої розмірності та здійснювати аналітичну обробку інформаційних потоків у реальному часі.

Важливим результатом роботи є впровадження механізмів безперервної інтеграції та доставки (CI/CD), що забезпечує автоматизацію процесів складання, тестування, деплойменту та оновлення програмного забезпечення. Запропонована модель розгортання включає контейнеризацію застосунків за допомогою технологій Docker і Kubernetes, що забезпечує високу масштабованість, надійність і гнучкість у змінних умовах експлуатації.

Реалізовано інтеграцію модулів бази знань, що акумулюють експертну інформацію для підвищення точності моделювання вихідних умов та оптимізації процесу ухвалення рішень у транспортно-розподільчих системах. Особлива увага приділяється інтерпретації результатів для кінцевого користувача: розроблено механізми перетворення числових параметрів у зрозумілі управлінські звіти, що суттєво полегшує застосування системи у практичній діяльності.

Сформовано методичні підходи до використання Data Mining для аналізу великих масивів даних, що дозволяє виявляти приховані залежності між

параметрами логістичної мережі, прогнозувати зміну попиту та оперативно коригувати розподільчу політику компанії.

Оцінка ефективності роботи розробленої інформаційної системи проведена на основі аналізу варіаційних сценаріїв побудови транспортно-розподільчих мереж, що дозволило підтвердити переваги розробленого рішення над існуючими ERP/SCM-інструментами за критеріями адаптивності, обчислювальної ефективності та якості прийнятих рішень.

Запропонована модель автоматизації задач розподілу ресурсів є універсальною, масштабованою та придатною для застосування в умовах динамічно змінного ринкового середовища, що дозволяє підприємствам оперативно адаптуватися до змін зовнішніх факторів і підвищувати ефективність логістичних процесів.

Таким чином, розроблена та впроваджена інформаційна система доставки товарів забезпечує комплексну підтримку всіх етапів оперативного, тактичного та стратегічного планування у мережевих логістичних системах, сприяючи підвищенню конкурентоспроможності підприємств і розвитку цифрових технологій у сфері логістики.

ВИСНОВКИ

У даній дисертаційній роботі розроблено методи та моделі для визначення зон раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів і розв'язання багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу з подальшою реалізацією в інформаційних системах. Комп’ютерна реалізація запропонованих рішень забезпечує інформаційно-аналітичну підтримку логістичних процесів у мережевих системах та підвищує їхню ефективність і адаптивність.

Відповідно до поставлених завдань отримано такі результати:

1. У результаті аналізу існуючих методів визначення зон розташування центрів акумуляції ресурсів, методів розв’язання багатоіндексних задач транспортного типу та наближених методів розподілу ресурсів було виявлено обмеження традиційних підходів щодо врахування просторових параметрів, попиту та пропускної спроможності, що знижує ефективність логістичних рішень у мережевих системах.
2. На основі результатів аналізу удосконалено модель вирішення багатоіндексної задачі транспортного типу шляхом інтеграції етапу оптимізації розміщення центрів акумуляції ресурсів. Запропонована модель дозволяє враховувати просторові характеристики, обсяг попиту та обмеження пропускної спроможності, що забезпечило зниження витрат на транспортування ресурсів на 11% у порівнянні з існуючими методами.
3. Розроблено метод визначення зони раціонального розташування центрів акумуляції ресурсів, спрямований на забезпечення адаптивності та ефективності логістичної мережі, із подальшою інтеграцією в інформаційні системи управління ресурсами. Врахування динамічних параметрів (змін попиту, пропускної спроможності) забезпечує гнучке коригування планів у реальному часі, що є критичним для оптимізації великих мережевих систем.
4. Розроблено метод вирішення багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, орієнтований на програмну реалізацію в реальному часі або

близькому до нього. Реалізація паралельного декомпозиційного підходу дала змогу прискорити обчислення у 2,5 рази при розмірності задачі 10^3 порівняно з класичними послідовними алгоритмами, що значно підвищує ефективність оперативного планування в корпоративних логістичних системах.

5. Створено алгоритм вирішення багатоіндексних розподільчих задач транспортного типу у вигляді модуля інформаційної системи. Модифікований метод нуль-перетворень із п'ятиіндексною постановкою забезпечує скорочення середнього часу розрахунку на 50% при розмірності задачі 10^3 у порівнянні з методом потенціалів, що дозволяє значно зменшити витрати обчислювальних ресурсів і пришвидшити прийняття рішень.

6. Розроблено комп'ютерні програми, що реалізують описані методи та алгоритми і забезпечують інформаційно-аналітичну підтримку логістичних процесів у мережевих системах. Створені програмні модулі дозволяють отримувати результати розрахунків у прийнятний часовий проміжок (до секунд при розмірності задачі 10^3), автоматизувати управління матеріальними потоками та скоротити трудовитрати на планування. Це забезпечує високу практичну значимість запропонованих рішень для сфери логістики, транспорту та управління ресурсами.

Результати дослідження були впроваджені на підприємстві: ПрАТ «МХП» (Київська обл., Обухівський р-н, село Хотів).

Основні перспективи подальших розробок вбачаються у:

– Застосування нечіткої логіки (fuzzy logic) для моделювання невизначеностей, пов'язаних із попитом, транспортними обмеженнями та пропускною спроможністю. Це дозволить формувати діапазони рішень замість фіксованих значень, що забезпечить більшу адаптивність і гнучкість моделей у нестабільному середовищі.

– Розробка моделей у формі задач нелінійного програмування, які дозволяють точніше відображати реальні залежності між витратами, попитом і можливостями логістичної мережі, зокрема з урахуванням ефектів масштабу, втрат або затримок.

– Розширення математичних постановок до багатокритеріальних задач

оптимізації, де одночасно враховуються економічні (витрати), часові (терміни), ризик-орієнтовані та екологічні показники, що дасть змогу приймати більш збалансовані управлінські рішення.

Таким чином, проведені дослідження та здобуті результати демонструють ефективність і універсальність застосованих багатоіндексних методів та алгоритмів у розподільчих задачах транспортного типу. Розроблені математичні моделі й програмні рішення можуть бути інтегровані в сучасні інформаційні системи управління ресурсами та логістикою, забезпечуючи зменшення загальних логістичних витрат і зростання конкурентоспроможності підприємств у динамічному ринковому середовищі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ І ДЖЕРЕЛ

1. Bowersox D.J., Closs D.J. Logistical management: the integrated supply chain process / ed. by C.D.J. – New York: McGraw-Hill Companies, 1996 – 730 с.
2. Christopher M. Logistics and supply chain management. – 6th ed. – London: Pearson Education, Limited, 2022 – 376 с.
3. Прокудін Г.С. Моделі та методи оптимізації вантажних перевезень в транспортних системах: дис. д-ра техн. наук: 05.22.01 / Г.С. Прокудін. – Київ: 2009 – 299 с.
4. Данчук В.Д., Сватко В.В., Рудоман Н.В. Динамічна маршрутизація процесів доставки вантажів у містах на базі синергетичного підходу // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». – 2022. – Вип. 1 (51). – С. 159–171.
5. Lambert D.M., Stock J.R. Strategic logistics management. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill Publishing Co., 2001 – 872 с.
6. Yakymyshyn L. Substantiation of the conditions for the emergence of a synergistic effect in the supply chain of special dimensions' consumer goods // Marketing and Management of Innovations. – 2017. – № 2. – P. 109–120. – DOI: 10.21272/mmi.2017.2-10.
7. Постан М.Я., Куруджи Ю.В. Моделювання ланцюга поставок з урахуванням інноваційної та маркетингової активності виробничих підприємств // Економічний вісник НТУУ «КПІ». – 2022. – № 20. – DOI: 10.20535/2307-5651.20.2021.252852.
8. Bučková M., et al. Designing of logistics systems with using of computer simulation and emulation // Transportation Research Procedia. – 2019. – Vol. 40. – P. 978–985. – DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.137.
9. Global supply chain quality management / ed. by B.B. Flynn, X. Zhao. – Boca Raton: CRC Press, 2014 – DOI: 10.1201/b17687.
10. Чернова Л.С. Когнітивні механізми управління програмами підготовки

фахівців в умовах невизначеності: дис. … д-ра техн. наук: 05.13.22 / Л.С. Чернова. – Миколаїв: 2023 – 394 с.

11. Тюріна Н.М. Логістика: навч. посіб. / Н.М. Тюріна. – Київ: Центр учб. літ., 2021 – 392 с.

12. Basirzadeh H. Ones assignment method for solving traveling salesman problem // Journal of Mathematics and Computer Science. – 2014. – Vol. 10, No. 4. – P. 258–265. – DOI: 10.22436/jmcs.010.04.04.

13. Motzkin T.S., Taussky O. Pairs of matrices with property // Transactions of the American Mathematical Society. – 1952. – Vol. 73, No. 1. – P. 108. – DOI: 10.1090/S0002-9947-1952-0049855-8.

14. Two-Stage Transportation Problem with Two-Sided Constraints on Consumer Demands and Upper Bounds for Capacity of Intermediate Points // Cybernetics and Systems Analysis. – 2024. – Vol. 60, No. 6. – P. 919–929. – DOI: 10.1007/s10559-024-00729-9.

15. Optimization in Multimodal Freight Transportation Problems: A Survey // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 299, No. 3. – P. 1–20. – DOI: 10.1016/j.ejor.2022.05.016.

16. Schrijver A. Combinatorial optimization: polyhedra and efficiency / A. Schrijver. – Berlin: Springer, 2003 – 1881 c.

17. Tripathi S.K., Kumar R. Recent Trends and Applications of Linear Programming in Network Flow: A Comprehensive Survey // Optimality. – 2024. – Vol. 1, No. 1. – P. 140–146. – DOI: 10.54216/IJNS.250107.

18. Villani C. Topics in optimal transportation / C. Villani. – Providence: American Mathematical Society, 2003 – 370 c.

19. Rachev S., Rüschendorf L. Mass transportation problems / S. Rachev, L. Rüschendorf. – New York: Springer-Verlag, 1998 – 513 c. – DOI: 10.1007/B98893.

20. Wang Y., Zhang H., Yuan C., Li X., Jiang Z. A Network Flow Approach to Optimal Scheduling in Supply Chain Logistics // arXiv preprint arXiv:2411.17544. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2411.17544.

21. Osorio C., Chong L. A computationally efficient simulation-based optimization

algorithm for large-scale urban transportation problems // Transportation Science. – 2015. – Vol. 49, No. 3. – P. 623–636. – DOI: 10.1287/trsc.2014.0535.

22. Speranza M.G., Archetti C., Peirano L. Optimization in multimodal freight transportation problems: A survey // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 299, No. 3. – P. 1–20. – DOI: 10.1016/j.ejor.2022.05.016.

23. Khmelov I., Halona I., Danylenko I. Analysis method of transport operations' energy efficiency // The National Transport University Bulletin. – 2023. – Vol. 1, No. 55. – P. 287–294. – DOI: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-287-294.

24. Moroz M., et al. The using of operations research methods to optimize freight road transportation in the agroindustrial complex // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies. – 2022. – No. 1(11). – P. 44–50. – DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.01.07..

25. Khmelov I., Halona I., Danylenko I. Analysis method of transport operations' energy efficiency // The National Transport University Bulletin. – 2023. – Vol. 1, No. 55. – P. 287–294. – DOI: https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-287-294.

26. Прохорова О.М., Кальчук Н.В. Моделі і методи нечіткої логіки: навч. посіб. / О.М. Прохорова, Н.В. Кальчук. – Харків: ХАІ, 2021 – 166 с.

27. Кирик В.В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник / В.В. Кирик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019 – 226 с.

28. Матвійчук А.В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка: монографія / А.В. Матвійчук. – Київ: КНЕУ, 2011 – 439 с.

29. Матвійчук А.В. Моделювання економічних процесів із застосуванням методів нечіткої логіки: монографія / А.В. Матвійчук. – Київ: КНЕУ, 2007 – 264 с.

30. Halley K.B. The existence of a solution to the multi-index problem // Operational Research Quarterly. – 1965. – Vol. 16, No. 4. – P. 71–81.

31. Івахів О.В., Наконечний М. Основи побудови систем керування з нечіткою логікою: навч. посіб. – Львів: Растр-7, 2017 – 129 с.

32. Asieieva L.A., Shushura O.M. Assessment of confidentiality risks of information security of projects based on fuzzy logic // Telecommunication and Information

Technologies. – 2021. – Vol. 70, No. 1. – DOI: 10.31673/2412-4338.2021.0108895.

33. Yager R.R. Multiple objective decision-making using fuzzy sets // International Journal of Man-Machine Studies. – 1977. – Vol. 9, No. 4. – P. 375–382. – DOI: 10.1016/S0020-7373(77)80008-4.

34. Lebid I.H. Transport innovations as a factor affecting the modernization of transport technology bachelor's training at Ukrainian universities // Proceedings of the National Aviation University. Series: Pedagogy, Psychology. – 2020. – No. 16. – P. 1–6. – DOI: https://doi.org/10.18372/2411-264x.16.14682.

35. Lebid I., et al. Construction of a simulation model of goods delivery in international road transportation taking into account the functioning efficiency of logistics supply chain // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 3, No. 3(123). – P. 57–67. – DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280886..

36. Lebid I., et al. Selecting a transport and forwarding company for meeting a customer’s needs when organizing international road cargo transportation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 3, No. 3(129). – P. 55–66. – DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305238.

37. Lebid I.M., et al. The development of a methodology for determining the optimal customs brokerage enterprise for organizing international road cargo transportation // Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. – 2024. – Vol. 2, No. 3. – P. 183–189. – DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/28.

38. Lebid I., et al. Development of a simulation model of the activities of a transport and forwarding enterprise in the organization of international road cargo transportation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – Vol. 6, No. 3(126). – P. 6–17. – DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291039.

39. Боденчук О.В. Теоретичні аспекти логістичної діяльності підприємства // Управління розвитком. – 2014. – № 8. – С. 130–132.

40. Канадська асоціація управління логістикою [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.calm.org/calm/AboutCALM/AboutCALM.html.

41. Глібчук В.В., Глібчук І.В. Розв'язання транспортної задачі з проміжними пунктами у MS Excel Solver // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Т. 22, № 9. – С. 306–311.

42. Іксанов О.М., Шевченко В.І. Транспортна задача, її властивості та методи розв'язування (курс «Дослідження операцій»): навч. посіб. – Київ: ТВіМС, 2010 – 84 с.

43. Булат А.Ф., Кісельова О.М., Ляшенко Л.Л. Оптимізація логістичних транспортних задач в умовах невизначеності // Питання прикладної математики і математичного моделювання. – 2021. – № 22. – С. 13–22.

44. Меньшикова О.В., Чмир О.Ю., Карабин О.О. Дослідження операцій: навч. посіб. – Львів: ЛДУ, 2019 – 196 с.

45. Шебаніна О.В., Домаскіна М., Хилько І.І., та ін. Дослідження операцій: курс лекцій. – Миколаїв: МНАУ, 2015 – 248 с.

46. Bernard P., Buffoni B. Optimal mass transportation and Mather theory // Journal of the European Mathematical Society. – 2007. – P. 85–121. – DOI: 10.4171/JEMS/74.

47. Causey B.D., Cox L.H., Ernst L.R. Applications of transportation theory to statistical problems // Journal of the American Statistical Association. – 1985. – Vol. 80, No. 392. – P. 903–909. – DOI: 10.1080/01621459.1985.10478201.

48. Farrer T.C., Cooley C.H. The theory of transportation // The Economic Journal. – 1895. – Vol. 5, No. 17. – P. 74. – DOI: 10.2307/2956230.

49. Kikuchi S., Chakroborty P. Place of possibility theory in transportation analysis // Transportation Research Part B: Methodological. – 2006. – Vol. 40, No. 8. – P. 595–615. – DOI: 10.1016/j.trb.2005.09.001.

50. Villani C. Topics in optimal transportation / C. Villani. – Providence: American Mathematical Society, 2003 – 370 c. – ISBN: 978-0-8218-3312-4.

51. Peyré G., Cuturi M. Computational optimal transport: with applications to data science // Foundations and Trends® in Machine Learning. – 2019. – Vol. 11, No. 5–6. – P. 355–607. – DOI: 10.1561/2200000073.

52. Fedotova I. Forming the multilevel model of logistic system // Economics of the Transport Complex. – 2019. – № 33. – P. 5. – DOI: 10.30977/etk.2225-2304.2019.33.0.5.

53. Безугла Л.С., Юрченко Н.І., Ільченко Т.В., Пальчик І.М., Воловик Д.В. Логістика: навч. посіб. – Дніпро: Пороги, 2021 – 252 с.

54. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об’єктів: основи системного підходу та системного аналізу об’єктів нової техніки: навч. посіб. для студ. внз за напрямом «Комп’ютерні науки». – Київ: Либідь, 2004 – 288 с.

55. Кислий В.М., Біловодська О.А., Олефіренко О.М., Соляник О.М. Логістика: теорія та практика: навч. посіб. – Київ: Центр учбової літератури, 2010 – 360 с. – ISBN 978-611-01-0046-5.

56. Окландер М.А. Логістика: підручник. – Київ: Центр учбової літератури, 2008 – 346 с.

57. Jagtap K., Kawale S. Multi Dimensional Multi Objective Transportation Problem by Goal Programming // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2017. – Vol. 8.

58. Бутов А.М. Перспективи використання логістичних стратегій для забезпечення конкурентоспроможності підприємства // Економічний аналіз. – 2013. – № 2. – С. 124–131.

59. Kiel T., Nozick L.K. Developing a standard definition of intermodal transportation // Journal of Business Logistics. – 2012. – Vol. 33, No. 1. – P. 71–87.

60. Бондар Н.М. Перспективи використання заходів державно-приватного партнерства для забезпечення конкурентоспроможності сфери послуг // Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка. – 2023. – № 16. – С. 62–69. – DOI: 10.32782/2708-0366/2023.16.8.

61. Шишкін В.О., Бахметова Я.Ю. The perspectives of the logistics strategy use as the condition of enterprise’s competitive ability providing // Modern Economics. – 2019. – Vol. 14, No. 1. – P. 296–300. – DOI: 10.31521/modecon.v14(2019)-46.

62. Ghiani G., Laporte G., Musmanno R. Introduction to Logistics Systems Planning and Control / G. Ghiani, G. Laporte, R. Musmanno. – Wiley, 2004 – 367 c.

63. Пономарьова Ю.В. Логістика: навч. посіб. – Київ: Центр навчальної літератури, 2003 – 192 с.

64. Gudehus T., Kotzab H. Comprehensive Logistics / T. Gudehus, H. Kotzab. – Springer, 2012 – 933 с.

65. Brandimarte P., Zotteri G. Introduction to Distribution Logistics / P. Brandimarte, G. Zotteri. – Wiley, 2007 – 587 с.

66. Bowersox J.C.D., Closs D.J. Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process. – McGraw-Hill, 1996 – 752 с.

67. Ghiani G., Laporte G., Musmanno R. Introduction to Logistics Systems Planning and Control / G. Ghiani, G. Laporte, R. Musmanno. – Wiley, 2004 – 367 с.

68. Wardlow D.L., Wood D.F., Johnson J., Murphy P. Modern logistics / D.L. Wardlow, D.F. Wood, J. Johnson, P. Murphy. – Williams, 2002 – 624 с.

69. Huang Y.-H., Wu J.-H., Hsu Y.-J. Two-stage stochastic programming model for the regional-scale electricity planning under demand uncertainty // Energy. – 2016. – Vol. 116. – P. 1145–1157. – DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.112.

70. Hu W., Dong J., Xu N. Multi-period planning of integrated underground logistics system network for automated construction-demolition-municipal waste collection and parcel delivery: a case study // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 330. – Article ID 129760. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129760.

71. Liao S.-H., Hsieh C.-L., Lai P.-J. An evolutionary approach for multi-objective optimization of the integrated location–inventory distribution network problem in vendor-managed inventory // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38, No. 6. – P. 6768–6776. – DOI: 10.1016/j.eswa.2010.12.072.

72. Liao S.-H., Hsieh C.-L., Lin Y.-S. A multi-objective evolutionary optimization approach for an integrated location-inventory distribution network problem under vendor-managed inventory systems // Annals of Operations Research. – 2010. – Vol. 186, No. 1. – P. 213–229. – DOI: 10.1007/s10479-010-0801-3.

73. Mittal R., Obaid A. Sustainable warehouse location selection in humanitarian supply chain: multi-criteria decision-making approach // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 316–335. – DOI: 10.33889/ijmems.2023.8.2.019.

74. Rahimi M., Ghezavati V. Sustainable multi-period reverse logistics network

design and planning under uncertainty utilizing conditional value at risk (CVaR) for recycling construction and demolition waste // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 172. – P. 1567–1581. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.240.

75. Singh A.R., Jain R., Mishra P.K. Capacities-based supply chain network design considering demand uncertainty using two-stage stochastic programming // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 69, No. 1–4. – P. 555–562. – DOI: 10.1007/s00170-013-5054-2.

76. Soni P.K. Integrated multi-criteria decision-making methods for selection of supply chain partner for supply chain management // International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. – 2021. – Vol. 9, No. VII. – P. 952–957. – DOI: 10.22214/ijraset.2021.36510.

77. Пилипенко С.І. Логістика: теорія і практика: монографія / С.І. Пилипенко. – Харків: Фоліо, 2007 – 450 с.

78. Сікора Я.Б. Методи оптимізації: навч.-метод. посіб. для студентів напряму 6.040302 «Інформатика». – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2012 – 82 с.

79. Wang K.-J., Lee C.H. A revised ant algorithm for solving location–allocation problem with risky demand in a multi-echelon supply chain network // Applied Soft Computing. – 2015. – Vol. 32. – P. 311–321. – DOI: 10.1016/j.asoc.2015.03.046.

80. Dunska A.R., Khomych O.V. The transport-logistic clusters as a direction of development of the foreign economic activity of Ukraine // Business Inform. – 2019. – Vol. 4, No. 495. – P. 55–59. – DOI: 10.32983/2222-4459-2019-4-55-59.

81. Корнійко Я. Кластеризація в управлінні глобальними ланцюгами постачання // Development Service Industry Management. – 2023. – № 4. – С. 118–123. – DOI: 10.31891/dsim-2023-4(19).

82. Гриценко С. Стратегія випереджального розвитку транспортно-логістичних кластерів в Україні // Маркетинг в Україні. – 2007. – № 2. – С. 56–60.

83. Дикань В.Л., Корінь М.В. Розвиток високошвидкісного руху в Україні на основі формування виробничо-логістичних кластерів // Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport. – 2015. – № 154. – DOI: 10.18664/1994-7852.154.2015.65929.

84. Луценко І.С. Євроінтеграція як чинник розвитку транспортно-логістичних кластерів в Україні // Підприємництво та інновації. – 2021. – № 16. – С. 67–70. – DOI: 10.37320/2415-3583/16.11.

85. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. – 1967. – P. 281–297.

86. Kostiuchenko L. The methodology of enterprise logistic activity strategic analyse // Efektyvna Ekonomika. – 2020. – No. 5. – DOI: 10.32702/2307-2105-2020.5.56.

87. Ваховська М.Ю. Особливості оптимального розміщення регіонального логістичного центра в Криму // Вісник ЛНУ. – 2007. – С. 376–383. – URL: https://vlp.com.ua/files/57.pdf.

88. Ваховська М.Ю. Логістичні потоки: визначення, особливості, параметри // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2008. – № 623. – С. 22–28.

89. Cooper G.F. The computational complexity of probabilistic inference using Bayesian belief networks // Artificial Intelligence. – 1990. – Vol. 42, No. 2–3. – P. 393–405.

90. Єгупов Ю.А. Організація виробництва на промисловому підприємстві: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. – Київ: Центр навч. літ., 2006 – 488 с.

91. Rato T.J., Delgado P., Martins C. First principles statistical process monitoring of high-dimensional industrial microelectronics assembly processes // Processes. – 2020. – Vol. 8, No. 11. – Article ID 1520. – DOI: 10.3390/pr8111520.

92. Бурбело М.Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем: навч. посібник / М.Й. Бурбело. – Вінниця: ВНТУ, 2016 – 185 с.

93. Коряшкіна Л., Лубенець Д. Математичні моделі та методи мультиплексного розбиття і багатократного покриття множин для задач розміщення-розподілу // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. – 2023. – № 4. – С. 20–31. – DOI: 10.32782/it/2023-4-3.

94. Математичні моделі двоетапних задач оптимального розміщення-розбиття

в умовах невизначеності / А.Ф. Булат та ін. // Problems of Applied Mathematics and Mathematic Modeling. – 2023. – DOI: 10.15421/322202.

95. Математичні моделі оптимізаційних задач частково-двоетапної евакуації населення із зонуванням регіону / С. Дзюба та ін. // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. – 2023. – № 3. – С. 13–21. – DOI: 10.32782/it/2023-3-2.

96. Katsman M., Matsyuk V., Lapin P. Математичні моделі раціоналізації процесів організації ліквідації наслідків залізничних транспортних подій // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2022. – Т. 2, № 68. – С. 102–110. – DOI: 10.26906/sunz.2022.2.102.

97. Rusanov S.A., Omelchuk A.A., Fedorchuk D.D. Mathematical models and software products for solving the problem of cinematics and analysis of strategies of processing // Applied Questions of Mathematical Modeling. – 2018. – Vol. 2. – P. 146–160. – DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-146-160.

98. Вибрані питання комп'ютерного моделювання процесів і явищ: за ред. Н.Р. Балик. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2022 – 272 с.

99. Akhiezer O., Dunaevskaya O., Serdyuk I. Методи вирішення багатоіндексних транспортних задач великої розмірності // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – 2018. – Т. 4, № 50. – С. 57–61. – DOI: 10.26906/sunz.2018.4.057.

100. Гліненко Л.К., Яковенко Є.І. Розв'язання транспортної задачі з проміжними пунктами за допомогою надбудови Solver MS Excel // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – № 22(9). – С. 306–312. – URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2012/22_9/306_Gli.pdf.

101. Горяїнов О.М. Транспортні технології і логістика. Книга 1. Теорія і практика дисципліни «Вантажні перевезення» (для транспортних технологів) / О.М. Горяїнов. – Харків: ХНАДУ, 2013 – 275 с.

102. Гуторов О.І., Лебединська О.І., Прозорова Н.В. Логістика: навч. посіб. / О.І. Гуторов, О.І. Лебединська, Н.В. Прозорова. – Запоріжжя: ЗНУ, 2020 – 215 с.

103. Гордон М.П. Логістика: підручник / М.П. Гордон. – Київ: КНЕУ, 2015 – 328

с.

104. Basirzadeh H. Ones assignment method for solving traveling salesman problem // Journal of Mathematics and Computer Science. – 2014. – Vol. 10, No 4. – P. 258–265. – DOI: 10.22436/jmcs.010.04.04.

105. Івохін Є.В. Підхід для розв'язку транспортної задачі з нечіткими ресурсами // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія «Кібернетика». – 2014. – Вип. 1 (14). – С. 16–21. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_fiz_mat_2013_1_31.

106. Скіцько В., Войніков М.Ю. Вирішення трьохіндексної транспортної задачі в умовах ризику з використанням генетичного алгоритму // Проблеми економіки. – 2018. – Т. 3, № 37. – С. 246–252. – URL: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2018-3_0-pages-246_252.pdf.

107. Models and Methods for Interval-Valued Cooperative Games in Economic Management. – Berlin: Springer, 2016 – 136 с.

108. Crainic T.G., Perboli G., Tadei R. TS2PACK: a two-level tabu search for the three-dimensional bin packing problem // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 195, No 3. – P. 744–760. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.063.

109. Shang X., et al. Heuristic algorithms for the bi-objective hierarchical multimodal hub location problem in cargo delivery systems // Applied Mathematical Modelling. – 2021. – Vol. 91. – P. 412–437. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.057.

110. Yaman H., Kara B.Y., Tansel B.Ç. The latest arrival hub location problem for cargo delivery systems with stopovers // Transportation Research Part B: Methodological. – 2007. – Vol. 41, No 8. – P. 906–919. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.03.003.

111. Gendreau M., Laporte G., Séguin R. Stochastic vehicle routing // European Journal of Operational Research. – 1996. – Vol. 88, No 1. – P. 3–12. – DOI: https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00050-X.

112. Causey B.D., Cox L.H., Ernst L.R. Applications of transportation theory to statistical problems // Journal of the American Statistical Association. – 1985. – Vol. 80, No 392. – P. 903–909. – DOI: https://doi.org/10.1080/01621459.1985.10478201.

113. Covic G.A., Boys J.T. Modern trends in inductive power transfer for transportation applications // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2013. – Vol. 1, No 1. – P. 28–41. – DOI: https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2264473.

114. Junginger W. On representatives of multi-index transportation problems // European Journal of Operational Research. – 1993. – Vol. 66, No 3. – P. 353–371. – DOI: 10.1016/0377-2217(93)90223-A.

115. Vivek Joshi M.R. Optimization techniques for transportation problems of three variables // IOSR Journal of Mathematics. – 2013. – Vol. 9, No 1. – P. 46–50. – DOI: https://doi.org/10.9790/5728-0914650.

116. Haley K.B. The existence of a solution to the multi-index problem // Operational Research. – 1965. – Vol. 16, No 4. – P. 471. – DOI: https://doi.org/10.2307/3006713.

117. Bhatia H.L. Indefinite quadratic solid transportation problem // Journal of Information and Optimization Sciences. – 1981. – Vol. 2, No 3. – P. 297–303. – DOI: https://doi.org/10.1080/02522667.1981.10698711.

118. Akimov D. Application of the decomposition method for solving the five-index transportation problem in logistic systems // Modern Engineering and Innovative Technologies. – 2025. – Vol. 37.

119. Akimov D. Analysis of approaches to modeling uncertainty in logistics information systems // Colloquium Journal. – 2025. – Vol. 235, No 1. – P. 5–8. – DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14956604.

120. Акімов Д.Д. Підвищення ефективності логістичної діяльності ПрАТ «Миронівський хлібопродукт» (МХП) / Д.Д. Акімов, В.В. Гавриленко // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2024. – К: НУХТ, 2024. – С.188.

121. Акімов Д.Д. Аналіз швидкодії гібридних алгоритмів у транспортних інформаційних системах // Наука і техніка. – 2025. – Т. 2, № 43. – С. 1055–1065. – DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-2(43).

122. Акімов Д.Д., Гавриленко В.В. Розв'язання транспортної задачі в умовах неоднорідності продукції агропромислових підприємств // Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. – 2024. – № 56. – С. 78–85. – DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-09.

123. Акімов Д.Д. Застосування технологій інтернету речей для оптимізації логістики в сільському господарстві // Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production. – 2023. – № 53. – С. 9–15. – DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-02.

124. Акімов Д.Д., et al. Щодо балансування навантаження в додатках з використанням інформаційної технології контейнеризації // Automobile Roads and Road Construction. – 2022. – № 112. – С. 227–231. – DOI: https://doi.org/10.33744/0365-8171-2022-112-227-231.

125. Акімов Д.Д., Гавриленко В.В. Математичні методи розв'язання задачі обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2021. – Київ: НУХТ, 2021 – С. 212.

126. Акімов Д.Д., Гавриленко В.В. Методи розв'язання задачі обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів // Збірник наукових праць за матеріалами VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 5 листопада 2021. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», 2021 – С. 20.

127. Гавриленко В.В., Акімов Д.Д. Дослідження та впровадження методів розв'язання задачі обробки замовлень в умовах розподілених логістичних центрів // Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – Київ: НТУ, 2022 – Вип. 78. – С. 345.

128. Акімов Д.Д., Гавриленко В.В., Мальцева К.І. Збір і вивантаження даних контурів полів в інформаційну систему CropWise, використовуючи методи API //

Стратегічні напрямки розвитку науки: фактори впливу та взаємодії, м. Харків, 10 травня 2024. – Харків, 2024 – С. 119–122.

129. Oracle. Transportation Management [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.oracle.com/scm/logistics/transportation-management/.

130. Microsoft. Supply Chain Management [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.microsoft.com/en-us/dynamics-365/products/supply-chain-management.

131. Manhattan. Unified Commerce and Supply Chain Leader [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.manh.com/.

132. SAP. SAP Extended Warehouse Management [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.sap.com/products/scm/extended-warehouse-management/features.html.

133. Infor. Infor WMS [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.infor.com/solutions/scm/infor-nexus.

134. CargoWise. Centralize global logistics operations on a single platform solution [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.cargowise.com/.

135. Blue Yonder. End-to-End Supply Chain Management Solutions [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://blueyonder.com/.

136. Раскін Л.Г., Сіра О.В., Парфенюк Ю.Л. Управління пропускними здатностями проміжних пунктів у розгалуженій транспортній мережі // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2021. – № 1 (15). – С. 141–149. – DOI: 10.30837/ITSSI.2021.15.141.

137. Ковальчук С.В., Семенов К.Л. Маркетинг-логістичне забезпечення у ланцюгах поставок товарів споживчого попиту // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Економічні науки». – 2017. – № 3(1). – С. 155–162.

138. Погорлецький Д.С. Компетентнісний підхід в системі морської освіти // Збірник тез доповідей 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування». – 2020. – С. 330.

ДОДАТКИ

Додаток А

Реалізація комп’ютерного розв’язку багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу, з використанням методу Данцига–Вулфа

```
import numpy as np
import time
from concurrent.futures import ProcessPoolExecutor

def generate_data(I=10, J=8, K=2, L=2, M=2, seed=42):
    """
    Генерує дані для п'ятиіндексної задачі:
    c[i,j,k,l,m] - витрати на перевезення;
    supply[i]    - потужність постачальника i;
    demand[j]    - попит споживача j;
    capacity_k[k] - пропускна спроможність центру акумуляції ресурсів k;
    capacity_l[l] - місткість транспортного засобу типу l;
    capacity_m[m] - доступна кількість ресурсу типу m (спрощено).
    """
    np.random.seed(seed)
    c = np.random.randint(5, 20, size=(I, J, K, L, M))
    supply = np.random.randint(50, 101, size=I)
    demand = np.random.randint(60, 120, size=J)
    capacity_k = np.random.randint(80, 150, size=K)
    capacity_l = np.random.randint(100, 200, size=L)
    capacity_m = np.random.randint(80, 120, size=M)
    return c, supply, demand, capacity_k, capacity_l, capacity_m

def solve_indexed_sequential(c, supply, demand, capacity_k, capacity_l,
capacity_m):
    """
    Спрощена послідовна версія "методу проіндексованих елементів".
    Задля демонстрації:
      - переводимо індекси (i,j,k,l,m) у "лінійні" індекси
      - формуємо псевдовипадковий початковий план
      - обчислюємо його вартість
    У реальному проекті тут має бути логіка нуль-перетворень.
    """
    I, J, K, L, M = c.shape
    # "Проіндексовані" комбінації (i,j,k,l,m)
    total_combos = I * J * K * L * M

    plan = np.random.randint(0, 10, size=(I,J,K,L,M))

    # Обчислюємо "витрати"
    total_cost = np.sum(plan * c)

    for iteration in range(5):
        i_rand = np.random.randint(I)
        j_rand = np.random.randint(J)
        k_rand = np.random.randint(K)
        l_rand = np.random.randint(L)
        m_rand = np.random.randint(M)

        old_val = plan[i_rand,j_rand,k_rand,l_rand,m_rand]
        new_val = max(0, old_val + np.random.randint(-2,3))

        cost_diff = (new_val - old_val)*c[i_rand,j_rand,k_rand,l_rand,m_rand]
        if total_cost + cost_diff < total_cost:
            plan[i_rand,j_rand,k_rand,l_rand,m_rand] = new_val
            total_cost += cost_diff
```

```
    return plan, total_cost

def solve_subproblem(data_pack):
    """
    Допоміжна функція для паралельної обробки одного "блоку" постачальників
    (або іншого набору індексів), аналог "методу проіндексованих елементів"
    із локальним підходом. Повертає локальний план та вартість.
    """
    c_sub, supply_sub, demand, cap_k, cap_l, cap_m, block_info = data_pack

    # Для демонстрації робимо те ж саме: псевдовипадковий план, "покращення"
    I_sub, J, K, L, M = c_sub.shape
    plan_sub = np.random.randint(0, 10, size=(I_sub,J,K,L,M))
    cost_sub = np.sum(plan_sub * c_sub)

    # Імітуємо кілька ітерацій покращення
    for iteration in range(3):
        i_rand = np.random.randint(I_sub)
        j_rand = np.random.randint(J)
        k_rand = np.random.randint(K)
        l_rand = np.random.randint(L)
        m_rand = np.random.randint(M)

        old_val = plan_sub[i_rand,j_rand,k_rand,l_rand,m_rand]
        new_val = max(0, old_val + np.random.randint(-2,3))

        diff = (new_val - old_val)*c_sub[i_rand,j_rand,k_rand,l_rand,m_rand]
        if cost_sub + diff < cost_sub:
            plan_sub[i_rand,j_rand,k_rand,l_rand,m_rand] = new_val
            cost_sub += diff

    return plan_sub, cost_sub, block_info

def solve_indexed_parallel(c, supply, demand, capacity_k, capacity_l, capacity_m,
num_procs=2):
    """
    Паралельна версія "методу проіндексованих елементів" на ідеї розбиття
постачальників
    на декілька блоків. Кожен блок обробляється окремим процесом, а результати
узгоджуються.
    """
    I, J, K, L, M = c.shape
    group_size = I // num_procs
    data_packs = []

    for g in range(num_procs):
        start_i = g * group_size
        end_i = (g+1)*group_size if g < num_procs - 1 else I

        c_sub = c[start_i:end_i, :, :, :, :]
        supply_sub = supply[start_i:end_i]

        block_info = (start_i, end_i)
        data_pack = (c_sub, supply_sub, demand, capacity_k, capacity_l,
capacity_m, block_info)
        data_packs.append(data_pack)

    global_plan = np.zeros_like(c, dtype=int)
    global_cost = 0

    with ProcessPoolExecutor(max_workers=num_procs) as executor:
        results = executor.map(solve_subproblem, data_packs)
        for plan_sub, cost_sub, block_info in results:
            (start_i, end_i) = block_info
```

```
            # Вписуємо план у глобальний
            global_plan[start_i:end_i, :, :, :, :] = plan_sub
            global_cost += cost_sub

    return global_plan, global_cost

def compare_methods(I=10, J=8, K=2, L=2, M=2, num_procs=4):
    """
    Генерує дані, запускає послідовний та паралельний варіанти,
    виводить час та отриманий (псевдо)результат (вартість).
    """
    print(f"Генеруємо задачу розмірності I={I}, J={J}, K={K}, L={L}, M={M}...")
    c, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m = generate_data(I, J, K, L, M)

    # Послідовний варіант
    start_seq = time.time()
    plan_seq, cost_seq = solve_indexed_sequential(c, supply, demand, cap_k, cap_l,
cap_m)
    time_seq = time.time() - start_seq

    # Паралельний варіант
    start_par = time.time()
    plan_par, cost_par = solve_indexed_parallel(c, supply, demand, cap_k, cap_l,
cap_m,
                                                num_procs=num_procs)
    time_par = time.time() - start_par

    print("====== РЕЗУЛЬТАТ ПОРІВНЯННЯ ======")
    print(f"Послідовний варіант: час = {time_seq:.4f} с, вартість = {cost_seq}")
    print(f"Паралельний варіант ({num_procs} процеси): час = {time_par:.4f} с,
вартість = {cost_par}")
    print("==================================")
```

Додаток Б

Зображення звітів витрат на різні сфери діяльності підприємства, що були реалізовані в PBI.

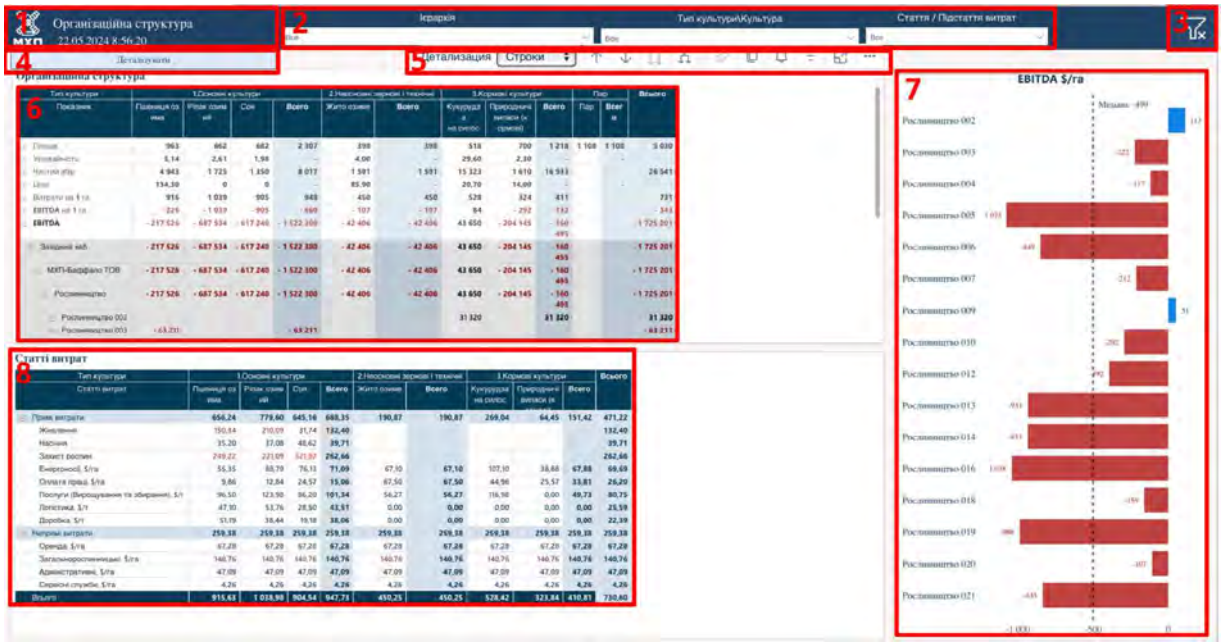


Рисунок Б.1 – Інтерфейс системи з аналізу верхньорівневих показників

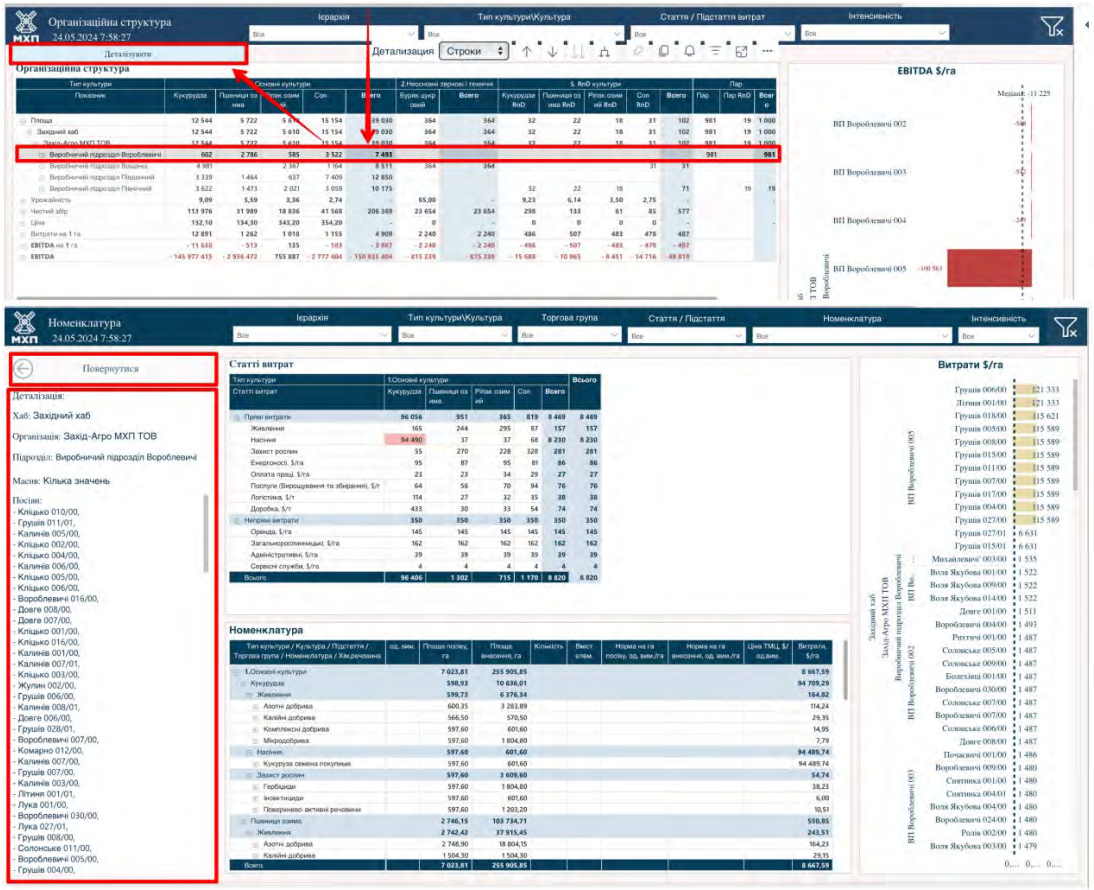


Рисунок Б.2 – Система деталізації даних сторінки "Номенклатура + Статті витрат"

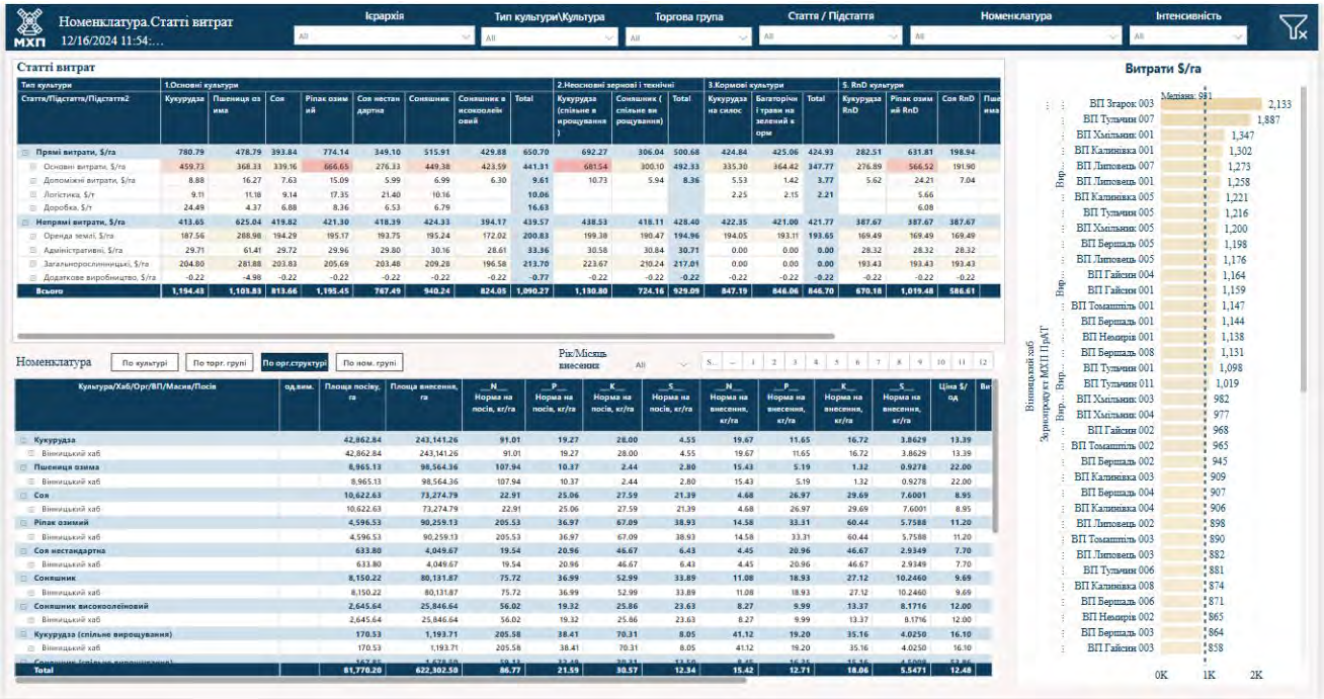


Рисунок Б.3 – Сторінка номенклатура + статті витрат

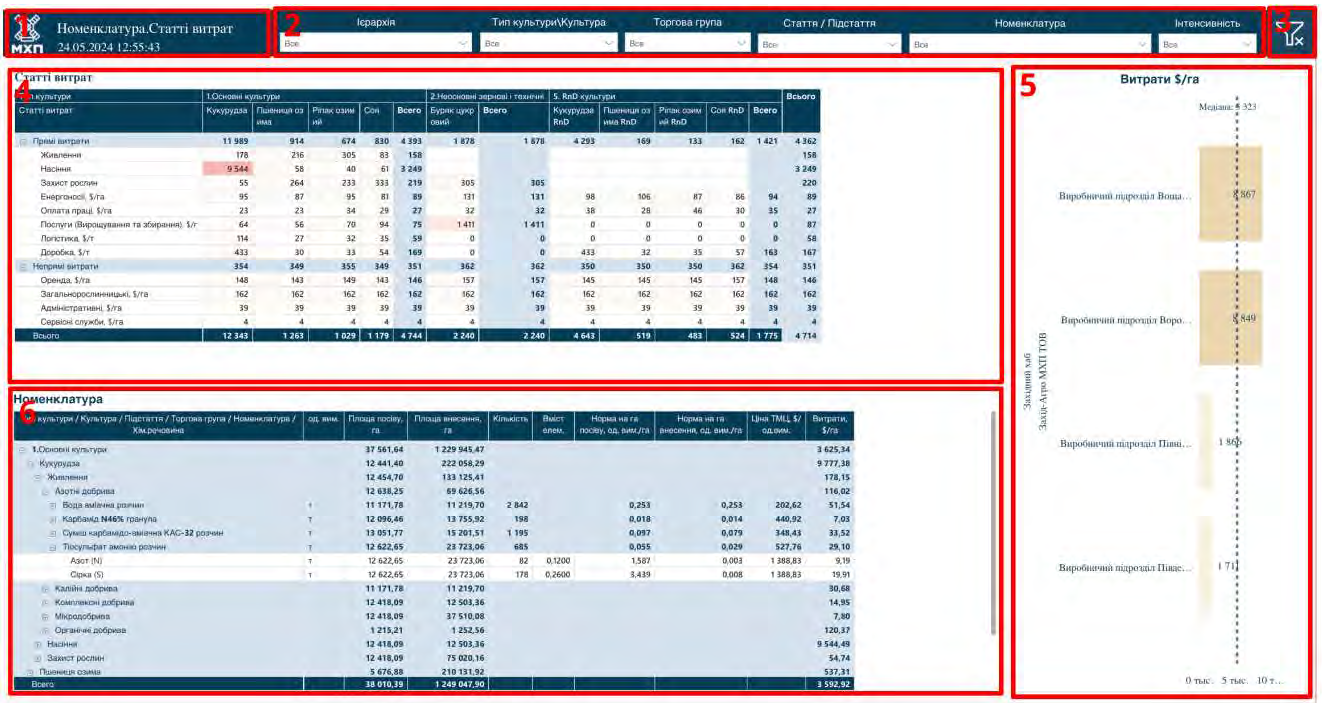


Рисунок Б.4 – Сторінка номенклатура + статті витрат з описом елементів

Тип культури / Культура / Підстаття / Торгова група / Номенклатура / Хім.речовина	од. вим.	Площа посіву, га	Площа внесення, га	Вміст елем.	Норма на га посіву, од. вим./га	Норма на га внесення, од. вим./га	Ціна ТМЦ, $/ од.вим.	Витрати, $/га
1.Основні культури		7 424,44	259 875,94					
Кукурудза		1 496,17	26 997,74					
Живлення		1 496,09	16 389,90					
Азотні добрива		1 495,94	8 583,60					
Вода аміачна розчин	т	1 496,30	1 496,30		0,245	0,252	202,62	
Азот (N)	т	1 496,30	1 496,30	0,2050	1,455	0,052	988,38	51,11
Карбамід N46% гранула	т	1 496,30	1 496,30		0,010	0,010	440,92	
Азот (N)	т	1 496,30	1 496,30	0,4600	0,133	0,005	958,52	4,41
Суміш карбамідо-аміачна КАС-32 розчин	т	1 494,10	1 751,70		0,092	0,079	348,43	
Тіосульфат амонію розчин	т	1 496,30	2 992,60		0,060	0,030	527,76	
Калійні добрива		1 496,30	1 496,30					
Комплексні добрива		1 496,30	1 496,30					
Мікродобрива		1 496,30	4 488,90					
Насіння		1 496,30	1 496,30					
Кукуруза семена покупные		1 496,30	1 496,30					
Насіння кукурудзи покупне ДКС 3730 F1	пос.од	1 240,90	1 240,90		1 025,000	1 025,000	112,04	
Насіння кукурудзи покупне П 8904 F1	пос.од	255,40	255,40		1,000	1,000	121,18	
Захист рослин		1 496,30	8 977,80					
Пшениця озима		1 581,08	58 724,44					
Ріпак озимий		75,87	4 027,72					
Соя		4 313,53	170 885,06					
5. RnD культури		29,70	1 276,64					
Всего		7 403,48	260 936,91					

Рисунок Б.5 – Зважування показника "Витрати $/га"

Номенклатура | По культурі | По торг. групі | По орг.структурі | По ном. групі | Рік/Місяць внесення All | S.. -- 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Тип культури / Культура / Підстаття / Торгова група / Номенклатура / Хім.речовина	Од.вим.	Площа посіву, га	Площа внесення, га	К-сть, од.	Вміст елем.	Норма на га посіву, од. вим./га	Норма на га внесення, од. вим./га	Ціна ТМЦ, $/од.вим.	Витрати, $/га
1.Основні культури		78,476.79	1,570,745.25						296.30
Кукурудза		42,862.84	638,103.74						304.37
Живлення, $/га		42,862.84	243,141.26						128.53
Насіння, $/га		42,604.27	43,218.14						104.17
Захист рослин, $/га		42,862.84	351,744.34						72.30
Біопрепарати		5,285.96	4,320.07						6.70
Біопрепарат Екостерн Триходерма КС концентрат суспензії	л	3,181.25	2,681.99	4,105.6		1.373	1.531	4.75	6.13
Біопрепарат Склероцид розчин	л	2,104.71	1,638.08	2,505.7		1.426	1.530	6.35	7.56
Гербіциди		42,862.84	156,907.92						34.33
Інсектициди		42,862.84	61,811.40						33.22
Поверхнево-активні речовини		42,862.84	85,757.41						1.78
Регулятори росту рослин		42,862.84	42,854.03						2.07
Фунгіциди		143.51	93.51						21.47
Пшениця озима		8,965.13	244,630.17						262.93
Соя		10,622.63	271,780.12						212.87
Ріпак озимий		4,596.53	185,599.27						499.24
Соя нестандартна		633.80	12,217.04						167.17
Соняшник		8,150.22	167,957.36						294.65
Соняшник високоолеїновий		2,645.64	50,457.56						296.90
Total		81,828.20	1,593,973.14						294.90

Рисунок Б.6 – Представлення номенклатура по культурі

Номенклатура | По культурі | По торг. групі | По орг.структурі | По ном. групі | Рік/Місяць внесення All | S.. --

Торгова група/Номенклатура	Площа посіву, га	Площа внесення, га	Кількість, кг	Ціна $/од	Витрати, $/га	Загальна вартість, $
Азотні добрива	61,411.38	114,308.10	17,143,340	329.45	93.90	5,647,959
Вода аміачна розчин	2,558.15	2,567.00	1,176,235	111.55	53.19	131,205
Карбамід N46% гранула	24,904.76	24,959.25	4,422,988	392.06	71.89	1,734,079
Розчин водний карбаміду та аміачної селітри	11,425.50	11,280.64	548,405	359.00	18.43	196,877
Селітра аміачна N34% гранула	24,597.34	24,596.18	3,491,403	343.40	50.30	1,198,948
Суміш карбамідо-аміачна КАС-32 розчин	34,719.51	50,905.03	7,504,308	318.06	68.90	2,386,850
Калійні добрива	1,163.78	1,111.46	96,047	439.74	38.03	42,236
Комплексні добрива	82,436.17	86,654.28	5,324,191	555.27	36.49	2,954,688
Мікродобрива	96,222.07	317,770.54	656,429	1.31	7.77	747,953
Органічні добрива	39,162.23	39,369.43	173,079,628	26.15	141.50	4,585,857
Сірчані добрива	14,177.40	14,080.80	1,339,875	8.81	31.80	428,525
Фосфорні добрива	1,156.20	926.32	73,738	715.61	47.00	53,580
Хімічні меліоранти	1,920.34	1,702.62	8,549,637	0.00		0
Total	97,042.01	575,923.56	206,262,885	22.20	160.89	14,460,798

Рисунок Б.7 – Представлення номенклатура по торговій групі

Номенклатура | По культурі | По торг. групі | По орг.структурі | По ном. групі | Рік/Місяць внесення All | S.. | -- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12

Культура/Хаб/Орг/ВП/Масив/Посів	од.вим.	Площа посіву, га	Площа внесення, га	__N__ Норма на посів, кг/га	__P__ Норма на посів, кг/га	__K__ Норма на посів, кг/га	__S__ Норма на посів, кг/га	__N__ Норма на внесення, кг/га	__P__ Норма на внесення, кг/га	__K__ Норма на внесення, кг/га	__S__ Норма на внесення, кг/га	Ціна $/од	Ви
Кукурудза		42,862.84	243,141.26	91.01	19.27	28.00	4.55	19.67	11.65	16.72	3.8629	13.39	
Вінницький хаб		42,862.84	243,141.26	91.01	19.27	28.00	4.55	19.67	11.65	16.72	3.8629	13.39	
Зернопродукт МХП ПрАТ		42,862.84	243,141.26	91.01	19.27	28.00	4.55	19.67	11.65	16.72	3.8629	13.39	
Виробничий підрозділ Бершадь		5,110.37	28,737.25	81.26	16.01	27.67	3.72	17.58	9.86	17.05	3.3238	11.71	
ВП Бершадь 001		5,110.37	28,737.25	81.26	16.01	27.67	3.72	17.58	9.86	17.05	3.3238	11.71	
Баланівка 054/00		11.76	70.56	127.69	65.80	94.25	26.69	25.54	32.90	47.13	13.3445	11.61	
Баланівка 056/00		76.19	380.95	69.53	3.84	1.67	1.05	17.38	3.84	1.67	1.0500	28.80	
Баланівка 057/00		95.56	477.80	69.09	3.84	1.67	1.05	17.27	3.84	1.67	1.0500	28.70	
Баланівка 058/00		141.52	707.60	27.77	3.84	1.67	1.05	6.94	3.84	1.67	1.0500	18.54	
Баланівка 059/00		155.65	778.25	27.77	3.84	1.67	1.05	6.94	3.84	1.67	1.0500	18.54	
Баланівка 061/00		160.29	961.74	91.01	12.39	29.13	1.05	18.20	6.19	14.57	1.0500	11.03	
Баланівка 062/00		182.78	913.90	43.64	3.84	1.67	1.05	10.91	3.84	1.67	1.0500	22.90	
Баланівка 063/03		6.32	37.92	51.17	24.64	22.47	1.05	10.23	12.32	11.23	1.0500	53.19	
Баланівка 064/00		114.10	684.60	110.75	18.19	47.77	1.05	22.15	9.09	23.88	1.0500	10.39	
Баланівка 067/00		139.80	838.80	108.75	17.84	46.66	1.05	21.75	8.92	23.33	1.0500	10.40	
Бирлівка 028/00		122.60	735.60	109.09	17.90	46.84	1.05	21.82	8.95	23.42	1.0500	10.40	
Бирлівка 031/00		154.00	924.00	157.37	57.50	81.84	33.25	33.47	28.75	40.93	11.6255	11.84	
Total		81,770.20	622,302.50	86.77	21.59	30.57	12.34	15.42	12.71	18.06	5.5471	12.48	

Рисунок Б.8 – Представлення номенклатура по організаційній структурі

Номенклатура | По культурі | По торг. групі | По орг.структурі | По ном. групі | Рік/Місяць внесення All | S.. | -- | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12

Культура/Хаб/Орг/ВП/Масив/Посів	Од.вим.	Площа посіву, га	Площа внесення, га	К-сть, од.	Вміст елем.	Норма на га посіву, од. вим./га	Норма на га внесення, од. вим./га	Ціна ТМЦ, $/од.вим.	Витрати, $/га
1.Основні культури		78,476.79	1,570,745.25						296.30
Кукурудза		42,862.84	638,103.74						304.37
Вінницький хаб		42,862.84	638,103.74						304.37
Зернопродукт МХП ПрАТ		42,862.84	638,103.74						304.37
Виробничий підрозділ Бершадь		5,110.37	77,010.61						316.18
ВП Бершадь 001		5,110.37	77,010.61						316.18
Живлення, $/га		5,110.37	28,737.25						136.86
Насіння, $/га		5,110.37	5,110.37						100.90
Захист рослин, $/га		5,110.37	43,162.99						78.42
Виробничий підрозділ Гайсин		7,127.66	108,641.28						304.78
Виробничий підрозділ Калинівка		3,882.36	54,620.22						288.54
Виробничий підрозділ Липовець		7,028.22	105,514.81						308.31
Виробничий підрозділ Немирів		3,346.77	49,683.24						285.09
Виробничий підрозділ Томашпіль		3,604.62	54,551.85						304.57
Виробничий підрозділ Тульчин		7,776.88	115,793.22						317.69
Виробничий підрозділ Хмільник		4,985.96	72,288.51						290.51
Пшениця озима		8,965.13	244,630.17						262.93
Соя		10,622.63	271,780.12						212.87
Ріпак озимий		4,596.53	185,599.27						499.24
Total		82,009.38	1,593,973.14						294.25

Рисунок Б.9 – Представлення номенклатура по номенклатурній групі

Хім елементи | Орг.структура -... | Номенклатура | Вартість палива | Технологія помісячно

рма ДР а посіву, кг/га	__N__ Норма на посів, кг/га	__P__ Норма на посів, кг/га	__K__ Норма на посів, кг/га	__S__ Норма на посів, кг/га	Норма ДР на га внесення, кг/га	__N__ Норма на внесення, кг/га	__P__ Норма на внесення, кг/га	__K__ Норма на внесення, кг/га	__S__ Норма на внесення, кг/га	Ціна ТМЦ, $/од.вим.	Витрати, $/га	Вартість, $	__N__ Вміст	__P__ Вміст	__K__ Вміст	__S__ Вміст	Кількість ТМЦ, кг	__N__ Кількість, кг	__P__ Кількість, кг	__K__ Кількість
2.30	2.30				2.30	2.30				424.14	2.12	15	0.460				37	16.79		
80.32	80.32				80.32	80.32				338.09	84.86	619	0.320				1,832	586.34		
										9.20	11.50	84					9			
										6.50	3.90	28					4			
										4.30	8.60	63					15			
										3.37	6.74	49					15			
										12.35	4.94	36					3			
										9.20	64.40	470					51			
21.04	4.16	4.31	12.57		21.04	4.16	4.31	12.57		544.46	28.31	207	0.080	0.083	0.242		380	30.37	31.49	9
7.91	2.40	3.84	1.67		7.91	2.40	3.84	1.67		407.85	16.32	119	0.060	0.096	0.042		292	17.52	28.05	1
										111.77	73.99	540					5			
1.05				1.05	1.05				1.0500	0.33	0.99	7				0.350	22			
0.07	0.07				0.07	0.07				4.13	4.13	30	0.070				7	0.51		
										8.40	1.68	12					1			
										5.17	2.07	15					3			
2.30	2.30				2.30	2.30				424.14	2.12	4	0.460				10	4.60		
80.00	80.00				80.00	80.00				338.09	84.52	169	0.320				500	160.00		
										9.20	11.50	23					3			
										6.50	3.90	8					1			
										4.30	8.60	17					4			
										3.37	6.74	13					4			
										12.35	4.94	10					1			
										9.20	64.40	129					14			
32.37	6.40	6.64	19.33		32.37	6.40	6.64	19.33		544.46	43.56	87	0.080	0.083	0.242		160	12.80	13.28	3
7.91	2.40	3.84	1.67		7.91	2.40	3.84	1.67		407.85	16.32	33	0.060	0.096	0.042		80	4.80	7.69	
										111.77	61.78	124					1			
1.05				1.05	1.05				1.0500	0.33	0.99	2				0.350	6			
0.07	0.07				0.07	0.07				4.13	4.13	8	0.070				2	0.14		
										8.40	1.68	3					0			
										5.17	2.07	4					1			
2.30	2.30				2.30	2.30				424.14	2.12	4	0.460				10	4.60		

Рисунок Б.10– Таблиця “Хім елементи”

Хім.елементи | Орг.структура -... | Номенклатура | Вартість палива | Технологія помісячно

нда землі, $/га	Додаткове виробництво, $/га	EBITDA, $/га	Площа посіву, га	Чистий збір, т	EBITDA, $	Загальні витрати, $	Прямі витрати, $	Основні витрати, $	Живлення, $	Захист рослин, $	Насіння, $	Основні оплата праці, $	Основні енергоносії, $	Оплата послуг, $	Допоміжні витрат $
199.38	-0.22	324.29	6.32	56.88	2,051	7,122	4,255	2,693	704	656	546	178	552	57	
199.38	-0.22	281.55	11.76	105.84	3,314	13,754	8,420	5,521	1,603	1,221	1,117	356	1,118	106	
199.38	-0.22	356.45	76.19	685.71	27,175	83,405	48,842	30,098	7,008	3,838	7,025	1,386	6,573	4,268	
199.38	-0.22	392.42	95.56	860.04	37,521	101,171	57,822	34,313	8,745	3,768	10,006	2,627	8,305	862	
199.38	-0.22	374.44	141.52	1,273.68	53,023	152,374	88,176	53,294	6,335	14,694	14,818	3,890	12,280	1,277	1,
199.38	-0.22	365.43	155.65	1,400.85	56,914	168,991	98,383	60,018	6,967	16,161	17,686	4,280	13,519	1,404	1,
199.38	-0.22	228.73	160.29	1,442.61	36,699	195,940	123,227	83,694	28,460	16,914	18,213	4,493	14,168	1,446	1,
199.38	-0.22	450.18	182.78	1,645.02	82,326	182,955	100,040	55,093	11,811	7,207	15,798	4,732	13,897	1,649	1,
199.38	-0.22	227.14	114.10	1,026.90	25,942	139,658	87,899	59,860	28,102	4,499	9,862	3,577	12,790	1,029	
199.38	-0.22	214.09	139.80	1,258.20	29,961	172,940	109,522	75,167	33,753	5,512	14,638	4,417	15,586	1,261	1,
199.38	-0.22	168.52	122.60	1,103.40	20,688	157,249	101,634	71,415	29,699	12,730	10,597	2,064	9,458	6,868	1,
199.38	-0.22	252.46	154.00	1,386.00	38,914	184,596	114,737	76,779	19,537	15,990	14,887	3,217	14,521	8,627	1,
199.38	-0.22	350.47	153.46	1,381.14	53,817	168,909	99,295	61,358	12,954	9,191	14,151	3,154	13,312	8,597	1,
199.38	-0.22	334.36	120.90	1,088.10	40,451	135,018	80,174	50,287	10,205	7,240	13,099	2,484	10,486	6,773	1,
199.38	-0.22	157.49	87.96	791.64	13,872	113,790	73,888	52,207	15,780	9,133	13,049	1,608	7,710	4,928	
199.38	-0.22	215.58	125.98	1,133.82	27,187	155,656	98,508	67,549	31,124	4,967	13,191	3,825	13,306	1,136	
199.38	-0.22	230.83	166.00	1,494.00	38,354	202,572	127,269	86,353	29,537	17,236	18,862	4,600	14,620	1,497	1,
199.38	-0.22	373.16	58.93	530.37	22,004	63,525	36,793	22,268	2,638	6,119	6,170	1,629	5,180	532	
199.38	-0.22	228.96	5.10	45.90	1,169	6,233	3,920	2,663	895	530	485	85	383	286	

Рисунок Б.11 – Таблиця “Орг структура”

Хім.елементи | Орг.структура -... | Номенклатура | Вартість палива | Технологія помісячно

ЦБ Торгова група	Номенклатура	ЦБ Номенклатура	Базова од.виміру	Площа посіву, га	Площа внесення, га	Кількість, од.	Норма на га посіву, од. вим./га	Норма на га внесення, од. вим./га	Ціна ТМЦ, $/од.вим.	Вартість ТМЦ, $	Витрати, $/га
10000097	Біопрепарат Склероцид розчин	ЦБ01031418	л	39.04	39.10	58.0	1.485	1.483	6.35	368.21	9.43
10000098	Гербіцид Раундап Макс водний розчин	ЦБ01030935	л	39.04	39.04	78.1	2.000	2.000	5.00	390.40	10.00
10000098	Гербіцид Раундап Макс водний розчин	ЦБ01030935	л	39.04	39.04	117.1	3.000	3.000	5.00	585.60	15.00
10000099	Десикант Реглон форте 200г/л розчинний концентрат	ЦБ01031176	л	39.04	39.04	97.6	2.500	2.500	3.60	351.36	9.00
10000100	Інокулянт Атува розчин	ЦБ01031400	л	39.04	39.04	9.4	0.240	0.240	28.39	266.00	6.81
10000100	Інокулянт Протектор Премакс рідина	ЦБ01031311	л	39.04	39.04	2.3	0.060	0.060	26.50	62.07	1.59
10000101	Інсектицид Галіл концентрат суспензії	ЦБ01031562	л	39.04	39.04	9.8	0.250	0.250	22.70	221.55	5.68
10000101	Інсектицид Октан Турбо концентрат суспензії	ЦБ01031561	л	39.04	39.04	9.8	0.250	0.250	13.50	131.76	3.38
10000152	Віта-Бор розчин	ЦБ00907243	л	39.04	39.04	29.3	0.750	0.750	1.73	50.65	1.30
10000152	Віта-Бор розчин	ЦБ00907243	л	39.04	39.04	29.3	0.750	0.750	1.73	50.65	1.30
10000152	Сульфат магнію двоводний кристал	ЦБ00907055	кг	39.04	39.04	78.1	2.000	2.000	0.81	63.24	1.62

Рисунок Б.12 – Таблиця “Номенклатура”

Хім.елементи | Орг.структура -... | Номенклатура | Вартість палива | Технологія помісячно

ківу, га	Площа проведення ТО, га	Норма палива, л/га	Норма палива (Основні ТО), л/га	Норма палива (Допоміжні ТО), л/га	Вартість палива, $/га	Вартість палива (Основні ТО), $/га	Вартість палива (Допоміжні ТО), $/га	Основні ТО оплата праці, $/га	Допоміжні ТО оплата праці, $/га
11.76	11.76	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
11.76	11.76	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
11.76	11.76	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
11.76	11.76	3.476	3.136	0.340	3.58	3.26	0.31	1.44	0.98
11.76	11.76	18.349	18.349	0.000	17.14	17.14	0.00	9.38	0.00
11.76	11.76	7.396	7.103	0.293	6.95	6.68	0.27	1.27	0.83
11.76	11.76	4.200	4.200	0.000	4.26	4.26	0.00	1.41	0.00
11.76	11.76	0.962	0.666	0.296	0.99	0.72	0.27	0.38	0.16
11.76	11.76	3.746	3.746	0.000	3.53	3.53	0.00	0.45	0.00
11.76	11.76	6.395	6.395	0.000	6.07	6.07	0.00	0.77	0.00
11.76	11.76	4.200	4.200	0.000	4.26	4.26	0.00	1.41	0.00
11.76	11.76	9.920	9.920	0.000	9.40	9.40	0.00	1.25	0.00
11.76	11.75	24.301	24.301	0.000	22.90	22.90	0.00	2.93	0.00
11.76	11.76	4.341	4.104	0.237	4.11	3.89	0.22	1.41	0.37
11.76	11.76	5.218	4.966	0.252	4.86	4.63	0.23	1.30	0.47
11.76	11.76	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
11.76	11.76	4.597	4.279	0.318	4.30	4.00	0.29	1.29	0.45
11.76	11.76	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42		0.32
76.19	76.18	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
76.19	76.18	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
76.19	76.18	1.277	0.827	0.450	1.28	0.86	0.42	1.40	0.32
76.19	76.18	3.476	3.136	0.340	3.58	3.26	0.31	1.44	0.98
76.19	76.18	18.349	18.349	0.000	17.14	17.14	0.00		0.00
76.19	76.18	7.396	7.103	0.293	6.95	6.68	0.27	1.27	0.83
76.19	76.18	3.746	3.746	0.000	3.53	3.53	0.00	0.45	0.00

Рисунок Б.13 – Таблиця “Вартість палива

Хім.елементи | Орг.структура -... | Номенклатура | Вартість палива | Технологія помісячно

Культура	ЦБ Культури	Фаза росту	Вид ТО	Назва ТО	ЦБ ТО	ІД ТО	Рік початку ТО	Місяць початку ТО	Послуга	Фактична ТО	Розділ статей	Стаття	Торгова група номенклатури	ЦБ Тор
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4		0	Допоміжні витрати	Оплата праці		
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4		0	Допоміжні витрати	Енергоносії		
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4	0	0	Захист рослин	Номенклатура	Гербіциди	ЦБ100
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4	0	0	Захист рослин	Номенклатура	Гербіциди	ЦБ100
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4	0	0	Захист рослин	Номенклатура	Поверхнево-активні речовини	ЦБ100
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4		0	Основні витрати	Оплата праці		
удза	ЦБ1000007	5-7 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	aa16dbbe-ec25-40f3-9d0d-404f0b61bd7e	2025	4		0	Основні витрати	Енергоносії		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Живлення	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	724f27c3-d899-48a1-a7d8-40cabb41f4ec	2025	5		0	Допоміжні витрати	Оплата праці		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Живлення	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	724f27c3-d899-48a1-a7d8-40cabb41f4ec	2025	5		0	Допоміжні витрати	Енергоносії		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Живлення	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	724f27c3-d899-48a1-a7d8-40cabb41f4ec	2025	5	0	0	Живлення	Номенклатура	Азотні добрива	ЦБ100
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Живлення	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	724f27c3-d899-48a1-a7d8-40cabb41f4ec	2025	5	0	0	Живлення	Номенклатура	Мікродобрива	ЦБ100
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Живлення	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	724f27c3-d899-48a1-a7d8-40cabb41f4ec	2025	5		0	Основні витрати	Оплата праці		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Живлення	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	724f27c3-d899-48a1-a7d8-40cabb41f4ec	2025	5		0	Основні витрати	Енергоносії		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	ccad99af-ee7a-45dd-bbc9-e2667d399003	2025	5		0	Допоміжні витрати	Оплата праці		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	ccad99af-ee7a-45dd-bbc9-e2667d399003	2025	5		0	Допоміжні витрати	Енергоносії		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	ccad99af-ee7a-45dd-bbc9-e2667d399003	2025	5	0	0	Захист рослин	Номенклатура	Регулятори росту рослин	ЦБ100
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	ccad99af-ee7a-45dd-bbc9-e2667d399003	2025	5		0	Основні витрати	Оплата праці		
удза	ЦБ1000007	7-10 листків	Захист рослин	Внесення ЗЗР, норма 201-300 л/га	ЦБ10001699	ccad99af-ee7a-45dd-bbc9-e2667d399003	2025	5		0	Основні витрати	Енергоносії		

Рисунок Б.14 – Таблиця “Технологія помісячно”

Додаток В

Реалізація комп’ютерного розв’язку задачі раціонального розміщення ЦАР.

```
import numpy as np
import math

def generate_consumers(n=10, x_range=(0,100), y_range=(0,100),
                       demand_range=(10,50), seed=42):
    """
    Генерує випадкові координати та попит споживачів.
    Повертає:
      - coords: масив розміром (n, 2), де кожен рядок [x, y]
      - demands: масив розміром (n,), попит для кожного споживача
    """
    np.random.seed(seed)
    coords = np.zeros((n, 2), dtype=float)
    demands = np.random.randint(demand_range[0], demand_range[1]+1, size=n)

    x_min, x_max = x_range
    y_min, y_max = y_range

    coords[:, 0] = np.random.uniform(x_min, x_max, n)  # x-координати
    coords[:, 1] = np.random.uniform(y_min, y_max, n)  # y-координати

    return coords, demands


def total_transport_cost(cx, cy, coords, demands):
    """
    Обчислення сумарних "транспортних витрат" як
    сума(обсяг попиту[i] * відстань від (cx, cy) до coords[i]).
    Використовує евклідову відстань.
    """
    dist_sum = 0.0
    for (x_i, y_i), d_i in zip(coords, demands):
        dist = math.hypot(cx - x_i, cy - y_i)  # евклідова відстань
        dist_sum += d_i * dist
    return dist_sum


def center_of_gravity(coords, demands):
    """
    Формула "центру тяжіння", що мінімізує суму( d[i] * (x - x[i])^2 + ... )
    Але часто використовується як початкова оцінка для задачі
    мінімізації суми евклідових відстаней.
    Повертає (cx, cy).
    """
    total_demand = np.sum(demands)
    if total_demand == 0:
        # Якщо всі d[i] = 0, нехай результат буде (0,0) або середнє
        return (0.0, 0.0)

    weighted_x = np.sum(coords[:, 0] * demands)
    weighted_y = np.sum(coords[:, 1] * demands)

    cx = weighted_x / total_demand
    cy = weighted_y / total_demand
    return (cx, cy)


def local_improvement_search(cx, cy, coords, demands,
                             step=1.0, max_iters=200, tol=1e-3):
    """
```

```
    Спрощений ітеративний пошук навколо поточного (cx, cy),
    щоб мінімізувати суму евклідових відстаней * попит.
    - step: початковий крок пошуку.
    - max_iters: макс. кількість ітерацій.
    - tol: якщо покращення < tol, можна зупинитися.
    """
    best_cost = total_transport_cost(cx, cy, coords, demands)

    for _ in range(max_iters):
        improved = False

        # Перебір можливих напрямків: up, down, left, right, і діагоналі
        # (для більшої ефективності можна брати 8 напрямків).
        directions = [
            ( step,  0.0),
            (-step,  0.0),
            ( 0.0,  step),
            ( 0.0, -step),
            ( step,  step),
            ( step, -step),
            (-step,  step),
            (-step, -step),
        ]

        for dx, dy in directions:
            new_cx = cx + dx
            new_cy = cy + dy
            new_cost = total_transport_cost(new_cx, new_cy, coords, demands)
            if new_cost < best_cost - tol:
                # Знайшли покращення
                cx, cy = new_cx, new_cy
                best_cost = new_cost
                improved = True
                break  # вийти з циклу напрямків, аби зробити наступну ітерацію

        if not improved:
            # Якщо не знайшли покращення, зменшимо step і продовжимо
            step = step / 2.0
            if step < tol:
                # Якщо крок став дуже малим, завершуємо
                break

    return cx, cy, best_cost


def find_rational_zone_for_CAR(coords, demands):
    """
    Знаходить приблизно "раціональне місце" (cx, cy)
    для єдиного центру акумуляції ресурсів (ЦАР),
    щоб мінімізувати сумарну "відстань * попит".

    Повертає (cx, cy, total_cost).
    """
    # 1. Початкове наближення - "центр тяжіння"
    cx, cy = center_of_gravity(coords, demands)

    # 2. Локальне покращення (ітеративний пошук)
    cx_final, cy_final, cost_final = local_improvement_search(cx, cy, coords,
demands,
                                                              step=5.0,
max_iters=200)
    return cx_final, cy_final, cost_final
```

```
if __name__ == "__main__":
    # 1. Генерація випадкових точок (споживачі) і попиту
    coords, demands = generate_consumers(
        n=10,
        x_range=(0, 100),
        y_range=(0, 100),
        demand_range=(10,50),
        seed=42
    )

    # 2. Пошук раціонального розміщення ЦАР
    cx, cy, cost_val = find_rational_zone_for_CAR(coords, demands)

    # 3. Результати
    print("Координати споживачів:")
    for i, (xy, d) in enumerate(zip(coords, demands)):
        print(f"  Споживач {i}: координати=({xy[0]:.2f}, {xy[1]:.2f}), попит={d}")

    print("\n=== РОЗРАХУНОК ЗОНИ РАЦІОНАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ЦАР ===")
    print(f"Рекомендоване розміщення: (cx={cx:.2f}, cy={cy:.2f})")
    print(f"Сумарна вартість транспортування: {cost_val:.2f}")
```

Додаток Г

Реалізація комп’ютерного розв’язку багатоіндексної розподільчої задачі транспортного типу методом проіндексованих елементів

```
import numpy as np

def generate_data_5index(I=3, J=3, K=2, L=2, M=2, seed=42):
    """
    Генерує дані для п’ятиіндексної задачі транспортного типу:
      - c[i,j,k,l,m]: вартість перевезення одиниці ресурсу від i до j,
        за умови використання проміжного хаба k, транспорту типу l і виду ресурсу
m.
      - supply[i]: виробнича потужність (або запас) постачальника i.
      - demand[j]: потреба споживача j.
      - cap_k[k]: пропускна спроможність центру акумуляції k.
      - cap_l[l]: максимум, що може бути перевезений транспортом типу l.
      - cap_m[m]: максимально доступна кількість ресурсу типу m (загалом).
    """
    np.random.seed(seed)

    # Генеруємо псевдовипадкову матрицю витрат
    c = np.random.randint(5, 20, size=(I, J, K, L, M))

    # Постачальники і споживачі
    supply = np.random.randint(50, 100, size=I)
    demand = np.random.randint(50, 90, size=J)

    # Пропускна спроможність хабів, видів транспорту і ресурсів
    cap_k = np.random.randint(70, 120, size=K)
    cap_l = np.random.randint(80, 150, size=L)
    cap_m = np.random.randint(40, 80, size=M)

    return c, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m

def is_feasible(x, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m, I, J, K, L, M):
    """
    Перевірка, чи план x[i,j,k,l,m] відповідає всім обмеженням задачі:
      - Сума постачань від i не перевищує supply[i]
      - Сума отримань для j не менше demand[j] (для демонстрації – не менше)
      - Сума по k не перевищує cap_k[k]
      - Сума по l не перевищує cap_l[l]
      - Сума по m не перевищує cap_m[m]
    У реальній постановці можуть бути інші або додаткові обмеження.
    """
    # 1) Сума постачання з кожного i
    for i in range(I):
        total_i = np.sum(x[i, :, :, :, :])
        if total_i > supply[i]:
            return False

    # 2) Сума отримання для кожного j >= demand[j]
    # (Альтернативно можна брати рівність або "не менше". Для демонстрації
візьмемо >=)
    for j in range(J):
        total_j = np.sum(x[:, j, :, :, :])
        if total_j < demand[j]:
            return False

    # 3) Пропускна спроможність хабів
    for k_ in range(K):
        total_k = np.sum(x[:, :, k_, :, :])
```

```
        if total_k > cap_k[k_]:
            return False

    # 4) Місткість транспортних засобів
    for l_ in range(L):
        total_l = np.sum(x[:, :, :, l_, :])
        if total_l > cap_l[l_]:
            return False

    # 5) Максимально доступна кількість ресурсу m
    for m_ in range(M):
        total_m = np.sum(x[:, :, :, :, m_])
        if total_m > cap_m[m_]:
            return False

    return True

def compute_cost(x, c):
    """
    Обчислення цільової функції (сума x[i,j,k,l,m] * c[i,j,k,l,m]).
    """
    return np.sum(x * c)

def solve_5index_indexed_elements(c, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m,
                                  max_iterations=500, verbose=False):
    """
    Спрощена реалізація методу проіндексованих елементів для п'ятиіндексної
задачі.
    - Створюється початковий псевдовипадковий план x, що (не завжди) є допустимим.
    - Виконується послідовна корекція з урахуванням критерію покращення вартості
      та перевірки обмежень.

    Повертає: (x_best, cost_best), де x_best - матриця перевезень, cost_best -
вартість.
    """
    I, J, K, L, M = c.shape
    x = np.zeros((I, J, K, L, M), dtype=float)

    # Проста ініціалізація: розподіляємо мінімально можливу суму ресурсів для
покриття demand[j]
    # (Дуже спрощено, не гарантуючи повну допустимість одразу)
    # Перевіримо, якщо є надлишок supply і у нас обсяги demand.
    for j_ in range(J):
        needed = demand[j_]
        for i_ in range(I):
            if needed <= 0:
                break
            # Знайдемо "мінімальний" обсяг, що можемо виділити з i_, поки не
перевищили supply
            alloc = min(supply[i_], needed)
            # Спрощено покладемо все у k=0, l=0, m=0 (демонстрація)
            x[i_, j_, 0, 0, 0] = alloc
            supply[i_] -= alloc
            needed -= alloc

    # Перевіримо, чи план хоча б формально допустимий
    if not is_feasible(x, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m, I, J, K, L, M):
        # Якщо ні, поставимо всі нулі (почнемо з абсолютно вільного плану)
        x = np.zeros((I, J, K, L, M), dtype=float)

    cost_current = compute_cost(x, c)
    x_best = x.copy()
    cost_best = cost_current
```

```
    # Для методу проіндексованих елементів: лінійно впорядковуємо (i,j,k,l,m)
    # і намагаємось локально покращувати план.
    index_list = [(i_, j_, k_, l_, m_) for i_ in range(I)
                  for j_ in range(J) for k_ in range(K)
                  for l_ in range(L) for m_ in range(M)]

    for iteration in range(max_iterations):
        # Випадково вибираємо одну "клітинку" (i,j,k,l,m)
        i_, j_, k_, l_, m_ = index_list[np.random.randint(len(index_list))]

        # Спробуємо збільшити або зменшити значення x[i_, j_, k_, l_, m_] на 1
(демо)
        change = np.random.choice([-1, 1])

        old_val = x[i_, j_, k_, l_, m_]
        new_val = old_val + change
        if new_val < 0:
            # Забороняємо негативні обсяги
            continue

        # Застосовуємо зміну й перевіряємо допустимість
        x[i_, j_, k_, l_, m_] = new_val

        if is_feasible(x, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m, I, J, K, L, M):
            # Якщо план досі допустимий, дивимось зміну вартості
            new_cost = compute_cost(x, c)
            if new_cost < cost_current:
                # Поліпшили план
                cost_current = new_cost
                if cost_current < cost_best:
                    cost_best = cost_current
                    x_best = x.copy()
            else:
                # Якщо вартість не зменшилась, скасуємо зміну
                x[i_, j_, k_, l_, m_] = old_val
        else:
            # Недопустимий план, скасовуємо зміну
            x[i_, j_, k_, l_, m_] = old_val

        if verbose and iteration % (max_iterations // 5) == 0:
            print(f"Iteration {iteration}: current_cost = {cost_current}, best =
{cost_best}")

    return x_best, cost_best

if __name__ == "__main__":
    # Генеруємо тестові дані
    c, supply, demand, cap_k, cap_l, cap_m = generate_data_5index(I=5, J=4, K=2,
L=2, M=2, seed=42)

    # Розв'язуємо задачу методом проіндексованих елементів (спрощено)
    x_solution, cost_solution = solve_5index_indexed_elements(c, supply, demand,
cap_k, cap_l, cap_m,
                                                              max_iterations=1000,
verbose=True)

    print("=== РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗАННЯ П'ЯТИІНДЕКСНОЇ ЗАДАЧІ (ДЕМОНСТРАЦІЯ) ===")
    print(f"Краща знайдена вартість: {cost_solution}")
    print("Частковий план (не вся матриця, лише перші зрізи):")
    # Для стислості виведемо перший "зріз"
    print(x_solution[..., 0, 0])  # x[:, :, 0, 0, :]
```

Додаток Д

Акт про результати впровадження на підприємстві ПрАТ «МХП».

ПрАТ «Миронівський хлібопродукт»

Київ, 03143, Україна
Вул. Ак. Заболотного, 158,
Тел.: (044) 207-00-00,207-00-33
E-mail: office@mhp.com.ua
10 січня 2025р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертації
«Методи та моделі інформаційних процесів доставки товарів в мережевих логістичних системах»
на здобуття наукового ступеня PhD
Акімова Дмитра Дмитровича

Результати дисертації Акімова Д.Д. на здобуття наукового ступеня PhD «Методи та моделі інформаційних процесів доставки товарів в мережевих логістичних системах» використані в роботі підприємства при розподілі номенклатури сільськогосподарського виробництва.

У роботі підприємства були використані такі наукові результати дисертаційного дослідження:

– формалізація параметрів багатоіндексної розподільчої задачі;
– формалізація параметрів задачі у вигляді нечітких інтервалів;
– метод розв'язання багатоіндексної задачі розподілу ресурсів;
– програмний застосунок для розв'язання багатоіндексної задачі розподілу ресурсів.

Використання наукових результатів дисертації дозволило отримати такі ефекти при розв'язанні задач:

– під час розв'язання задачі розподілу ресурсів були враховані додаткові параметри, що впливають на вартість розподілу матеріалів сільськогосподарського виробництва (тип матеріалу, тип транспортного засобу);
– визначено завдання вихідних параметрів у вигляді нечітких інтервалів, що дозволяють здійснювати оперативне планування і прогнозування попиту, простою транспортних засобів.

Застосування розробленого програмного комплексу, реалізованого на основі запропонованого в дисертаційній роботі методу розв'язання багатоіндексних задач розподілу ресурсів, дозволило за період з 01.01.2024 по 01.01.2025 знизити вартість перевезення вантажів на 11%.

Директор з інформаційних та діджитал технологій **Гошовський Т.М**