

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЕРГЄЄВ ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК [004.023:519.876.5:005.932:614.2]-024.84

ДИСЕРТАЦІЯ

МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АНАЛІЗУ І ПЛАНУВАННЯ
МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ У СИСТЕМАХ МЕДИЧНОЇ ЛОГІСТИКИ

Спеціальність 124 Системний аналіз
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

_____ О. С. Сергєєв

Науковий керівник Ус Світлана Альбертівна, кандидат фізико-математичних наук,
доцент

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Сергеев О.С. Моделі і методи прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 124 Системний аналіз. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2025.

Логістичні процеси є ключовим елементом у прийнятті рішень для управління матеріальними потоками. Вони забезпечують їх організацію та планування і включають розміщення об'єктів, постачання, зберігання, транспортування та розподіл ресурсів. Існує низка чинників, які ускладнюють створення або масштабування логістичної інфраструктури. По-перше, кількість кінцевих споживачів може бути надмірно великою, у випадках, коли мова йде про забезпечення потреб населення на регіональних та державних рівнях. По-друге, можуть існувати декілька поєднаних між собою етапів у ланцюгах постачання. Одним із шляхів обґрунтованого вирішення цих проблем, є їх формалізація у вигляді багатоетапних транспортно-логістичних задач, які передбачають розміщення об'єктів на різних етапах, планування зон обслуговування та організацію маршрутів постачання. Такі задачі належать до класу NP-складних і потребують застосування сучасного оптимізаційного апарату, зокрема метаевристик, методів дискретної та неперервної оптимізації, розробку підходів до розв'язання багатоетапних задач розміщення-розподілу.

Необхідність дослідження систем логістики та прийняття оперативних управлінських рішень набуває особливої актуальності у сфері охорони здоров'я, де від ефективної організації матеріальних потоків залежить рівень доступності та якості медичних послуг, насамперед під час виникнення кризових ситуацій.

Система медичної логістики охоплює планування процесів надання медичної допомоги, зокрема забезпечення ліками та виробами медичного призначення.

Значні прогалини у постачанні медикаментів та вакцин, разом із підвищеною потребою в ефективному управлінні матеріальними потоками, було виявлено під час соціально-економічних та інфраструктурних дестабілізацій (пандемій, військових дій, стихійних лих, тощо). Масштабні руйнування логістичної інфраструктури призводять до зростання потреби в ліках та виробів медичного призначення, що створює нові виклики перед системою медичної логістики.

Таким чином, дослідження та побудова нових моделей і методів прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики є надзвичайно важливим у сьогоденні, оскільки це сприяє підвищенню ефективності розподілу ресурсів, стійкості системи охорони здоров'я та забезпеченню її здатності швидко адаптуватися до викликів сучасності.

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема побудови нових моделей і методів прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики з метою підвищення ефективності розподілу ресурсів, стійкості системи охорони здоров'я та забезпечення її здатності швидко адаптуватися до викликів сучасності.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування системи медичної логістики шляхом розробки та удосконалення математичних моделей багатоетапних транспортно-логістичних процесів, а також розробки підходів для розв'язання багатоетапних задач розміщення-активації.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- запропоновано нові математичні моделі багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення у вигляді неперервно-дискретних задач розміщення-активації, що дозволяють підвищити ефективність функціонування системи медичної логістики шляхом визначення місць раціонального розташування центрів дистрибуції, їх зон обслуговування та плану перевезень;

- розроблено комбінований підхід до розв'язання неперервно-дискретних задач розміщення-активації, заснований на еволюційних алгоритмах і використанні методів оптимального розбиття множин.

Набули подальшого розвитку засоби комп'ютерного моделювання шляхом інтеграції сучасних ГІС з програмною реалізацією алгоритму розв'язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення-активації з визначенням зон обслуговування.

Розширено клас багатоетапних задач розміщення-розподілу за рахунок доповнення багатоетапними неперервно-дискретними задачами розміщення-активації.

Удосконалено:

- систему медичної логістики шляхом впровадження нових підходів реагування на критичні ситуації, які базуються на математичних моделях багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення, а також на методах розв'язання відповідних оптимізаційних задач;
- еволюційні підходи до розв'язання багатоетапних дискретних задач розміщення-активації шляхом надання рекомендацій щодо вибору параметрів і процедур алгоритму.

В першому розділі розглянуто сучасні підходи до розв'язання задач розміщення та активації, наведено опис актуальних досліджень. Проаналізовано передумови, формулювання задачі та різні підходи до її розв'язання, зокрема точні, евристичні, метаввристичні та стохастичні методи. Наведено огляд сучасних методів моделювання, зокрема лінійного та нелінійного програмування, генетичних алгоритмів, аналізу ієрархій і підходів на основі нечіткої логіки. Проведений огляд наукових публікацій, присвячених багатоетапним задачам розміщення об'єктів, свідчить про наявність численних моделей, що враховують багаторівневу організацію логістичних процесів. Водночас робіт, у яких розглядаються задачі з великою кількістю користувачів, небагато. Крім того, у більшості досліджень не враховано комбіновані варіанти, коли одночасно здійснюється активація та розміщення об'єктів на різних етапах.

Отже, перспективним для подальшого розгляду є дослідження задач, де наявні: транспортування на декількох етапах, активація підприємств із заданого відомого набору, розміщення нових центрів, неперервно розподілені у області споживачі.

У розділі здійснено огляд актуальних наукових робіт та запропоновано класифікацію методів і підходів до розв'язання задач розміщення-активації. Визначено переваги та недоліки застосування точних, евристичних, метоевристичних, багатокритеріальних, стохастичних, комбінованих методів розв'язання задач розміщення-розподілу та методів оптимального розбиття множин із додатковими зв'язками. Визначено, що, з точки зору підходів до розв'язання, попри ефективність відомих методів, перспективним є дослідження інтеграції неперервних і метоевристичних підходів, які забезпечують можливість розв'язання складних комбінованих задач розміщення/активації з великою кількістю користувачів і визначенням зон обслуговування.

В другому розділі проведено системний аналіз розподільчих процесів медичної логістики. Досліджено систему медичної логістики в Україні на прикладі регіонального рівня з акцентом на вдосконалення процесів прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури.

Ідентифіковано ключові компоненти системи медичної логістики, серед яких Верховна Рада України, Міністерство охорони здоров'я України, регіональні та субрегіональні центри, а також центри дистрибуції. Розглянуто детальний алгоритм функціонування системи медичної логістики у кризових ситуаціях, який включає етапи затвердження бюджетних програм, розподіл ресурсів, визначення центрів дистрибуції, планування транспортування та моніторинг ефективності роботи системи. Визначено послідовність дій, що передуює масштабуванню системи медичної логістики під час кризових ситуацій.

При аналізі наявного процесу відкриття регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів з організацією перевезень ліків та виробів медичного призначення було виявлено низку слабких сторін. Зокрема, масштабування інфраструктури відбувається на основі разових адміністративних рішень без урахування

просторових і логістичних факторів, що призводить до неузгодженості управлінських рішень на різних рівнях. Прийняття рішень про розміщення центрів, планування маршрутів і розподілу ресурсів здійснюється без використання математичних і комп'ютерних методів, що підвищує ризики зростання транспортно-логістичних витрат і знижує оперативність надання медичних послуг. Крім того, відсутні механізми швидкого реагування на руйнування об'єктів медичної інфраструктури та зміни структури попиту на медичні послуги. Наявні підсистеми не забезпечують комплексного вирішення цих завдань, що підкреслює необхідність розробки інтегрованої системи для планування мережі регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів та побудови плану перевезень на основі формалізованих математичних моделей та методів.

Відповідно до існуючого алгоритму відкриття регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів і організації перевезень було сформульовано актуальну проблему масштабування, що підлягає вирішенню.

В третьому розділі розширено клас багатоетапних задач розміщення-розподілу за рахунок доповнення багатоетапними неперервно-дискретними задачами розміщення-активації. Розроблено класифікацію цих задач, що охоплює наступні варіанти.

1. Фіксовані центри дистрибуції, активація регіональних і субрегіональних центрів.
2. Фіксовані регіональні центри, активація субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування.
3. Фіксовані регіональні та субрегіональні центри, розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування.
4. Фіксовані регіональні центри, розміщення субрегіональних та дистрибуційних центрів з визначенням їх зон обслуговування.
5. Активація регіональних і субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції.
6. Активація субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції.

Розглянуто багатоетапну дискретну математичну модель задачі (А-1) активації регіональних та субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції. Модель мінімізує суму транспортних та операційних витрат, враховує ємності центрів, попит

дистрибуційних центрів, баланс матеріальних потоків між етапами та ліміти на кількість активованих об'єктів. Ця задача належить до класу NP-складних задач, оскільки потребує побудови багаторівневого плану транспортування одночасного з активацією центрів із відомого набору, що спричиняє збільшення кількості можливих розв'язків.

Запропоновано нові математичні моделі багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення у вигляді неперервно-дискретних задач розміщення-активації (P-A-1 та P-A-2). У цільовому функціоналі об'єднано транспортні витрати декількох етапів і витрати активації, а система обмежень гарантує покриття всього попиту, дотримання ємностей і єдиний вибір сервісного центру для кожного споживача. Запропонована модель описує випадок комбінованої оптимізації, де присутня задача неперервної оптимізації для розміщення центрів дистрибуції і задача дискретної оптимізації для активації субрегіональних центрів. Така комбінація суттєво підвищує складність процесу розв'язання отриманої задачі, що зумовлює потребу у пошуку більш ефективних обчислювальних методів і підходів.

В четвертому розділі розроблено комбінований підхід до розв'язання неперервно-дискретних задач розміщення-активації, заснований на еволюційних алгоритмах і використанні методів оптимального розбиття множин. Використано еволюційний підхід для активації регіональних і субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції з такими послідовними процедурами: пріоритетне кодування, алгоритми ініціалізації, декодування та оцінювання, відбір методом рулетки, зважений кросовер і адаптивна комбінована мутація.

Для задач P-A-1 та P-A-2 запропоновано два підходи до розв'язання:

- у першому підході поєднується еволюційний алгоритм та методи з теорії оптимального розбиття множин і розв'язання задачі зводиться до двох етапів. При цьому на першому етапі розміщуються центри дистрибуції та визначаються їх зони обслуговування і потреби шляхом розв'язування задачі оптимального розбиття множин, на другому етапі розв'язується дискретна

задача активації з відомими координатами центрів дистрибуції і зонами обслуговування;

- у другому підході загальний процес розв'язання здійснюється із застосуванням еволюційного алгоритму, у якому при оцінюванні кожної хромосоми розв'язується задача оптимального розбиття множин із додатковими зв'язками для визначення координат центрів дистрибуції та їхніх зон обслуговування з урахуванням активованих субрегіональних центрів.

Проведено експериментальне порівняння підходів I та II та виявлено, що підхід II суттєво знижує середнє значення цільової функції (до 13,5 %), але потребує більше часу. Натомість підхід I забезпечує швидкі наближені рішення. Це дозволяє рекомендувати підхід I для задач реального часу, а підхід II для оптимального стратегічного планування.

Аргументовано вибір еволюційного підходу через його порівняння з методом рою часток та мурашиним алгоритмом. Еволюційний підхід показав кращі результати і за значенням функціоналу і за часом виконання.

Всі розроблені алгоритми програмно реалізовано з використанням Python3 для еволюційного підходу, бібліотеки PyQt6 для інтерфейсу користувача, C++ для розв'язання частин, пов'язаних з модулем розміщення. Інтегровано сервіс OpenStreetMap для візуалізації карти та отримання реальних відстаней

В п'ятому розділі проведено однофакторне експериментальне дослідження ключових параметрів генетичного алгоритму для багатоетапної задачі розміщення-активації. Моделі охоплювали 15 комбінацій параметрів (кількість центрів: регіональні від 1 до 5, субрегіональні від 10 до 30, дистрибуційні від 10 до 200).

Досліджено зміну часу розв'язання багатоетапної задачі розміщення-активації зі збільшенням розміру моделі. Для п'ятнадцяти тестових прикладів, сформованих ортогональним масивом L9 і граничними сценаріями, алгоритм працював із фіксованими налаштуваннями генетичного алгоритму (50 поколінь, 100 особин). Поряд із фактичним часом оцінено очікувану обчислювальну складність

Експеримент показав, що кількість центрів дистрибуції є головним чинником: збільшення кількості ЦД із 10 до 200 підвищує час майже в 30 разів, а подальший ріст до 500 – ще приблизно в 2,6 рази. Водночас вплив кількості РЦ і СРЦ за фіксованої кількості ЦД залишається близьким до лінійного: варіації кількості РЦ у межах [1; 5] змінюють час не більше ніж на 20%, а зміна кількості СРЦ вдвічі дає до 50% приросту. Загалом емпірична часова складність має поліноміальний характер. Теоретична оцінка узгоджена з емпіричними даними.

Також у розділі були розв’язані багатоетапна дискретна задача активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції з реальними даними і багатоетапна неперервно-дискретна задача активації субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування із застосуванням реальних відстаней для дискретного етапу.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження можуть бути застосовані:

- для підвищення ефективності функціонування та масштабування інфраструктури системи медичної логістики під час кризових ситуацій;
- для розв’язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з визначенням зон обслуговування розміщуваних центрів, що виникають у різних сферах людської діяльності, зокрема у сільському господарстві, видобувній промисловості, гірничо-металургійному комплексі;
- у вигляді розробленого програмного забезпечення для розв’язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з інтерфейсом користувача для візуалізації отриманих результатів на географічній мапі.

Ключові слова: системний аналіз, дискретна оптимізація, неперервна оптимізація, задача розміщення, задача активації, медична логістика, еволюційний алгоритм, пріоритетне кодування, оптимальне розбиття множин, багатоетапні задачі.

ABSTRACT

Serhieiev O.S. Models and methods of decision-making for material flow analysis and planning in medical logistics systems. – Qualification scientific work in a form of manuscript.

PhD thesis in specialty 124 System Analysis. – Dnipro University of Technology, Dnipro, 2025.

Logistics processes are a key element in decision-making for managing material flows. They ensure organization and planning and include the location of facilities, supply, storage, transportation, and distribution of resources. There are several factors that complicate the development or scaling of logistics infrastructure. Firstly, the number of customers may be excessively large when it comes to meeting the population's needs at the regional and national levels. Secondly, there may be several interconnected stages in supply chains. One way to address these issues is to formalize them in the form of multi-stage transport and logistics tasks, which involve the location of facilities at different stages, the determination of service areas, and the organization of supply routes. Such tasks belong to the class of NP-hard problems and require the use of modern optimization tools, including metaheuristics, discrete and continuous optimization methods, as well as specialized approaches for multi-stage location-allocation problems.

The necessity of researching logistics systems and making operational management decisions is particularly relevant in the healthcare sector, where the accessibility and quality of medical services depend on the effective organization of material flows, especially during crisis conditions.

The medical logistics system is capable of the planning of medical care processes, including the provision of medicines and medical equipment.

Significant bottlenecks in the medicines and vaccines supply, as well as an increased demand for effective management of material flows, were identified during periods of socio-economic and infrastructural disruption (pandemics, military actions, natural disasters, etc.). Massive

destruction of logistics infrastructure leads to an increased demand for medicines and medical equipment, which creates new challenges for the medical logistics system.

Thus, researching and developing new models and methods of decision-making for material flow analysis and planning in medical logistics systems is extremely important nowadays. It contributes to improving the efficiency of resource allocation, the sustainability of the healthcare system, and to ensuring its ability to quickly adapt to modern challenges.

The dissertation addresses the topical scientific and applied problem of developing new models and methods of decision-making for analyzing and planning material flows in medical logistics systems with the aim of improving the efficiency of resource allocation, the stability of the healthcare system, and ensuring its ability to quickly adapt to modern challenges.

The purpose of the work is to improve the medical logistics system efficiency by developing and improving mathematical models of multi-stage logistics processes and developing approaches to solve multi-stage location-activation problems.

Scientific novelty of the obtained results:

For the first time:

- new mathematical models of multi-stage distribution of medicines and medical equipment processes in the form of continuous-discrete location-activation problems were proposed. They enable the improvement of the efficiency of the medical logistics system by determining the rational location of distribution centers, their service areas, and transportation plans;
- a combined approach to solving continuous-discrete location-activation problems was developed. It is based on evolutionary algorithms and the use of optimal set partitioning methods.

Computer modeling tools were *further developed* by integrating modern GIS with software implementation of an algorithm for solving a multi-stage continuous-discrete location-activation problem with the definition of service areas.

The class of multi-stage location-distribution problems was *extended* by adding multi-stage continuous-discrete location-activation problems.

Further improvements were achieved in:

- the medical logistics system by introducing new approaches to responding to critical situations based on mathematical models of multi-stage processes for the distribution of medicines and medical equipment, as well as methods for solving related optimization problems;
- evolutionary approaches to solving multi-stage discrete location-activation problems by providing recommendations on the selection of algorithm parameters and procedures.

The first chapter examines contemporary approaches to solving location and activation problems and provides a description of current research. It analyzes the prerequisites, problem formulation, and various approaches to solving it, including exact, heuristic, metaheuristic, and stochastic methods. An overview of modern modeling methods is provided, including linear and nonlinear programming, genetic algorithms, hierarchy analysis, and approaches based on fuzzy logic. A review of scientific publications devoted to multi-stage object location problems indicates the existence of numerous models that consider the multi-level organization of logistics processes. At the same time, there are not many studies that consider problems with a large number of customers. In addition, most studies do not take into account combined options when activation and location of objects at different stages are carried out simultaneously.

Therefore, it is promising for further research to explore problems involving: transportation at several stages, activation of facilities from a given known set, location of new centers, and continuously distributed consumers in the region.

The chapter provides an overview of current scientific works and proposes a classification of methods and approaches for solving location-activation problems. The advantages and disadvantages of using exact, heuristic, metaheuristic, multi-criteria, stochastic, and combined methods for solving location-distribution problems and methods for optimal partitioning of sets with additional constraints were identified. It is determined that, from the point of view of the effectiveness of known approaches, it is promising to study the integration of continuous and metaheuristic approaches. It will provide the possibility of solving complex combined

location/activation problems with a large number of customers and the determination of service areas.

The second chapter provides a system analysis of distribution processes in medical logistics. It examines the medical logistics system in Ukraine at the regional level, with a focus on improving decision-making processes related to infrastructure development.

The key components of the medical logistics system were identified, including the Verkhovna Rada of Ukraine, the Ministry of Health of Ukraine, regional, subregional and distribution centers. A detailed algorithm for the functioning of the medical logistics system in crisis situations was examined. It includes the stages of approving budget programs, allocating resources, determining distribution centers, planning transportation, and monitoring the effectiveness of the system. A sequence of actions that precedes the scaling of the medical logistics system during crisis situations was determined. An analysis of the current process of opening regional, subregional, and distribution centers for the transportation of medicines and medical equipment revealed a number of gaps. In fact, infrastructure scaling is based on individual administrative decisions without considering spatial and logistical factors. This can lead to inconsistent management decisions at different levels. Decisions on the location of centers, route planning, and resource allocation are made without the use of mathematical methods, which increases the risk of higher transportation and logistics costs and reduces the efficiency of medical services. In addition, there are no mechanisms for rapid response to the destruction of medical infrastructure and changes in the structure of demand for medical services. The existing subsystems do not provide a comprehensive solution to these problems, which highlights the need to develop an integrated system for planning a network of regional, subregional, and distribution centers and to build a transportation plan based on formalized mathematical models and methods.

A relevant scaling problem was formulated that needs to be solved in accordance with the existing algorithm for the opening of regional, subregional, and distribution centers and the organization of transportation.

The third chapter expands the class of multi-stage location-allocation problems by adding multi-stage continuous-discrete location-activation problems. A classification of these problems was developed, covering the following variants.

1. Fixed distribution centers, activation of regional and subregional centers.
2. Fixed regional centers, activation of subregional centers, and location of distribution centers with service areas determination.
3. Fixed regional and subregional centers, location of distribution centers with service areas determination.
4. Fixed regional centers, location of subregional and distribution centers with service areas determination.
5. Activation of regional and subregional centers and location of distribution centers.
6. Activation of subregional centers and location of distribution centers.

A multi-stage discrete mathematical model of the problem (A-1) of activating regional and subregional centers with fixed distribution centers was considered. The model minimizes the sum of transportation and operating costs, takes into account the capacities of centers, the demand of distribution centers, the balance of material flows between stages, and limits the number of activated centers. This problem belongs to the class of NP-hard problems, as it requires the construction of a multi-level transportation plan simultaneously with the activation of centers from a known set, which increases the number of possible solutions.

New mathematical models of multi-stage processes of distribution of medicines and medical equipment in the form of continuous-discrete location-activation problems (L-A-1 and L-A-2) were proposed. The objective function combines the transportation costs of several stages and the activation costs, while the system of constraints ensures that all demand is covered, capacities are respected, and a single service center is selected for each customer. The proposed model describes a case of combined optimization, where there is a continuous optimization task for the location of distribution centers and a discrete optimization task for the activation of subregional centers. This combination significantly increases the complexity of solving the

problem, which implies the need to search for more efficient computational methods and approaches.

The fourth chapter presents a combined approach to solving continuous-discrete location-activation problems based on evolutionary algorithms and the use of optimal set partitioning methods. An evolutionary approach is used to activate regional and subregional centers with fixed distribution centers using the following sequential procedures: priority-based encoding, initialization algorithms, decoding and evaluation, roulette wheel selection, weight-mapped crossover, and adaptive combined mutation.

Two approaches to solving problems L-A-1 and L-A-2 were proposed:

- the first approach combines an evolutionary algorithm and methods from the theory of optimal set partitioning. The solution of the problem is divided into two stages. At the first stage, distribution centers are located and their service areas and demands are determined by solving the problem of optimal set partitioning. At the second stage, a discrete activation problem is solved with known coordinates of distribution centers and service areas;
- in the second approach, the overall solution process is carried out using an evolutionary algorithm. When evaluating each chromosome, the problem of optimal partitioning of sets with additional links is solved to determine the coordinates of distribution centers and their service areas, taking into account activated subregional centers.

An experimental comparison of approaches I and II was conducted. It reveals that approach II significantly reduces the average value of the objective function (by up to 13.5%), but requires more time. On the other hand, approach I provides quick approximate solutions. This makes it possible to recommend approach I for real-time tasks and approach II for optimal strategic planning.

The selection of the evolutionary approach is justified by comparing it with the particle swarm and the ant colony methods. The evolutionary approach demonstrated better results in terms of both functional value and execution time.

All developed algorithms were implemented using Python3 for the evolutionary approach, the PyQt6 library for the user interface, and C++ for solving parts related to the location

module. The OpenStreetMap service was integrated for map visualization and obtaining real distances.

The fifth chapter presents a single-factor experimental study of the key parameters of the genetic algorithm for a multi-stage location-activation problem. The models covered 15 combinations of parameters (number of centers: regional from 1 to 5, subregional from 10 to 30, distribution from 10 to 200).

The change in the time for solving a multi-stage location-activation problem with an increase in model size was investigated. The experiments were run for fifteen test examples formed by an orthogonal array L9 and edge cases. The genetic algorithm was run with fixed settings (50 generations, 100 individuals). Along with the actual time, the expected computational complexity was estimated.

The experiment has shown that the number of distribution centers is a key factor: increasing the number of distribution centers from 10 to 200 increases the time by almost 30 times, and further growth to 500 increases it by approximately 2.6 times. At the same time, the impact of the number of regional and subregional centers with a fixed number of distribution centers remains close to linear: variations in the number of regional centers within the range [1; 5] change the time by no more than 20%, and a twofold change in the number of subregional centers gives up to a 50% increase. In general, empirical time complexity can be defined by polynomial complexity. The theoretical estimate is consistent with empirical results.

The section also contains the solution to a multi-stage discrete problem of activating regional and subregional centers with fixed distribution centers using real data. On top of it, a multi-stage continuous discrete problem of activating subregional centers and locating distribution centers with the determination of their service areas using real distances for the discrete stage was solved as well.

Practical significance of the obtained results. The results of the thesis research can be applied:

- to improve the efficiency and scalability of the medical logistics system infrastructure during crisis situations;

- to solve multi-stage continuous-discrete location-activation problems with the determination of service areas for located centers that arise in various spheres of human activity, particularly in agriculture, the extractive industry, and the mining and metallurgical complex;
- in the form of developed software for solving multi-stage continuous-discrete location-activation problems with a user interface for visualizing the results obtained on a geographical map.

Keywords: system analysis, discrete optimization, continuous optimization, location problem, activation problem, medical logistics, evolutionary algorithm, priority-based encoding, optimal partitioning of sets, multistage problems.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у фахових виданнях України:

1. Сергєєв, О., & Ус, С. (2023). Аналіз сучасних підходів до розв’язання дискретних та неперервних багатоетапних задач розміщення. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 50–58. <https://doi.org/10.32782/it/2023-2-7> **(Фаховий (категорія Б))**
(особистий внесок автора – проведення аналітичного огляду літератури, порівняння методів)
2. Us, S., & Serhieiev, O. (2023). An algorithm for solving a two-stage continuous-discrete location problem for medical logistics optimization. *System Technologies*, 5(148), 71–85. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-148-2023-07> **(Фаховий (категорія Б))**
(особистий внесок автора – алгоритм і програмна реалізація)
3. Serhieiev, O., & Us, S. (2024). Exploring two solution methods for the two-stage location-activation problem. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series of Mathematics and Informatics*, 45(2), 249–258. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45\(2\).249-258](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45(2).249-258) **(Фаховий (категорія Б))**
(особистий внесок автора – модель, алгоритм і програмна реалізація; експерименти для порівняння ефективності підходів)
4. Serhieiev, O. (2024). Applying the systems approach to the analysis of regional-level medical logistics. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (4), 187–196. <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-22> **(Фаховий (категорія Б))**
5. Дзюба, С., & Сергєєв, О. (2025). Експериментальне дослідження алгоритму розв’язання багатоетапної задачі розміщення-активації. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cybersecurity*, 3, 152–160. <https://doi.org/10.32782/IT/2025-3-19> **(Фаховий (категорія Б)).**

(особистий внесок автора – планування та проведення експериментів; аналіз результатів)

Публікації у виданнях, які проіндексовані у міжнародних наукометричних базах

6. Serhieiev, O. S., & Us, S. A. (2023). Modified genetic algorithm approach for solving the two-stage location problem. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 159–170. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-3-16> (Web of Science)

(особистий внесок автора – математична модель, алгоритм, програмна реалізація; застосування реальних даних)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Авторське свідоцтво:

1. Сергєєв, О. С. (2024). *Комп'ютерна програма «Multi-stage location-activation problem solver» («MLAPS»)* (Авторське свідоцтво України № 130414). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій.

Матеріали конференцій та тези доповідей:

1. Сергєєв О., Ус С. Дослідження застосування генетичного алгоритму в багатоетапних задачах розміщення-активації: *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*: Матеріали IX міжнар. науково-техн. конф., м. Дніпро, 5–7 листоп. 2025 р. 2025. С. 93–74.
2. Serhieiev O., Us S. Impact investigation of the crossover application coefficient on the location-activation problem solution. *Intelligent Solutions-S: Proceedings of the International Symposium : VIII-th International Conference & XII-th International School-Seminar proceedings*, Kyiv-Uzhorod, 2 May 2025. Kyiv, 2025. P. 102–103. URL: https://intsol.knu.ua/wp-content/uploads/2025/05/Збірник-IntSol-2025_2.pdf.
3. Сергєєв О. Застосування генетичного алгоритма до розв'язання задачі розміщення-активації. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ІТММ'2025 :

матеріали міжнар. науково-техн. конф. ITMM'2025, м. Дніпро, 23–24 квіт. 2025 р. 2025. С. 79–84.

4. Сергєєв О. Про класифікацію багатоетапних задач розміщення-активації. Інформаційні технології: теорія і практика : Тези VIII (II) Міжнар. Інтернет-конф. здобувачів вищ. освіти і молодих уч., м. Запоріжжя, 2–4 квіт. 2025 р. Запоріжжя, 2025. С. 89–92.
5. Сергєєв О. Аспекти програмної реалізації двоетапної задачі активації-розміщення для покращення медичної логістики. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування* : Матеріали XXVI Міжнар. науково-практ. семінару, м. Кропивницький, 13–15 черв. 2024 р. 2024. С. 157–163. URL: https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2024/conf/6.3/CCTA-2024-proc.pdf.
6. Serhieiev O., Us S. Evaluating evolutionary approaches for the two-stage location-activation problem. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій* : Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції, Запоріжжя, 10–12 December 2024. Запоріжжя, 2024. P. 464–468.
7. Serhieiev O., Us S. About methodology for enhancing medical logistics system. *Digital economy and IT: trends and perspectives 2024* : international conference proceedings, Poltava, 28–29 November 2024. Poltava, 2024. P. 165–168.
8. Serhieiev O. Developing a hybrid continuous-discrete approach for optimizing medical logistics through two-stage location problem solving. *Information technologies: theory and practice* : I (VII) international scientific and practical conference of students and young scientists, Dnipro, 20–22 March 2024. Dnipro, 2024. P. 25–28. URL: <https://sau.nmu.org.ua/ua/science/conference/ITTP/international/ittp2024.php>.
9. Сергєєв О. Порівняльний аналіз сервісів розрахунку реальних відстаней у двоетапних задачах розміщення. *Молодь: наука та інновації* : Зб. матеріалів XI Міжнар. науково-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчен., м. Дніпро, 24 листоп. 2023 р. Дніпро, 2023. С. 29–30. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166087>.

- 10.Сергеев О., Ус С. Оптимізація медичної логістики як практичне застосування багатоетапної задачі розміщення. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем* : Матеріали VIII міжнар. науково-техн. конф., м. Дніпро, 1–3 листоп. 2023 р. 2023. С. 71–72. URL: <https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnyk-tez-kmoss-2023.pdf>.
- 11.Сергеев О., Ус С. Про розв'язання задачі медичної логістики як двоетапної задачі розміщення з обмеженнями на максимальну кількість об'єктів. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування* : матеріали XXV Міжнар. науково-практ. семінару, м. Запоріжжя, 14 черв. 2023 р. С. 173–178.
- 12.Сергеев О., Ус С. Про застосування процедури змішаної мутації при розв'язанні двоетапної транспортної задачі за допомогою генетичного алгоритму. *Інформаційні технології: теорія і практика* : Тези доп. VI-ї Всеукр. науково-практ. Інтернет-конф. здобувачів вищ. освіти і молодих уч., м. Харків, 23 берез. 2023 р. С. 68–72. URL: [https://sau.nmu.org.ua/ua/science/conference/ITTP/TEZY_ITTP2023\(Kharkyv\).pdf](https://sau.nmu.org.ua/ua/science/conference/ITTP/TEZY_ITTP2023(Kharkyv).pdf).
- 13.Serhieiev O., Us S. Advancing sustainability in medical supply chains through two-stage continuous-discrete location problem. *Characteristics of green technological transformation in accordance with EGD vision: proceedings of the International Workshop*, Uzhhorod, 6–7 May 2024. Uzhhorod, 2024. P. 22–23. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/68857>.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	25
Вступ.....	26
Розділ 1. Аналіз та аналітичний огляд предметної області.....	34
1.1. Практичне застосування задач розміщення та активації.....	34
1.2. Сучасні підходи до розв’язання задач розміщення та активації	38
Висновки до розділу 1.....	59
Розділ 2. Системний аналіз розподільчих процесів медичної логістики та постановка проблеми її масштабування.....	61
2.1. Визначення компонентів системи медичної логістики	61
2.2. Контекстна діаграма.....	67
2.3. Компоненти системи медичної логістики.....	74
2.4. Постановка проблеми масштабування системи медичної логістики	78
Висновки до розділу 2.....	80
Розділ 3. Розробка математичних моделей багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації.....	82
3.1. Класифікація задач розміщення-активації.....	82
3.2. Математична модель багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією регіональних та субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції.....	85
3.3. Математична модель багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією субрегіональних центрів, розміщенням центрів дистрибуції та фіксованими регіональними центрами.....	89

3.4. Математична модель багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією субрегіональних центрів і розміщенням центрів дистрибуції	94
Висновки до розділу 3	98
Розділ 4. Розробка методів та алгоритмів розв’язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації	100
4.1. Розв’язання дискретної задачі активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції	100
4.2. Підходи до розв’язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі активації субрегіональних центрів з розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції та фіксованими регіональними центрами.....	110
4.3. Порівняння підходів.....	118
4.4. Аргументація вибору генетичного алгоритму	119
4.5. Програмна реалізація	121
Висновки до розділу 4.....	123
Розділ 5. Експериментальне дослідження та аналіз результатів розв’язання задач на модельних та реальних даних	125
5.1. Мета експерименту	125
5.2. Підготовка до експерименту	126
5.3. Дослідження параметрів застосування генетичного алгоритму до розв’язання багатоетапних задач розміщення-активації	128
5.4. Дослідження залежності часу виконання від розміру задачі при розв’язанні багатоетапних задач розміщення-активації	155
5.5. Розв’язання багатоетапної дискретної задачі активації із реальними даними ...	162

5.6. Розв’язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення субрегіональних центрів та активації центрів дистрибуції із реальними даними	169
Висновки до розділу 5.....	171
Висновки	173
Список використаних джерел	177
Додатки	193
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації	193
Додаток Б. Акт впровадження результатів дослідження	197
Додаток В. Акт впровадження результатів дослідження.....	198
Додаток Г. Акт впровадження результатів дослідження	200
Додаток Д. Авторське свідоцтво	201

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ACO	Ant colony optimization
IDEF0	Icam DEFinition for Function Modeling
PSO	Particle Swarm Optimization
SCM	Supply Chain Management
ВМП	Вироби медичного призначення
ГІС	Геоінформаційна система
ДОЗ	Департамент охорони здоров'я
ДП	Державне підприємство
НСОЗ	Національна система охорони здоров'я
ОРМ	Оптимальне розбиття множин
ОРМДЗ	Оптимальне розбиття множин з додатковими зв'язками
РЦ	Регіональний центр
СЕВ	Система електронної взаємодії
СРЦ	Субрегіональний центр
ЦД	Центр дистрибуції
ЦПСМД	Центр первинної медико-санітарної допомоги
ЦФ	Цільовий функціонал

ВСТУП

Актуальність роботи. Логістичні процеси є ключовим елементом у прийнятті рішень для управління матеріальними потоками. Вони забезпечують їх організацію та планування і включають такі процеси: розміщення об'єктів, постачання, зберігання, транспортування та розподіл ресурсів. Застосування системного підходу до аналізу логістичних систем дозволяє виявити взаємозв'язки між їх елементами та обґрунтувати прийняття рішень щодо реалізації ланцюгів постачання. У теперішній час стрімкий розвиток цифрових технологій, динамічна взаємодія між елементами логістичної системи на державному та регіональному рівнях, одночасно з ускладненням соціально-економічних процесів спричиняють появу нових викликів у сфері аналізу і планування матеріальних потоків. Це посилює потребу у дослідженні та розробці математичних моделей та інтелектуальних методів прийняття рішень, спрямованих на оптимізацію функціонування логістичних систем.

У процесі створення чи розширення логістичної інфраструктури особливе значення мають прийняті рішення при реалізації державної політики, а саме:

- державні програми: соціальні (підтримка ветеранів), освітні (Нова Українська Школа), охорона здоров'я (доступність медичних послуг);
- реалізація реформ: збереження людських ресурсів держави, реформа освітнього процесу та охорони здоров'я;
- розвиток енергетичної галузі: системи відновлюваної енергетики, встановлення незалежних засобів електропостачання, досягнення енергетичної незалежності;
- цифрова трансформація: забезпечення доступу до швидкісного інтернету та надійного зв'язку;
- відновлення, модернізація та відбудова цивільної інфраструктури.

Існує низка чинників, які ускладнюють створення або масштабування логістичної інфраструктури. По-перше, кількість кінцевих споживачів може бути надмірно великою, у випадках, коли мова йде про забезпечення потреб населення на регіональних та

державних рівнях. По-друге, можуть існувати декілька поєднаних між собою етапів у ланцюгах постачання. Одним із шляхів обґрунтованого вирішення цих проблем є їх формалізація у вигляді багатоетапних транспортно-логістичних задач, які передбачають розміщення об'єктів на різних етапах, планування зон обслуговування та організацію маршрутів постачання. Такі задачі належать до класу NP-складних і потребують застосування сучасного оптимізаційного апарату, зокрема метаевристик, методів дискретної та неперервної оптимізації, розробку підходів до розв'язання багатоетапних задач розміщення-розподілу.

Дослідження дисертаційної роботи базується на роботах таких науковців: D.W. Tcha, S. M. Arabzad, B.A. Трубін, Н.З. Шор, M. Gen, O. Cosma (методи та підходи розв'язання багатоетапних задач); О.М. Кісельова, С.А. Ус, Л.С. Коряшкіна, Л.І. Лозовська, О.Д. Станіна (неперервні задачі оптимального розбиття множин).

Необхідність дослідження систем логістики та прийняття оперативних управлінських рішень набуває особливої актуальності у сфері охорони здоров'я, оскільки від ефективної організації матеріальних потоків залежить рівень доступності та якості медичних послуг, особливо під час виникнення кризових ситуацій.

Система медичної логістики охоплює планування процесів надання медичної допомоги, в тому числі забезпечення ліками та виробами медичного призначення. Значні прогалини у постачанні медикаментів та вакцин, разом із підвищеною потребою в ефективному управлінні матеріальними потоками, було виявлено під час соціально-економічних та інфраструктурних дестабілізацій (пандемій, військових дій, стихійних лих, тощо). Масштабні руйнування логістичної інфраструктури призводять до зростання потреби в ліках та виробих медичного призначення, що створює нові виклики перед системою медичної логістики.

Таким чином, дослідження та побудова нових моделей і методів прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики є надзвичайно важливим у сьогоденні, оскільки це сприяє підвищенню ефективності розподілу

ресурсів, стійкості системи охорони здоров'я та забезпеченню її здатності швидко адаптуватися до викликів сучасності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри системного аналізу та управління, в рамках науково-дослідних робіт: «Математичне і комп'ютерне моделювання раціонального розподілу матеріальних ресурсів у багаторівневих транспортно-логістичних системах», номер державної реєстрації 0125U000080; «Задачі аналізу, моделювання та оптимізації технологічних процесів у складних системах різної природи», номер державної реєстрації 0123U100011.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є підвищення ефективності функціонування системи медичної логістики шляхом розробки та удосконалення математичних моделей багатоетапних транспортно-логістичних процесів, а також розробки підходів для розв'язання багатоетапних задач розміщення-активації.*

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі *основні задачі*:

1. Проаналізувати сучасний стан системи медичної логістики і оцінити її функціонування під час кризових ситуацій. Дослідити наявність слабких місць у системі медичної логістики.
2. Провести аналіз моделей, методів та інформаційних технологій які використовуються для вирішення транспортно-логістичних завдань, а також сучасних підходів до розв'язання оптимізаційних задач, що включають розміщення та активацію об'єктів. Визначити підходи для подальших досліджень.
3. Розробити математичні моделі:
 - багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією регіональних та субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції;

- багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією субрегіональних центрів, розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції.
- 4. Розробити підходи та алгоритми для розв'язання сформульованих задач розміщення-активації із визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції.
- 5. Провести обчислювальні експерименти з метою перевірки адекватності побудованих моделей і правильності роботи алгоритмів при розв'язанні реальних і модельних задач.
- 6. Провести експериментальне дослідження для визначення рекомендованих параметрів та оцінки розробленого алгоритму.
- 7. На основі запропонованих моделей та підходів розробити і впровадити програмне забезпечення для підвищення ефективності функціонування транспортно-логістичних систем медичної логістики.

Об'єктом дослідження є багатоетапні логістичні процеси розподілу ліків та виробів медичного призначення, що виникають під час реагування на кризові ситуації.

Предмет дослідження: математичні моделі багатоетапних процесів розміщення-розподілу в системах медичної логістики та обчислювальні методи, що використовуються для їх оптимізації.

Методи дослідження. Для моделювання та розробки методів і алгоритмів розв'язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з визначенням зон обслуговування застосовуються методи системного аналізу, математичного моделювання, нескінченновимірною математичного програмування, недиференційованої оптимізації та еволюційні методи.

Програмна реалізація алгоритмів базується на положеннях теорії алгоритмів, принципах об'єктно-орієнтованого програмування та технологіях розробки багатопотокового програмного забезпечення з паралельними обчисленнями.

Для підтвердження ефективності запропонованих рішень проведено експериментальне дослідження, яке включає планування однофакторних і

багатофакторних експериментів та подальший статистичний аналіз отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

Вперше:

- запропоновано нові математичні моделі багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення у вигляді неперервно-дискретних задач розміщення-активації, що дозволяють підвищити ефективність функціонування системи медичної логістики шляхом визначення місць раціонального розташування центрів дистрибуції, їх зон обслуговування та плану перевезень;
- розроблено комбінований підхід до розв'язання неперервно-дискретних задач розміщення-активації, заснований на еволюційних алгоритмах і використанні методів оптимального розбиття множин.

Набули подальшого розвитку засоби комп'ютерного моделювання шляхом інтеграції сучасних ГІС з програмною реалізацією алгоритму розв'язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення-активації з визначенням зон обслуговування.

Розширено клас багатоетапних задач розміщення-розподілу за рахунок доповнення багатоетапними неперервно-дискретними задачами розміщення-активації.

Удосконалено:

- систему медичної логістики шляхом впровадження нових підходів реагування на критичні ситуації, які базуються на математичних моделях багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення, а також на методах розв'язання відповідних оптимізаційних задач;
- еволюційні підходи до розв'язання багатоетапних дискретних задач розміщення-активації шляхом надання рекомендацій щодо вибору параметрів і процедур алгоритму.

Практичне значення одержаних результатів:

Результати дисертаційного дослідження можуть бути застосовані:

- для підвищення ефективності функціонування та масштабування інфраструктури системи медичної логістики під час кризових ситуацій;
- для розв'язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з визначенням зон обслуговування розміщуваних центрів, що виникають у різних сферах людської діяльності, зокрема у сільському господарстві, видобувній промисловості, гірничо-металургійному комплексі;
- у вигляді розробленого програмного забезпечення для розв'язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з інтерфейсом користувача для візуалізації отриманих результатів на географічній мапі.

Впровадження одержаних результатів.

Впровадження одержаних результатах виконано:

- В КП «Дніпропетровський обласний центр соціально значущих хвороб ДОР» (КП «ДОМЦСЗХ» ДОР), де було застосовано програмну реалізацію алгоритму розв'язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення-активації для масштабування інфраструктури системи медичної логістики регіонального рівня.
- В Придніпровському науковому центрі для експериментального дослідження роботи алгоритму на модельних та практичних задачах з метою визначення рекомендованих вхідних параметрів.
- В НТУ «Дніпровська політехніка» в навчальному процесі на кафедрі системного аналізу та управління для підготовки здобувачів вищої освіти освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 124 «Системний аналіз» при викладанні таких дисциплін: «Моделювання економічних, екологічних та соціальних процесів», «Методи оптимізації та дослідження операцій» та при підготовці здобувачів спеціальності 124 «Системний аналіз» освітнього рівня «доктор філософії» при викладанні дисципліни «Оптимізаційні багатоетапні задачі розміщення-розподілу».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою роботою автора. Усі результати, представлені в ній, отримані здобувачем особисто та відображені в його публікаціях. Внесок автора в колективні праці чітко окреслено у списку публікацій. Із робіт, підготовлених у співавторстві, використано лише ті положення та ідеї, що є результатом власних досліджень здобувача.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати дослідження були представлені та обговорені на:

- VI Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Харків, 23 березня 2023 року.
- XXV Міжнародний науково-практичний семінар «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», м. Запоріжжя, 14 червня 2023 року.
- VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», м. Дніпро, 1–3 листопада 2023 року.
- XI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Молодь: наука та інновації», м. Дніпро, 24 листопада 2023 року.
- I (VII) Міжнародна науково-практична конференція студентів та молодих учених «Інформаційні технології: теорія і практика», м. Дніпро, 20–22 березня 2024 року
- XXVI Міжнародний науково-практичний семінар «Комбінаторні конфігурації та їхні застосування», м. Кропивницький, 13–15 червня 2024 року.
- Міжнародна конференція «Digital economy and IT: trends and perspectives», м. Полтава, 28–29 листопада 2024 року.
- XII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», м. Запоріжжя, 10–12 грудня 2024 року.
- VIII (II) Міжнародна Інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційні технології: теорія і практика», м. Запоріжжя, 2–4 квітня 2025 року.

- Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM’2025», м. Дніпро, 23–24 квітня 2025 року.
- XII Міжнародний симпозіум Intelligent Solutions-S (VIII International Conference & XII International School-Seminar), м. Київ–Ужгород, 2 травня 2025 року.
- IX Міжнародна науково-технічна конференція «Комп’ютерне моделювання та оптимізація складних систем», м. Дніпро, 5–7 листоп. 2025 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 20 робіт, з них 5 – одноосібно. Вони включають 6 статей (1 одноосібно), з яких 1 включена до міжнародної науково-метричної бази Web of Science, 5 включено до переліку фахових видань (категорія Б) затверджених МОН України за спеціальністю 124 Системний аналіз, 1 авторське свідоцтво на твір (одноосібно) та 13 публікацій у матеріалах конференцій (з яких 11 – міжнародних).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та п’яти додатків. Обсяг загального тексту дисертації складає 201 сторінку, а саме: 189 сторінок основного тексту, 59 рисунків, 11 таблиць, список використаних джерел містить 147 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

У розділі досліджуються сучасні підходи до розв'язання транспортно-логістичних проблем з оглядом на предметну область застосування. Для цього розглянуто та проаналізовано сучасні підходи до розв'язання задач розміщення та активації. Наведено та порівняно найбільш популярні підходи, що застосовуються у теперішній час. Розглянуто загальні математичні постановки практичних задач, що можуть бути зведені до багатостадійних задач розміщення, запропоновано класифікацію методів та підходів до розв'язання задач цього.

1.1. Практичне застосування задач розміщення та активації

Системний підхід вимагає об'єднання всіх складових частин процесу у єдину систему, щоб забезпечити ефективне управління матеріальними потоками. В сучасному економічному контексті транспортно-виробничі системи, що забезпечують процеси кругообігу матеріальних ресурсів, можуть бути досить складними та об'ємними. Ці системи включають багато економічних агентів та посередників, розташованих в різних регіонах та територіях. Крім того, вони характеризуються відмінностями у розмірах потреб різних клієнтів та іншими факторами. Логістичний підхід до управління матеріальними потоками спрямований на інтегроване бачення всього логістичного процесу, включаючи всі дії та всіх суб'єктів, залучених до переміщення, зберігання та розподілу матеріалів.

На практиці менеджери логістики повинні координувати та інтегрувати різні елементи логістичного процесу, такі як транспортування, управління запасами, складське господарство та обробка замовлень, серед інших. Також вони мають враховувати різні компроміси, зокрема баланс між витратами на транспортування та рівнями запасів, швидкістю та вартістю транспортування.

Рух матеріальних потоків може здійснюватись як усередині окремого підприємства, так і при взаємодії із зовнішніми елементами логістичної інфраструктури, що зумовлює характерну для транспортно-виробничих процесів багатоетапність.

Прикладами задач розміщення об'єктів є велика кількість актуальних практичних завдань. Наведемо деякі з них.

Задача покращення просторового планування громадських служб охорони здоров'я через розробку моделей локації-алокції та доступності. Зокрема, розглядається визначення оптимального розміщення лікарень та інших медичних закладів з урахуванням таких факторів як попит населення, доступність та відстань до інших закладів охорони здоров'я. Дослідження (Polo та ін., 2015) було проведено на прикладі організації медичного обслуговування в Лісабоні (Португалія), де застосування запропонованих ними методів дозволило покращити якість послуг охорони здоров'я та ефективність витрат на їх надання.

Оптимальне розміщення складів (M. You та ін., 2019). Запропоновано нову модель змішаного цілочисельного лінійного програмування для розв'язання проблеми розміщення складів з використанням лінеаризацій евклідової відстані.

Розміщення об'єктів утилізації відходів. У роботі (Yadav та ін., 2017) пропонується нова модель розміщення об'єктів для систем управління твердими побутовими відходами з урахуванням невизначеності вихідних даних. Автори використовують множинне лінійне програмування та метод мінімаксного критерію. Розв'язано задачі мінімізації затрат та максимізації покриття потреб в обслуговуванні населення.

Розміщення заводів та виробництв. Публікація (Paul та ін., 2022) пропонує новий підхід до розміщення виробничих підприємств з використанням нечіткої логіки та систем виведення висновків. Дослідження є корисним для менеджерів з прийняття рішень в галузі виробництва, оскільки воно дозволяє ефективно використовувати нечітку логіку та системи виведення висновків для розв'язання складних проблем розміщення виробничих підприємств. Запропонована модель може бути застосована у різних

галузях, включаючи автомобільну, електронну та харчову промисловість, де виробництво пов'язане з багатьма факторами, які впливають на його ефективність.

Проблема розміщення об'єктів є поширеною проблемою в дослідженні операцій та логістиці, яка полягає у визначенні оптимального розміщення об'єктів (таких як склади, фабрики, розподільчі центри та ін.) для обслуговування заданої множини точок попиту. Метою є мінімізація витрат при одночасному задоволенні попиту споживачів та вимог до рівня обслуговування.

Одним з головних викликів проблеми розміщення об'єктів є велика кількість задіяних змінних, включаючи кількість об'єктів, що підлягають розміщенню, розмір об'єктів, транспортні витрати, а також обсяги попиту. Ще однією проблемою є необхідність балансування суперечливих цілей, таких як мінімізація транспортних витрат при одночасному забезпеченні швидких термінів доставки. Невизначеність обсягів попиту, мінливість транспортних витрат у зв'язку з дорожнім рухом або погодними умовами, та неочікувані перебої у ланцюгу поставок можуть створювати перешкоди у логістичному процесі. Крім того, рішення про розміщення об'єктів можуть мати значні екологічні та соціальні наслідки, які також необхідно враховувати. Наприклад, розміщення об'єкта в густонаселеному районі може мати негативний вплив на місцевих жителів, тоді як розміщення об'єкта у віддаленому районі може мати негативний вплив на навколишнє середовище.

Для розв'язання задач розміщення в літературі запропоновано різні математичні методи оптимізації: лінійне і нелінійне програмування, цілочисельне програмування, направлені пошуки, та інші. Актуальним є застосування штучного інтелекту і машинного навчання, з використанням алгоритмів кластеризації (Magas & Sergeev, 2018) і моделей глибокого навчання, для розв'язання проблем розміщення об'єктів.

Існує велика кількість різних практичних завдань, що можуть бути зведені до багатоетапних задач розміщення. Залежно від практичної постановки задачі, можуть виникати обмеження, які залежать від конкретної проблеми та її контексту. Найбільш часто у задачах розміщення об'єктів використовуються перелічені нижче типи обмежень.

- Стосовно пропускної здатності: об'єкти мають обмежену пропускну здатність для обслуговування клієнтів, і ці обмеження необхідно враховувати, щоб гарантувати, що об'єкти зможуть задовольнити попит з боку клієнтів.
- Щодо відстані: підприємства мають бути розташовані на певній відстані від клієнтів, яких вони обслуговують, щоб мінімізувати транспортні витрати та забезпечити своєчасне надання послуг.
- Щодо рівня обслуговування: підприємства мають забезпечувати певний рівень обслуговування клієнтів, наприклад, мінімальний рівень якості, оперативності та надійності.
- На підприємства можуть поширюватися різні обмеження щодо розміщення, наприклад, правила зонування, екологічні норми або інші юридичні чи логістичні обмеження.
- Витрати: об'єкти мають бути розташовані таким чином, щоб мінімізувати загальні витрати на обслуговування клієнтів, беручи до уваги такі фактори, як транспортні витрати, витрати на експлуатацію об'єкта та інші.
- Обмеження щодо підключення до мережі: підприємства можуть потребувати підключення до більшої мережі або транспортної інфраструктури для забезпечення ефективного надання послуг.
- Попит на послуги може піддаватися різним обмеженням, таким як сезонність, мінливість або інші фактори, що впливають на обсяг попиту, який можна задовольнити в будь-який момент часу.
- Обмеження щодо спільного використання потужностей: для оптимізації надання послуг та мінімізації витрат може виникнути потреба у спільному використанні потужностей або ресурсів декількох підприємств.

Комбінації цих обмежень використовуються для опису проблем розміщення об'єктів та побудови відповідних математичних постановок для задач, розв'язання яких потребує комплексних методів оптимізації.

1.2. Сучасні підходи до розв'язання задач розміщення та активації

В сучасних дослідженнях використовуються такі методи для розв'язання двоетапних задач розміщення:

- *Точні*, що передбачають розв'язання проблеми розміщення об'єкта шляхом пошуку оптимального рішення за допомогою математичних методів оптимізації, таких як лінійне та нелінійне програмування, цілочисельне програмування та змішане цілочисельне програмування. Вони можуть бути обчислювально інтенсивними, але при цьому забезпечують гарантоване оптимальне рішення.
- *Метаевристичні* методи з використанням алгоритмів високого рівня для управління пошуком наближеного до оптимального розв'язку. Вони включають генетичні алгоритми, імітаційне відпалювання, табу-пошук та оптимізацію мурашиних колоній та можуть бути обчислювально інтенсивними. Однак при цьому дозволяють швидко знаходити ефективні розв'язки.
- *Евристичні*, що передбачають використання алгоритмів апроксимації або евристик для пошуку наближених до оптимальних рішень проблеми розміщення об'єкта. Ці підходи часто швидші за точні методи, але не можуть гарантувати оптимального рішення.
- *Методи багатоцільової оптимізації*, які передбачають оптимізацію проблеми розміщення об'єкта з декількома конфліктуючими цілями, такими як мінімізація транспортних витрат і максимізація задоволення потреб клієнтів. Вони можуть допомогти збалансувати конфліктуючі цілі та знайти рішення, які є оптимальними з точки зору кількох цілей.
- *Стохастичні методи*, що передбачають моделювання невизначеності в проблемі розміщення об'єктів, таких як мінливість попиту, транспортні витрати та перебої в ланцюгу поставок та можуть допомогти розробити надійні логістичні плани, що можуть адаптуватися до несподіваних змін у навколишньому середовищі.
- *Комбіновані*, в яких застосовується комбінація проблем розміщення об'єктів з іншими проблемами оптимізації ланцюга поставок, такими як управління запасами,

планування виробництва і маршрутизація перевезень. Вони допомагають оптимізувати весь ланцюг поставок і знайти рішення, оптимальні з точки зору багатьох вимірів.

Досить велика кількість робіт присвячена оглядовим статтям з оптимізації логістики, які класифікують та узагальнюють основні тенденції. Зокрема, (Konstantakopoulos та ін., 2020) розглядають варіанти задачі маршрутизації транспортних засобів та методи їх розв'язання, пропонуючи сучасну класифікацію точних і евристичних алгоритмів. (Ansari та ін., 2018) наводять огляд за два десятиліття досліджень моделей неперервної апроксимації у транспортній логістиці; (Tadaros & Migdalas, 2022) зосереджуються на багатокритеріальних задачах розміщення-маршрутизації та пропонують класифікацію моделей і підходів до їх розв'язання. (Abualigah та ін., 2023) аналізують застосування метаевристик у сталих ланцюгах постачання, а (Bueno-Ferrer та ін., 2024) доповнюють цей огляд бібліометричним дослідженням використання метаевристик у транспортно-логістичних системах. Автори (Jozefowicz та ін., 2008) класифікують моделі для задач маршрутизації транспорту з декількома цілями та методи їх вирішення, а також представляють загальний еволюційний алгоритм розв'язання для врахування різних цілей.

Розглянемо наявні дослідження, результати яких можна віднести до однієї в вищезазначених категорій.

Точні методи. Задача розміщення потужностей з єдиним джерелом постачання (Holmberg та ін., 1999), для розв'язання якої запропоновано точний алгоритм, коли кожен клієнт обслуговується одним об'єктом. Розглянемо таку постановку (1.1) – (1.5):

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i y_i, \quad (1.1)$$

за обмежень:

$$\sum_{j=1}^N a_j x_{ij} \leq b_i y_i, \forall i, \quad (1.2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \forall j, \quad (1.3)$$

$$x_{ij} - y_i \leq 0, \forall i, j, \quad (1.4)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{1, 0\}, \forall i, j, \quad (1.5)$$

де m – кількість потенційних підприємств, n – кількість клієнтів, a_j – попит клієнта j , b_i – ємність підприємства i , f_i – фіксована вартість відкриття підприємства i , c_{ij} – вартість обслуговування i -м підприємством j -го користувача; $y_i = 1$ якщо підприємство i відкрите, $y_i = 0$ в іншому випадку; $x_{ij} = 1$, якщо підприємство i обслуговує клієнта j , $x_{ij} = 0$ – інакше; c_{ij} вже включає попит a_j і вартість розміщення того чи іншого підприємства відображається у змінній y_i . Тобто розглядається одноетапна задача розміщення та вартість розміщення того чи іншого підприємства враховується у цільовій функції.

Алгоритм ґрунтується на підході з розгалуженням і обмеженнями з підзадачею релаксації Лагранжа. Автори демонструють ефективність свого алгоритму, порівнюючи його з іншими точними та евристичними методами на наборі тестових прикладів. Результати показують, що запропонований алгоритм здатний оптимально розв'язувати задачі розмірності до $m=30$ та $n = 200$.

Проблема розміщення виробничих потужностей (Christensen & Klose, 2020) з диференційованими опуклими виробничими витратами, яка є варіантом класичної задачі розміщення потужностей, де вартість виробництва на кожному підприємстві моделюється як опукла функція від його виробничої потужності. Автори пропонують

швидкий точний метод, заснований на підході гілок і цін (branch-and-price), який використовує структуру задачі та опуклість виробничих витрат. Стверджується, що алгоритм є ефективним при розв'язуванні задач, вхідні дані яких мають не більше ніж 1000 клієнтів та 100 об'єктів. Запропонований метод порівнюється з іншими точними та евристичними підходами, показуючи, що він перевершує інші точні методи і дає розв'язки, які знаходяться в межах декількох відсотків від найкращих відомих рішень.

У роботі (Mardan та ін., 2019) використовують прискорений метод декомпозиції Бендерса для вирішення задачі проектування екологічної мережі постачання із замкнутим циклом з двома цілями (вартість та вплив на навколишнє середовище). (Veenstra та ін., 2018) вирішують задачу розміщення об'єктів та маршрутизації транспорту для медичної логістики. (Zheng та ін., 2020) використовують евристику на основі релаксації Лагранжа для оптимізації мережі ланцюга постачання з обмеженнями викидів. У (Hsiao та ін., 2017) вирішують проблему маршрутизації транспортних засобів у розподілі продуктів харчування в холодовому ланцюзі, використовуючи точний підхід до оптимізації для планування поставок таким чином, щоб якість продуктів харчування залишалася на прийнятному рівні після прибуття. (Rastegar та ін., 2021) розробили модель змішаного лінійного програмування для справедливих розподілу вакцин у регіонах, що розвиваються та вирішують проблему розміщення-розподілу, що забезпечує справедливий доступ до вакцин, одночасно оптимізуючи ефективність. (Behnke та ін., 2021) та (Florio та ін., 2020) працюють над сучасними точними алгоритмами: перші застосували метод генерації стовпчиків для екологічної задачі маршрутизації транспорту, що мінімізує викиди, а другі розробили новий точний алгоритм на основі гілок і меж для задачі маршрутизації транспорту зі стохастичними вимогами. У роботі (Bent & Van Hentenryck, 2004) розглянуто динамічну задачу маршрутизації транспорту із стохастичними запитами клієнтів за допомогою двоступеневого підходу прогнозування.

Метаевристичні методи. У роботі (Gen та ін., 2006) розглядається двоетапна транспортна задача у якій за мету взято мінімізацію логістичних витрат, враховуючи

вартість розміщення центрів дистрибуції та витрат на транспортування між підприємствами, центрами дистрибуції та клієнтами. Пропонується розглянути таку математичну модель (1.6) – (1.11):

$$\min Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J t_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{jk} y_{jk} + \sum_{j=1}^J g_j z_j, \quad (1.6)$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq a_i, \quad \sum_{k=1}^K y_{jk} \leq b_j z_j, \quad \forall i, j \quad (1.7)$$

$$\sum_{j=1}^J z_j \leq W, \quad (1.8)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jk} \geq d_k, \quad \forall k, \quad (1.9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K y_{jk}, \quad (1.10)$$

$$x_{ij}, y_{jk} \geq 0, \quad z_j \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k, \quad (1.11)$$

тут I – кількість заводів ($i = \overline{1, I}$); J – кількість центрів дистрибуції ($j = \overline{1, J}$); K – кількість споживачів ($k = \overline{1, K}$); a_i – потужність заводу i , b_j – потужність центру дистрибуції; d_k – попит k -го споживача; t_{ij} – одиниця вартості перевезення з заводу i до центра дистрибуції j ; c_{jk} – одиниця вартості перевезення з центра дистрибуції j до споживача k ; g_j – фіксована вартість відкриття j -го центра дистрибуції; W – верхня межа загальної кількості відкритих центрів дистрибуції; x_{ij} – кількість перевезеного ресурсу

з заводу i до центру дистрибуції j ; y_{jk} – кількість перевезеного ресурсу з центру дистрибуції j до споживача k ; $z_j: 0 - 1$ – булева змінна, що відповідає 1, коли центр дистрибуції j відкритий.

У роботі розглянуто стандартну дискретну модель з додатковими обмеженнями на максимальну кількість розміщених центрів дистрибуції. Для розв'язання задачі автори пропонують застосовувати генетичний алгоритм, при цьому план перевезень закодовано з використанням пріоритетів. Вживання зваженого кросоверу, гарантує коректність отриманої хромосоми та дозволяє не проводити процедуру її відновлення, використовується алгоритм мутації вставками або обміном. В роботі автори розв'язують декілька модельних задач та порівнюють отримані розв'язки з відомими результатами розв'язання для задач невеликої розмірності із застосуванням повного перебору.

У роботі (Raj & Rajendran, 2012) досліджуються задачі з фіксованою вартістю перевезення одиниці товару та урахуванням витрат на функціонування центрів дистрибуції. Авторами запропоновано використання генетичного алгоритму з кодуванням плану перевезень у вигляді матриці. Алгоритми для розв'язування задач наведені у роботі та проведені числові експерименти. Цікавою особливістю запропонованого генетичного підходу є генерація першої популяції, яку проводять із врахуванням різних алгоритмів побудови вихідних планів.

Інший підхід до розв'язання двоетапної транспортної задачі з фіксованою платою за використання маршруту запропоновано у (Cosma, Pop & Sabo, 2019). Розглянута модель є дискретною та відповідає стандартній постановці двоетапної задачі з фіксованою платою. Запропонований алгоритм являє собою ітераційний процес, в якому розглядаються кілька варіантів розподілу розв'язків, з котрих обираються найкращі. Після кожного отриманого розв'язку проводиться направлений пошук кращих варіантів, за допомогою додаткових обмежень на відповідні ланцюги постачання. Розв'язок, отриманий в результаті роботи алгоритму, зберігається у випадку, коли він є кращим за всі попередні варіанти. Додатковим інструментом, що зменшує ймовірність потрапляння у локальний мінімум, є процедура перемішування клієнтів при побудові нових

розв'язків. У програмній реалізації застосована процедура хешу для ефективного видалення дублікатів. Автори показують результати кількох експериментів, які свідчать про те, що запропонований алгоритм для задач невеликих розмірностей.

Багатоступенева реверсивна логістична мережа розглянута у (Lee та ін., 2009). Автори формулюють математичну модель переробної системи як триетапну модель мережі логістики для мінімізації загальної вартості відправлення зворотної логістики та фіксованої вартості відкриття центрів демонтажу та обробки. Також в роботі враховується багатоетапність, багатопродуктовість та деякі умови для центрів демонтажу та обробки відповідно. Для розв'язання цієї проблеми застосовують генетичний алгоритм з пріоритетним кодуванням для першого та другого етапу з використанням методу зваженого кросоверу. В роботі наведені обчислювальні експерименти з доведенням ефективності запропонованого алгоритму.

Публікація (Khan та ін., 2019) описує розв'язання задачі комівояжера за допомогою ройових методів. Застосовуються поєднання методу рою частинок з генетичним алгоритмом, використовуючи вихідні дані одного алгоритму у якості вхідних даних іншого. Цікавим в роботі є дослідження ефективності застосування методу рулетки та багатоточкового циклічного кросоверу. При тестуванні з використанням вибірок великих розмірів, алгоритм демонструє 100% успіх для чіткого випадку. У роботі (Ai & Kachitvichyanukul, 2009) застосовано алгоритм оптимізації рою часток для зваженої задачі маршрутизації транспорту. Впроваджено методи кодування та декодування рішень з реальними значеннями для відображення частинок на можливих маршрутах.

Двоетапна транспортна задача з обмеженням на кількість відкритих центрів дистрибуції наведена у (Cosma та ін., 2022). Пропонується застосування генетичного алгоритму для пошуку ефективного розв'язку. Автори роботи застосовують модифікований генетичний алгоритм з можливістю паралелізації процесу оцінки хромосом. Основна ідея цього алгоритму полягає у розбитті рішення на два кроки: обирання перспективних центрів дистрибуції та розв'язання декількох підзадач, в яких

беруть участь тільки обрані центри дистрибуції. В роботі пропонується розділяти центри дистрибуції на «хороші» та «погані» з метою їх подальшого включення у відповідні «хороші» та «погані» плани перевезень. Саме процедура оцінювання та класифікації в алгоритмі розроблена із застосування пулу потоків, що прискорює отримання результатів. В публікації наведений псевдокод реалізацій відповідних процедур та аналіз впливу параметрів алгоритму (якість та швидкість) на кількість необхідних ітерацій для отримання найкращого розв'язку.

В (Salman, 2018) пропонується розв'язати двоетапну транспортну задачу з використанням табу-пошуку та процедури кодування. Математична модель відповідає дискретній постановці двоетапної транспортної задачі з обмеженням на кількість підприємств. Автор роботи наголошує на ідеї використання списку заборонених розв'язків, щоб врахувати можливі потрапляння в локальні мінімуми, з метою отримання кращого розв'язку. У роботі пропонується розглядати закодовані плани перевезень, що модифікуються на кожній ітерації і, щойно отримані розв'язки заносяться до списку заборонених, щоб уникнути повторення вже досліджених комбінацій. У висновку стверджується, що результати, отримані за допомогою табу-пошуку є кращими ніж ті, що отримані із застосуванням генетичного алгоритму.

В роботі (Elshaer & Awad, 2020) розширено попередні огляди задач маршрутизації транспорту, класифікуючи 299 досліджень на основі метаевристики, опублікованих у період з 2009 по 2017 рік, з аналізом алгоритмів, що застосовується та описом отриманих результатів. (Al-Haidary та ін., 2021) та (Braekers та ін., 2016) досліджують останні динамічні та мережеві проблеми розміщення об'єктів та їх метаевристичні підходи.

(Sulaman та ін., 2024) та (Ropke & Pisinger, 2006) пропонують метаевристику з використанням моделей для дискретної задачі розміщення об'єктів з попитом, розподіленим по гранях мережі. У спільному проектуванні розташування та запасів (Asadi Delivand та ін., 2022) застосовують нову метаевристику змішаного цілочисельного лінійного програмування для задачі розміщення об'єктів з обмеженою пропускною здатністю в умовах перебоїв постачання. (Saif-Eddine та ін., 2019) зосереджуються на

мінімізації витрат в інтегрованому сценарії маршрутизації та управління запасами, демонструючи вдосконалений генетичний алгоритм, що ефективно збалансовує витрати на відкриття об'єктів, зберігання запасів та їх транспортування. (Yuchi та ін., 2018) розглядають замкнутий ланцюг постачання з гібридною евристикою з використанням кластеризації.

Евристичні методи застосовуються до моделі (1.6) – (1.11), що була розглянута для метоевристичних підходів.

Існує група робіт, які започаткували дослідження транспортно-логістичних задач. Так, у роботі (Dantzig & Ramser, 1959) вперше сформульована задача маршрутизації транспортних засобів, в якій було запроваджено модель задачі диспетчеризації вантажних автомобілів та вирішено її за допомогою евристичного методу побудови маршруту з використанням кластеризації з метою мінімізації загальних витрат на доставку. Схожим чином, публікація (Cooper, 1963) представляє одну з найперших моделей розміщення та розподілу об'єктів, що включає як точні математичні формулювання, так і евристичний ітеративний метод розподілу клієнтів між об'єктами. Автори (Clarke & Wright, 1964) впроваджують відому евристику економії Кларка-Райта для зваженої задачі, у якій маршрути формуються шляхом ітеративного об'єднання, якщо це дає зменшення загальної відстані.

В публікації (Daganzo, 1984) розробляється метод неперервного наближення для оцінки оптимальної довжини маршруту обслуговування N клієнтів, рівномірно розподілених у регіоні. Шляхом аналізу щільності попиту отримані вирази для середніх відстаней маршруту.

(Solomon, 1987) запропонував ефективні евристичні методи вставки та процедури вдосконалення для задачі маршрутизації з часовими інтервалами. (Gendreau та ін., 1994) та (Cordeau та ін., 2001) одними з перших застосували алгоритм табу пошуку для задачі маршрутизації транспорту з часовими обмеженнями, використовуючи адаптивну пам'ять і оператори переходу між сусідніми маршрутами, щоб уникнути локальних оптимумів. У (Gambardella та ін., 1999) запропонували

алгоритм оптимізації на основі еволюційних підходів, де кілька колоній мурах співпрацюють для побудови можливих маршрутів з часових інтервалами. Кожна колонія мурах оптимізує різну ціль (наприклад, кількість транспортних засобів або відстань), а алгоритм поєднує їхні рішення. (Schrimpf та ін., 2000) впровадив евристичний алгоритм пошуку з руйнуванням у великому околі, який неодноразово частково руйнує поточне рішення для задачі маршрутизації транспорту і відновлює його, з повторенням кроків, що не призводять до поліпшення, щоб уникнути локальних оптимумів.

У статті (Buson та ін., 2014) розглядається модель двоетапної транспортної задачі з фіксованою платою за використання маршруту. Автори пропонують ітерований евристичний алгоритм локального пошуку, що спирається на мінімізацію затрат на кожній ітерації з подальшою фазою перезапуску. Мінімізація витрат досягається за допомогою застосування процедури нижнього обмеження при розв'язанні проблеми з трьома індексами при обмеженнях з дійсними нерівностями. Запропонований метод був протестований на двох еталонних прикладах з літератури.

Планування мережі лікарень в умовах невизначеності (Mestre та ін., 2015) за допомогою набору дискретних сценаріїв, які охоплюють майбутні можливі імплементації системи. Було розроблено дві математичні моделі, які відображають різні припущення щодо рішень, які необхідно приймати за відсутності повної інформації про невизначені параметри. Незважаючи на те, що моделі представляють різні підходи до розв'язання проблеми невизначеності, вони мають однакову комплексну структуру, розглядаючи питання, які можуть виникнути в реальних умовах використання лікарень, що працюють в ієрархічній мережі і надають різні послуги. Розглядаються компроміси між покращеним доступом та мінімальними витратами, які розв'язуються за допомогою методу багатоцільового програмування з обмеженнями, що надає особі, яка ухвалює рішення, альтернативні варіанти для планування. Моделі були розроблені в контексті системи охорони здоров'я, що базується на структурі Національної служби охорони здоров'я (НСОЗ), а для перевірки їхньої застосовності було використано тематичне дослідження на прикладі португальської НСОЗ.

(Anderluh та ін., 2021) досліджують двокритеріальну задачу міської логістики за допомогою пошуку найближчих сусідів. У роботі (Wang та ін., 2020) пропонуються розв'язувати об'єднану двокритеріальну задачу маршрутизації транспорту декількома складами та часовими інтервалами та застосовувати спеціально розроблену евристику для планування масштабної дистрибуції в часі. В той же час (Saragih та ін., 2019) представляють евристику для маршрутизації складних 3-рівневих ланцюгів постачання. (С. Martins та ін., 2020) розв'язують двокритеріальну задачу маршрутизації транспорту із збором та доставкою за допомогою ітеративного методу вдосконалення логістичного процесу з вантажами, що переміщуються через проміжні об'єкти.

(Mohammed та ін., 2019), (Demir та ін., 2014) та (Han та ін., 2020) розробляють гібридну багатоцільову оптимізаційну модель для ланцюга поставок, поєднуючи оцінку якісних критеріїв з нечіткою оптимізацією, щоб інтегрувати стратегічний вибір постачальників у стійку структуру мережі в умовах невизначеності. Аналогічно, (Khalili Nasr та ін., 2020) формулюють нечітку багатоцільову задачу змішаного лінійного програмування для вибору постачальників у круговій економіці та проектування мереж із замкнутим циклом, використовуючи нечіткі формулювання для вирішення проблеми неоднозначності цілей сталого розвитку та попиту. (Safaeian та ін., 2019) розглядають проблему вибору постачальників та розподілу замовлень із поступовими знижками на обсяг, використовуючи нечітке програмування для задоволення декількох цілей (вартість та якість) в умовах невизначеності.

(Nurjanni та ін., 2017) пропонують багатоцільову оптимізаційну модель для конфігурації екологічного ланцюга поставок, яка оптимізує витрати та викиди за допомогою точних методів і закладає основу для подальших робіт. (Mahjoub та ін., 2020) розширюють цю ідею на мережу постачання біопалива, використовуючи двоцільову задачу змішаного лінійного програмування для проектування ланцюга постачання біопалива з урахуванням компромісів між витратами та викидами. У роботі (Rahimi та ін., 2019) розглядається модель стійкого ланцюга поставок з урахуванням ризиків, що включає в себе множинні невизначеності.

(Vahdani та ін., 2018) зосереджуються на гуманітарній логістиці, використовуючи двоступеневу стохастичну багатоцільову модель для оптимізації розподілу гуманітарної допомоги в умовах невизначеності, збалансовуючи витрати, оперативність та справедливість обслуговування. (Iqbal та ін., 2020) пропонують екологічну модель ланцюга поставок, яка мінімізує не тільки витрати, але й утворення відходів та споживання енергії, відображаючи нові цілі циркулярної економіки в дизайні ланцюга поставок. Публікації (Al-Haidary та ін., 2021), (Hajibabaie & Lotfi, 2021) та (Куо та ін., 2023) роблять огляд робіт 2006 – 2019 рр. для використання підходів до розв’язання задачі маршрутизації транспорту для покращення використання зелених технологій, класифікуючи їх за цілями (витрата пального або викиди).

Задача обґрунтованого планування та оптимізації розміщення укриттів (He, 2022) з метою зменшення втрат від стихійних лих та покращення сталого розвитку міст. Розглядається послідовний розв’язок двокритеріальної задачі: що базується на логіці послідовних рішень для максимізації економічної стійкості та соціальної корисності.

(Vidal та ін., 2020), (Lin та ін., 2014) та (Sun & Wang, 2023) пропонують нові варіанти задачі маршрутизації транспорту та відповідними методами розв’язання, доповнюючи класичні дослідження переходом до сучасних варіантів (наприклад, задачі маршрутизації транспорту із дронами і використання зелених технологій).

(Dewi & Utama, 2020) застосовують алгоритм оптимізації китів, поєднаний з табу-пошуком. (Gmira та ін., 2021), (Schneider та ін., 2014) та (Chen & Li, 2024) модифікують застосування табу пошуку для задачі маршрутизації транспорту з часовими інтервалами. (Andaryan та ін., 2023) розглядають стохастичну проблему розміщення хабів з попитом Бернуллі, використовуючи модифікацію табу пошуку з демонстрацією того, що класичні евристичні методи можуть ефективно вирішувати сценарії розподілу в умовах невизначеності. (Geiger, 2024) застосовує евристику на основі середнього значення за вибіркою до інтегрованої проблеми виробництва та маршрутизації запасів з випадковим попитом, підтверджуючи ефективність застосування методики для багаторівневих ланцюгів постачання в умовах невизначеності попиту. У контексті маршрутизації

транспортних засобів (Keskin та ін., 2021) пропонують евристику, доповнену симуляцією для задачі маршрутизації транспорту зі стохастичним часом очікування на зарядній станції. (Basso та ін., 2021) інтегрують машинне навчання в модель маршрутизації електромобілів для прогнозування енергоспоживання.

(Fathollahi-Fard та ін., 2025) зосередилися на маршрутизації доставки органів для трансплантації, запропонувавши гібридну евристику на основі імітації відпалу для маршрутизації карет швидкої допомоги в умовах міського трафіку та жорстких часових обмежень.

Стохастичні методи. Роботи (Коса, 2023) та (X. Yu & Shen, 2024) досліджують задачі розміщення потужностей, де рішення про відкриття об'єктів приймаються в умовах невизначеності, коли попит або витрати можуть змінюватися залежно від сценарію. Розглянемо наступну математичну модель.

Нехай задані:

I – множина потенційних об'єктів (наприклад фабрик); J – множина клієнтів; S – множина можливих сценаріїв; α^s – ймовірність сценарію $s \in S$; f_i – фіксована вартість відкриття об'єкта $i \in I$; q_{ij} – вартість обслуговування клієнта j з об'єкта i ; λ_j^s – попит клієнта j у сценарії s ; k_i – потужність об'єкта i ; $x_i \in \{0,1\}$, $x_i = 1$, якщо об'єкт i відкритий, $x_i = 0$ – інакше; $y_{ij}^s \geq 0$ – обсяг продукції, який надходить від об'єкта i до клієнта j у сценарії s . Метою є мінімізація очікуваних сумарних витрат на відкриття об'єктів і транспортування продукції до клієнтів у різних сценаріях попиту.

Мінімізувати

$$\sum_{i \in I} f_i x_i + \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha^s q_{ij} y_{ij}^s, \quad (1.12)$$

за таких обмежень

- на задоволення попиту для кожного споживача j та сценарію s :

$$\sum_{i \in I} y_{ij}^s \geq \lambda_j^s, \quad \forall j \in J, \forall s \in S, \quad (1.13)$$

- підприємство i може відвантажити не більше, ніж його потужність k_i :

$$\sum_{j \in J} y_{ij}^s \leq k_i x_i, \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \quad (1.14)$$

- загальна сума потужностей усіх відкритих підприємств повинна бути достатньою, щоб задовольнити найбільший можливий сукупний попит серед усіх сценаріїв:

$$\sum_{i \in I} k_i x_i \geq \max_{s \in S} \sum_{j \in J} \lambda_j^s, \quad \forall j \in J, \quad (1.15)$$

$$x_i \in \{0,1\}, y_{ij}^s \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall s \in S \quad (1.16)$$

Робота (Bieniek, 2015) зосереджується на проблемі розміщення об'єктів зі стохастичним попитом, коли попит клієнтів є невизначеним і моделюється як випадкова величина. Автор пропонує двоетапний стохастичний підхід для розв'язання проблеми та використовує генерацію скінченної кількості сценаріїв і розв'язує задачу для кожного з них, застосовуючи змішане лінійне програмування. Результати роботи демонструють ефективність запропонованого методу на низці числових прикладів, показуючи, що він гарантує розв'язки, стійкі до невизначеності у попиті, і перевершує деякі евристичні підходи.

Інтеграція стохастичної моделі інвентаризації з моделлю мережі ланцюга поставок розглянута у (You, 2008). Цю задачу можна сформулювати як широкомасштабну комбінаторну оптимізаційну модель, яка включає нелінійні умови. У роботі проаналізовано властивості базової моделі та пропонуються методи розв'язання для спільного проектування мережі ланцюга постачання та моделі управління запасами для даного продукту. Модель сформульована як задача нелінійного цілочисельного програмування. Переформулювавши її як задачу змішаного цілочисельного нелінійного програмування і, використовуючи пов'язану модель опуклої релаксації для ініціалізації,

автори пропонують евристичний метод для швидкого отримання якісних рішень. Крім того, розроблено алгоритм декомпозиції на основі релаксації Лагранжа для отримання глобальних або майже глобальних оптимальних рішень.

У публікації (Tavana та ін., 2018) запропоновано двоступеневу стохастичну модель змішаного цілочисельного лінійного програмування для покращення логістики надання допомоги при стихійних лихах із врахуванням попереднього розміщення об'єктів та маршрутизації після стихійного лиха. В роботі (Zandkarimkhani та ін., 2020) розробляють модель нечіткого цільового програмування з імовірнісними обмеженнями для ланцюга постачання швидкопсувних фармацевтичних препаратів. Автори (Zhalechian та ін., 2016) та (Heidari та ін., 2025) представили модель стійкого замкнутого ланцюга поставок, що включала як стохастичні, так і нечіткі елементи: невизначений попит споживачів та неоднозначні екологічні цілі.

Комбіновані методи. Застосовуються до математичних моделей вигляду (1.1) – (1.5), однак підходи до розв'язання є комбінацією різних з розглянутих вище типів.

Вже відома двоетапна транспортна задача з фіксованою платою за використання маршруту в публікації (Calvete та ін., 2018). Для розв'язання цієї задачі, автори застосовують перехід до іншої форми задачі, що схожа на двоетапну транспортну задачу з врахуванням вартості перевезення одиниці товару. Вартість товару представлена у вигляді умовного виразу залежно від того використовується цей маршрут чи ні. В якості алгоритму для розв'язання застосовують генетичний алгоритм. Хромосому кодують з використанням матричного представлення. В роботі доведено робастність запропонованого алгоритму з використанням випадково згенерованих сутностей. Для кожної з цих сутностей, розв'язок був знайдений за раціональний час. У своїх дослідженнях (Prins, 2004) та (Vidal, Crainic та ін., 2012) застосовують стандартний генетичний алгоритм зі спеціалізованим кодуванням до задачі маршрутизації транспорту з обмеженням на ємність, поєднуючи його з локальним пошуком для вдосконалення.

В публікації (Hashemkhani Zolfani та ін., 2015) досліджується проблема location-allocation з метою розроблення ланцюга поставок. Розглянуто ланцюг постачання з

кількома постачальниками, продуктами, заводами та клієнтами. Для ефективного розв'язання проблеми невизначеності параметрів попиту і витрат застосовано сценарний підхід. Формулювання являє собою стійке багатоцільове частково-цілочисельне лінійне програмування контексті якого одночасно враховуються дві суперечливі цілі: 1) мінімізація загальних витрат ланцюга поставок, включаючи витрати на сировину, транспортні витрати та витрати на створення заводів, і 2) мінімізація загального рівня погіршення якості (псування, деградації вантажу) під час транспортування. Застосовано метод зваженої суми та розв'язано одноцільову задачу частково-цілочисельного програмування.

(Qazvini та ін., 2016) формулюють задачу складського планування з розділеними доставками та часовими інтервалами, з метою зниження впливу на навколишній світ. (Zhao та ін., 2025) розробляють нову евристику в поєднанні з нейронною мережею з використанням спільних пунктів самовивозу. Інші зосереджуються на безпеці та стійкості в проектуванні мереж: (Rabbani та ін., 2018), (Rahmanifar та ін., 2024), (Hajibabaei & Lotfi, 2021) та (Kuo та ін., 2023) використовують багатоцільовий генетичний алгоритм для мінімізації витрат і ризиків у проблемі маршрутизації небезпечних відходів з несумісними типами відходів, а (Sahebjamnia та ін., 2018) використовують гібридний еволюційний підхід для проектування масштабного замкнутого ланцюга постачання для переробки шин, оптимізуючи економічні та екологічні цілі. Крім того, (Wu та ін., 2021) запроваджують поєднання генетичного алгоритму та табу-пошуку для проблеми розташування, інвентаризації та маршрутизації з урахуванням часових інтервалів доставки та споживання палива, балансуючи ефективність обслуговування з економією палива.

При застосуванні еволюційного алгоритму, в дослідженнях використовуються різні стратегії відбору батьків, а саме: відбір за принципом колеса рулетки (Pytel, 2025), турнірний відбір (Hussain та ін., 2022), ранговий відбір (Jannoud та ін., 2021) та стохастична універсальна вибірка (Keek та ін., 2021). Для стратегії відбору нащадків

застосовують методи: відтинання (truncation) (Villiers та ін., 2024), заміни на основі віку (Saul та ін., 2024) та заміщення популяції (Patel & Singh, 2023).

(Biuki та ін., 2020) представляють комбіновану модель розміщення та маршрутизації для швидкопсувних продуктів, використовуючи евристику релаксації Лагранжа для обробки стохастичних параметрів попиту та пропозиції в мережі. Аналогічно, (Savadkoohi та ін., 2018) оптимізують мережу розподілу фармацевтичних препаратів протягом декількох періодів та застосовують нечітке програмування для врахування невизначеного попиту та терміну придатності. (Yavari та ін., 2020) зосереджуються на операційних переboях у логістиці швидкопсувних товарів, формулюючи модель, яка надійно організує доставку швидкопсувних товарів, навіть якщо деякі маршрути стають недоступними. (Juan та ін., 2011) впроваджують симульований евристичний підхід, який інтегрує метод Монте-Карло в евристику для задачі маршрутизації транспорту для обробки невизначених потреб клієнтів.

Прикладами комбінування декількох підходів можуть бути роботи (Khan та ін., 2019), (Buson та ін., 2014), (Mestre та ін., 2015) опис яких наведено вище.

Розглянувши підходи до розв'язання задач розміщення, можна зробити висновок, що увагу дослідників більш захоплює використання метаевристичного підходу. Використовуючи цей підхід, авторам вдається досягти ефективних рішень за оптимальний час. Однак у дискретному випадку знайти ефективний розв'язок за адекватний час вдається лише для задач невеликих та середніх розмірів (у роботі (Cosma та ін., 2019) розв'язуються модельні задачі, де кількість об'єктів на різних етапах сумарно становить 60; у публікації (Lee та ін., 2009) – 210; у дослідженні (Khan та ін., 2019) кількість об'єктів – 200). При застосуванні точних методів, розміри задач обмежуються ще більше (розглядають невеликі задачі: (Mardan та ін., 2019) – 30 об'єктів; (Rastegar та ін., 2021) – 33 об'єкта). Враховуючи це, слід звернути увагу на дослідження, де розв'язки для задач можуть бути отримані для більшої кількості об'єктів.

Підходи з теорії оптимального розбиття множин. В монографії (Kiseleva, 2018) містяться засади теорії оптимального розбиття множин (ОРМ), що можуть бути застосовані при розв'язанні багатоетапних задач розміщення, у випадку коли користувачі або ресурс розподілені неперервно в даній області. У роботі наведені основні методи негладкої оптимізації, а саме субградієнтні методи з розтягом простору в напрямі субградієнту та описані задачі оптимального розбиття множин, які, будучи задачами нескінченновимірної оптимізації, зводяться до декількох задач негладкої, але скінченновимірної оптимізації. Випадок задачі оптимального розбиття множин з обмеженням на розташування центрів підмножин розглянуто у (Kiseleva та ін., 2020).

Дослідженню багатоетапних задач розміщення присвячена робота (S. Us & Stanyna, 2017). Розглядається клас задач, в яких існує кілька груп розміщуваних об'єктів, кожна з яких має свою множину можливих місць розміщення (в окремому випадку ці множини можуть збігатися) і регламентовано зв'язки між об'єктами, наприклад задана певна ієрархія між об'єктами розміщення. У роботі зазначається відсутність досліджень випадку континуальних багатоетапних задач і наводяться приклади з предметної області. Також наведена модель двоетапної континуальної задачі розміщення. Континуальність розглядається для кожного з етапів, іноді комбінована з дискретними випадками.

Загальні засади побудови нових математичних моделей для процесів двоетапного виробництва та обґрунтування методів їх розв'язування з урахуванням неперервності розподілення ресурсів та багатоступеневої структури процесу описано в монографії (Станіна та ін., 2021). Значну увагу зосереджено на експериментальних дослідженнях і аналізі результатів модельних задач. Також подано приклади практичного використання розроблених моделей для оптимізації двоетапного розподілу матеріальних потоків у паливно-енергетичному комплексі.

Наприклад, потрібно знайти такі розбиття множини Ω на N вимірних за Лебегом підмножин $(\Omega_1, \dots, \Omega_N)$ (серед яких можуть бути і порожні) і обсяги перевезень $v_{11}, \dots, v_{NM}$, які забезпечують

$$\min_{\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, \{v_{11}, \dots, v_{NM}\}} F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, \{v_{11}, \dots, v_{NM}\}) \quad (1.17)$$

при обмеженнях:

$$\int_{\Omega_i} \rho(x) dx = b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (1.18)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij} = b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (1.19)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} = b_j^{II}, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad (1.20)$$

$$(\Omega_1, \dots, \Omega_N) \in \sum_{\Omega}^N, \quad (1.21)$$

$$\sum_{\Omega}^N = \{(\Omega_1, \dots, \Omega_N) : \bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = \emptyset, i \neq j, i, j = \overline{1, N}\}, \quad (1.22)$$

$$v_{ij} \geq 0, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, J}, \quad (1.23)$$

де

$$F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, \{v_{11}, \dots, v_{NM}\}) = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}, \quad (1.24)$$

- b_i^I – потужність i -го підприємства I-го етапу;
- b_j^{II} – потужність j -го підприємства II-го етапу;
- $c_i^I(x, \tau_i^I)$ – вартість доставки одиниці сировини з точки $x \in \Omega$ до i -го підприємства I етапу;

- $c_{ij}^H(\tau_i^I, \tau_j^H)$ – вартість доставки одиниці продукту від i -го підприємства I етапу до j -го підприємства II етапу;
- $\rho(x)$ – кількість ресурсу в точці $x \in \Omega$;
- $\tau_i^r = (\tau_{i1}^r, \tau_{i1}^r)$ – координати i -го підприємства r -го етапу;
- v_{ij} – обсяг продукції, що постачається від i -го підприємства I етапу до j -го підприємства II етапу: $v_{ij} \geq 0, i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}$.

Авторами отримані розв'язки для задач більших розмірностей, ніж для тих, що зазвичай розв'язуються за допомогою метаевристичних методів.

Задача розміщення об'єктів є важливою темою в галузі дослідження операцій. Кожен з розглянутих підходів має свої сильні і слабкі сторони, і вибір методу залежить від конкретних характеристик задачі, що розглядається. В цілому, проблема розміщення об'єктів є складною і багатогранною та потребує ретельного вивчення та інноваційних рішень. Огляд наукових публікацій, присвячених розв'язанню багатоетапних задач розміщення об'єктів, свідчить про наявність значної кількості моделей, що враховують багаторівневу організацію логістичних процесів. Водночас кількість робіт, у яких розглядаються задачі з великою кількістю користувачів, залишається обмеженою. Крім того, у більшості досліджень не враховано комбіновані варіанти, коли необхідно одночасно здійснювати активацію та розміщення об'єктів на різних етапах, хоча подібні ситуації зустрічаються на практиці. Отже, дослідження багатоетапних задач комбінованої (неперервно-дискретної) оптимізації з активацією та розміщенням об'єктів є актуальним напрямом подальших наукових досліджень.

Підсумуємо розгляд різних класів задач та наведемо переваги та недоліки кожних з них у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Недоліки та переваги кожного з класу методів

№	Клас методу	Переваги	Недоліки
1.	Точні	- Гарантують оптимальне рішення; - використовуються для широкого спектру типів задач розміщення об'єктів	- Вимагають значних обчислень, особливо для задач великої розмірності; - мають проблеми з масштабуванням для обробки змін параметрів або прийняття рішень в реальному часі
2.	Евристичні	- Швидші за точні методи; - орієнтовані на задачі великої розмірності та динамічні середовища	- Не гарантують оптимального рішення; - не підтримують усі типи проблем розміщення об'єктів
3.	Метаевристичні	- Швидко знаходять високоякісні рішення; - застосовуються до складних задач та у динамічних середовищах	- Не можуть гарантувати оптимального рішення; - вимагають значних обчислень для великих задач
4.	Багатоцільова оптимізація	- Дозволяють збалансувати кілька конфліктуючих цілей; - допомагають визначити компроміси та знайти оптимальні рішення щодо декількох цілей	- Складні для імплементації та аналізу; - потребують додаткових критеріїв прийняття рішень та участі зацікавлених сторін
5.	Стохастичні	- Працюють з невизначеністю та мінливістю проблеми; - допомагають розробити більш надійні та гнучкі плани розміщення об'єктів	- Більш складні для реалізації та аналізу порівняно з детермінованими; - вимагають додаткових даних та обчислювальних ресурсів для моделювання невизначеності та мінливості
6.	Комбіновані	- Дозволяють оптимізувати весь ланцюг постачання та знайти рішення, які є оптимальними за багатьма параметрами; - допомагають визначити можливості для синергії та економії витрат	- Складні для імплементації та аналізу; - необхідні додаткові дані та обчислювальні ресурси для інтеграції декількох оптимізаційних задач
7.	ОРМ та ОРМДЗ	- Дозволяють розв'язувати задачі з континуальної множини розміщення центрів	Більш складна програмна реалізація алгоритму

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто основні аспекти моделювання багатоетапних задач розміщення. Проаналізовано основні виклики функціонування логістичних систем різної природи такі як: вплив географічного положення, стан інфраструктури, доступність ресурсів, високий рівень попиту та інші.

Наведено огляд сучасних методів моделювання, зокрема лінійного та нелінійного програмування, генетичних алгоритмів і підходів на основі нечіткої логіки. Висвітлено роль невизначеності та ризиків у процесі прийняття рішень щодо розміщення підприємств, а також приділено увагу питанням екологічного впливу та сталого розвитку.

У розділі розглянуто загальні математичні постановки практичних задач, що можуть бути зведені до багатоетапних задач активації або розміщення. Запропоновано класифікацію методів і підходів до їхнього розв'язання та здійснено огляд актуальних наукових робіт. Визначено переваги та недоліки застосування точних, евристичних, метаевристичних, багатокритеріальних, стохастичних, комбінованих методів та методів оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками. Окремо проаналізовано проблему розмірності, що виникає у дискретних постановках при значній кількості об'єктів для розміщення, а також окреслено типові обмеження, притаманні різним прикладним задачам.

Проведений огляд наукових публікацій, присвячених багатоетапним задачам розміщення об'єктів, свідчить про наявність численних моделей, що враховують багаторівневу організацію логістичних процесів. Водночас робіт, у яких розглядаються задачі з великою кількістю користувачів, небагато. Крім того, у більшості досліджень не враховано комбіновані варіанти, коли одночасно здійснюється активація та розміщення об'єктів на різних етапах.

Отже, перспективним для подальшого розгляду є дослідження задач, де наявні: транспортування на декількох етапах, активація підприємств із заданого відомого набору, розміщення нових центрів, неперервно розподілені у області споживачі.

Визначено, що з точки зору підходів до розв'язання, попри ефективність відомих методів, перспективним є дослідження інтеграції неперервних і метаевристичних підходів, які забезпечують можливість розв'язання складних комбінованих задач розміщення/активації з великою кількістю користувачів і визначенням зон обслуговування.

РОЗДІЛ 2. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРОЦЕСІВ МЕДИЧНОЇ ЛОГІСТИКИ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ЇЇ МАСШТАБУВАННЯ

У цьому розділі виконано системний аналіз розподільчих процесів медичної логістики. Розглянуто систему медичної логістики регіонального рівня в Україні. Проведено аналіз процесів постачання медичних ресурсів, організації взаємодії між медичними закладами та управління запасами. Виявлено основні проблеми, що виникають під час кризових ситуацій. Сформульовано постановку проблеми масштабування системи медичної логістики.

2.1. Визначення компонентів системи медичної логістики

Проаналізуємо систему медичної логістики з метою підвищення ефективності процесів прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури.

У роботі (Mykhalchuk, 2020) представлено нову логістичну модель для системи охорони здоров'я України, яка спрямована на оптимізацію фінансових, матеріальних та інформаційних потоків і людського впливу. У ній обговорено впровадження різних логістичних концепцій, зокрема планування ресурсів підприємства та загальне управління якістю з метою підвищення результативності та якості медичного обслуговування. У статті (Yasral, 2023) досліджено проблему зростання обсягів інфекційних медичних відходів унаслідок пандемії COVID-19 та запропоновано багатоцільову модель оптимізації системи зворотної логістики для управління такими відходами. Модель базується на підходах цифрової трансформації та аналізу даних з метою підвищення ефективності енергоспоживання та зниження ризиків. Дослідження (Гадіак & Писаренко, 2021) підкреслює значення логістики в управлінні охороною здоров'я, зокрема для оптимізації процесів розподілу ресурсів. Тут викладено переваги застосування логістичних підходів у медичних установах для ефективного контролю ресурсів та підвищення якості медичних послуг.

Під час кризових ситуацій була виявлена нездатність наявної системи медичної логістики задовольнити безпрецедентний попит на ліки та вироби медичного призначення. Отже, дослідимо цю систему з метою створення більш стійкої та адаптивної логістичної інфраструктури.

Ключовими компонентами системи є такі:

- Верховна Рада України – законотворчий компонент системи;
- Міністерство охорони здоров'я України (МОЗ України);
- Постачальники визначені МОЗ України (ДП Медичні закупівлі України, ДП «Укрвакцина» МОЗ, та ін.);
- Регіональні центри (Лікарні обласного значення – визначені ДООЗ);
- Субрегіональні центри (Лікарні, центри первинної медико-санітарної допомоги (ЦПСМД) – визначені ДООЗ, УООЗ, відділами ОЗ);
- Центри дистрибуції: державні та недержавні заклади охорони здоров'я (лікарні, ЦПСМД, ФОПи), мобільні пункти розподілу ліків та вакцин.

Ключові компоненти системи показано на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Ключові компоненти системи медичної логістики

В епоху непередбачуваних криз, від пандемій до стихійних лих, стійкість і проактивна адаптивність системи охорони здоров'я мають першорядне значення. Центральним

елементом такої адаптивності є розвинута і надійна транспортна мережа, яка має вирішальне значення для ефективного розподілу медикаментів під час надзвичайних ситуацій. Історичні приклади, зокрема виклики, що постають під час пандемій та військових дій, показують наслідки логістичних недоліків у розподілі ліків. Створення добре структурованих транспортних систем пов'язане з логістичними та фінансовими труднощами, однак переваги таких систем з точки зору збереження життя населення та стримування поширення захворювань є неоціненними. Для початку, розглянемо процеси, що існують сьогодні, та яким чином організована система медичної логістики в кризових ситуаціях. Наведемо опис процесу прийняття рішень та організації системи медичної логістики при виникненні кризової ситуації.

Процес 1. Організація системи медичної логістики у кризовій ситуації

Операція 1. Затвердження Верховною Радою України розподіл напрямків Державного бюджету України: прийняття Закону України «Про Державний бюджет України на відповідний бюджетний період».

Операція 2. Оприлюднення МОЗ України регіональним ДОЗ розподілу видатків на централізовані заходи і програми: МОЗ України видає розпорядчі документи (наказ, лист) для ДОЗ на розподіл ліків та ВМП в рамках виконання централізованих заходів за бюджетною програмою.

Операція 3. Підготовка ДОЗ відповіді на запит МОЗ України про заклади-отримувачі: до постачальників надається інформація щодо закладів-отримувачів матеріальних цінностей, які отримують матеріальні цінності в області шляхом централізованого постачання за бюджетною програмою.

Операція 4. Підготовка та підписання проєкту наказу ДОЗ щодо обліку матеріальних цінностей, які надходять до області шляхом централізованого постачання: керівнику ДОЗ надається проєкт відповідного наказу.

Операція 5. Визначення субрегіональних центрів та центрів дистрибуції: проводиться активація субрегіональних центрів. ДОЗ, УОЗ, відділами ОЗ визначаються центри

дистрибуції. МОЗ України бере участь у визначенні регіональних центрів. ДОЗ разом із облдержадміністрацією визначають субрегіональні центри та центри дистрибуції.

Операція 6. Збір та узагальнення інформації від закладів-отримувачів: ДОЗ проводиться збір та узагальнення інформації від закладів охорони здоров'я.

Операція 7. Підготовка та подання керівнику ДОЗ інформації про наявні залишки матеріальних цінностей, термін яких спливає. Подання МОЗ України та керівнику ДОЗ інформації щодо залишків матеріальних цінностей, які надходять до області шляхом централізованого постачання за бюджетною програмою.

Операція 8. Перевірка фахівцями ДОЗ отриманої від експертів інформації щодо визначення потреби у лікарських засобах та виробих медичного призначення: інформація щодо розрахунків річної потреби у лікарських засобах та виробих медичного призначення, яка отримана від експертів, узагальнюється та оформлюється фахівцями ДОЗ для передачі в МОЗ України.

Операція 9. Підготовка та підписання заявки на потребу у лікарських засобах та виробих медичного призначення: заявки на потребу у лікарських засобах та виробих медичного призначення експертів опрацьовуються в частині наявних залишків лікарських засобів та виробів медичного призначення в закладах-отримувачах матеріальних цінностей.

Операція 10. Передача до МОЗ України заявки на потребу у лікарських засобах та виробих медичного призначення: підготовлені, перевірені та підписані заявки на лікарські засоби та вироби медичного призначення направляються до МОЗ України.

Операція 11. Визначення плану транспортування: ДОЗ враховує визначені МОЗ регіональні центри, визначені ДОЗ субрегіональні центри, центри дистрибуції та потреби у ліках та ВМП і формує завдання на створення плану транспортування. Обов'язок створення плану транспортування покладається на регіональні центри. План перевезень має бути погоджений із відповідальною особою у ДОЗ.

Операція 12. Отримання матеріальних цінностей від МОЗ України згідно з планом транспортування: заклад-отримувач на підставі накладної приймає матеріальні цінності від МОЗ України через постачальників.

Операція 13. Отримання ДОЗ накладної та інформації про використання лікарських засобів та виробів медичного призначення від закладу-отримувача. Підготовка проєкту розподілу лікарських засобів за виробів медичного призначення, оформлення документів первинного обліку. Узагальнення звітних даних закладами-отримувачами та подання їх у ДОЗ.

Операція 14. Опрацювання фахівцями ДОЗ інформації щодо отримання ліків та ВМП із застосуванням електронної системи (*Електронна система охорони здоров'я в Україні, 2025*).

Операція 15. Підготовка та узагальнення звітних даних фахівцями ДОЗ.

Операція 16. Подання фахівцями ДОЗ узагальнених звітних даних про використання ліків та ВМП до МОЗ України.

Учасники процесу:

Внутрішні учасники (на прикладі структури ДОЗ):

- директор, заступники директора департаменту охорони здоров'я;
- начальник відділу розвитку первинної, паліативної та екстреної медичної допомоги та системи реабілітації;
- начальник відділу бухгалтерського обліку та зведеної звітності департаменту охорони здоров'я – головний бухгалтер;
- головні спеціалісти відділу бухгалтерського обліку та зведеної звітності;
- начальник відділу медичної допомоги жіночому та дитячому населенню;
- начальник відділу спеціалізованої медичної допомоги;
- групи експертів департаменту охорони здоров'я.

Зовнішні учасники:

- Міністерство охорони здоров'я України;

- заклади охорони здоров'я;
- постачальники: державне підприємство «УкрМедПостач» МОЗ України, (Державне підприємство «Укрвакцина» МОЗ України, 2016), (Державне підприємство «Медичні закупівлі України», 2018) та інші.

Блок-схема описаного процесу наведена на рис. 2.2.

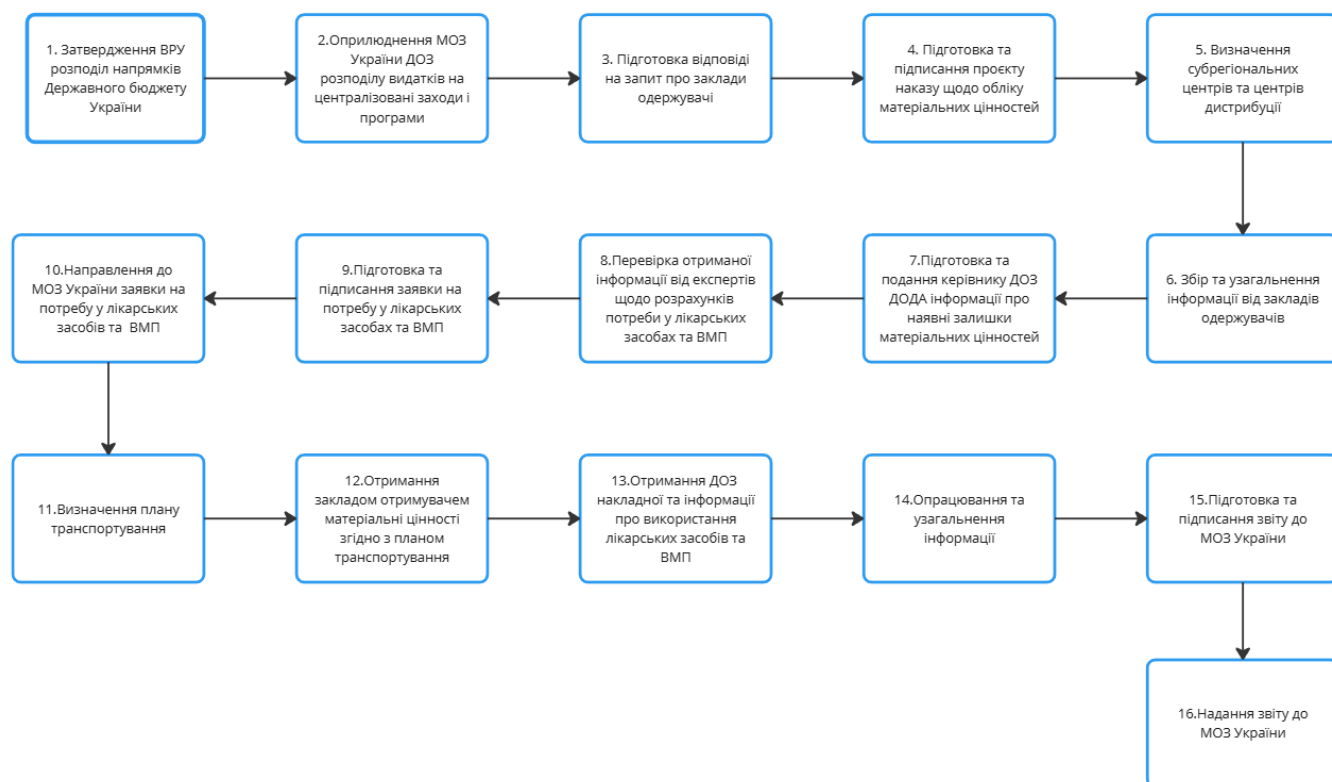


Рис. 2.2. Процес функціонування системи медичної логістики (постачання ліків та виробів медичного призначення)

Процеси описано відповідно до таких документів: (Про організацію контролю за цільовим та раціональним використанням матеріальних цінностей, отриманих централізовано за бюджетними програмами та заходами, 2013), (Про порядок відображення в обліку операцій з централізованого постачання матеріальних цінностей, 2003), (Про затвердження Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для виконання програм та здійснення централізованих заходів з охорони

здоров'я, 2025), (Деякі питання забезпечення функціонування ефективної системи закупівель лікарських засобів, медичних виробів, допоміжних засобів до них та державної компенсації шкоди, 2025), (Деякі питання перерозподілу та цільового використання гуманітарної допомоги, 2025), (Основи законодавства України про охорону здоров'я, 2025) та (Конституція України (стаття 49), 2020).

2.2. Контекстна діаграма

Будемо використовувати ключові компоненти системи медичної логістики, що зображені на рис. 2.2, для побудови моделі та нотацій бізнес-процесів. Створимо контекстну діаграму IDEF0 (IDEF0 diagram, 2025) для процесу «Медична логістика» та зосередимося на високорівневих функціях і взаємодіях. На діаграмі IDEF0 маємо чотири типи стрілок:

Входи (ліворуч): це елементи, які перетворюються або такі, що використані процесом.

Виходи (праворуч): це продукти або результати процесу.

Елементи управління (у верхній частині): спрямовують або регулюють процес.

Механізми (нижня частина): це ресурси або засоби, за допомогою яких виконується процес.

Для системи медичної логістики, маємо таку контекстну діаграму (А-0).

Входи:

- Виникнення екстреної ситуації
- Запити на медичну допомогу

Виходи:

- Задоволення потреб
- Елементи управління
- Законодавчі акти
- Регуляторні інструкції для використання та зберігання
- Внутрішні положення та розпорядження

Механізми:

- Верховна Рада України
- Міністерство охорони здоров'я України
- Регіональні департаменти охорони здоров'я
- Регіональні центри

Контекстну діаграму зображено на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Контекстна діаграма A0

Проведемо декомпозицію діаграми A0 за такими елементами:

- Ухвалення законодавчої ініціативи ВРУ та підготовка наказів МОЗ.
- Визначення субрегіональних центрів та центрів дистрибуції.
- Збір та узагальнення інформації від закладів-отримувачів. Експертні дослідження.
- Робота з експертами щодо розрахунків потреби у лікарських засобах та ВМП.
- Визначення плану транспортування.
- Надання закладу-отримувачу матеріальних цінностей згідно з планом транспортування.
- Звітування регіональних ДОЗ до МОЗ.

Декомпозиційна діаграма наведена на рис. 2.4.

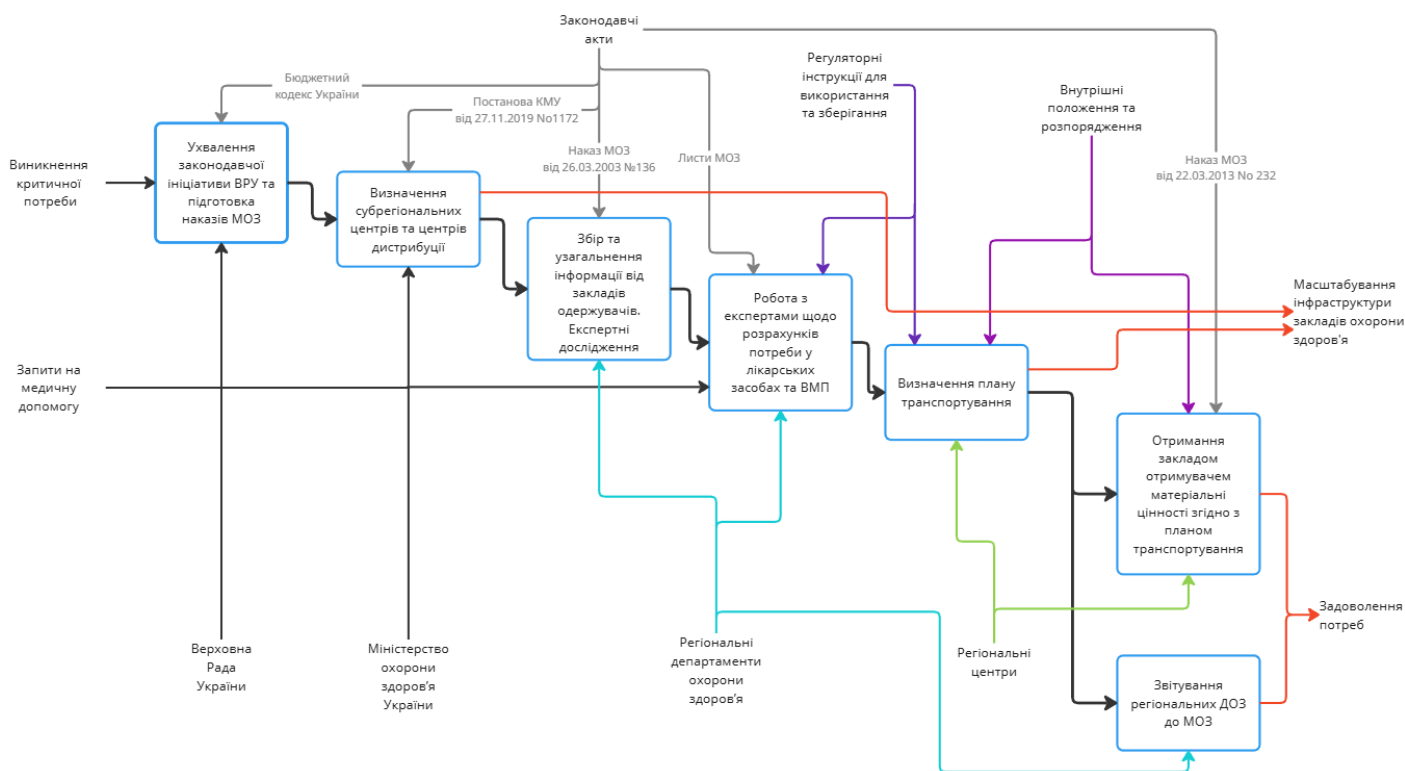


Рис. 2.4. Декомпозицію діаграми А0 за елементами

Система медичної логістики регіонального рівня виконує наступні функції:

Базові: замовлення, постачання, розподіл;

Ключові: управління закупівлями; транспортування; управління запасами; фізичний розподіл;

Допоміжні: зберігання; оброблення вантажу; комп'ютерна підтримка; облік.

Вона може бути поділена на такі підсистеми:

Юридична. Забезпечує відповідність всіх операцій чинним законам, нормативним актам та етичним стандартам. Це охоплює широкий спектр діяльності, від контрактних угод з постачальниками та партнерами до дотримання норм і стандартів у сфері охорони здоров'я.

Медична. Фокусується на клінічних аспектах медичної логістики, гарантуючи, що ліки та ВМП є належними, безпечними та відповідають конкретним потребам медичних працівників та пацієнтів.

Інформаційно-технологічна. Відповідає за інтеграцію технологій для управління інформацією, автоматизації процесів і полегшення комунікації, тим самим підвищуючи ефективність, точність і надійність логістичних операцій.

Управління ланцюгами поставок. Керує закупівлею, зберіганням і розподілом ліків та ВМП. Підсистема гарантує, що потрібні товари будуть доступні в потрібний час і в потрібному стані. Основні функції включають управління запасами, прогнозування попиту та взаємодію з постачальниками.

Фінансова. Відповідає за управління фінансовими аспектами операцій медичної логістики. Це включає бюджетування, відстеження та оптимізацію витрат, виставлення рахунків та фінансову звітність.

На рис. 2.5 наведена структура системи медичної логістики.



Рис. 2.5. Структура системи медичної логістики

У табл. 2.2 наведено матрицю відповідності між функціями та підсистемами, що відповідають за них.

Таблиця 2.2 – Матриця відповідності між підсистемами та функціями, які вони виконують

		Юридична	Медична	Інформаційно – технологічна	Ланцюги поставок	Фінансова
Базові:						
1.	Замовлення	X		X	X	
2.	Постачання			X	X	
3.	Розподіл		X		X	
Ключові:						
4.	Управління закупівлями			X		X
5.	Транспортування			X	X	
6.	Управління запасами			X	X	
7.	Фізичний розподіл		X		X	
Допоміжні:						
8.	Зберігання			X	X	X
9.	Оброблення вантажу	X	X	X		
10.	Комп'ютерна підтримка	X	X	X	X	X
11.	Облік	X				X

Опишемо більш детально алгоритм відкриття регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів і організацію перевезень ліків та виробів медичного призначення (процеси 5 – Визначення субрегіональних центрів та центрів дистрибуції, 6 – Збір та узагальнення інформації від закладів-отримувачів та 11 – Визначення плану транспортування з діаграми на рис. 2.2).

1. МОЗ надає запит про потреби у ліках та ВМП з регіонів до відповідних ДОЗ.
2. Регіональні ДОЗи збирають дані про потреби в медичній допомозі, кількість населення та інфраструктурні можливості різних регіонів.
3. На основі наданої інформації від регіональних ДОЗ МОЗ вирішує, які регіональні центри будуть відкриті. Це рішення приймається на урядовому рівні і передбачає

врахування таких факторів, як географічне покриття, щільність населення та специфічні медичні потреби. В результаті готується звіт для МОЗ.

4. МОЗ визначає потенційні субрегіональні центри з набору наявних обласних медичних закладів.
5. Регіональні ДОЗи оцінюють потенційні субрегіональні центри, запропоновані МОЗ, щоб визначити їхню придатність на основі місцевих потреб у сфері охорони здоров'я та логістики.
6. Плановий підрозділ ДОЗ проводять детальний аналіз потенційного попиту на ліки та ВМП та планують можливий попит.
7. На основі планування попиту ДОЗ обирають певну кількість субрегіональних центрів переліку МОЗ, які будуть активовані.
8. Відповідно до запитів за потребами та створеному передбачуваному плану попиту, ліки та ВМП класифікуються таким чином: імунобіологічні препарати; гуманітарна допомога; медичні препарати; медичне обладнання; витратні матеріали.
9. Для кожної категорії медичних товарів ДОЗ визначає чи буде підхід до надання допомоги стаціонарним або мобільним, а саме:
 - визначається необхідність стаціонарних та мобільних пунктів вакцинації;
 - визначається необхідність стаціонарних та мобільних пунктів розподілу гуманітарної допомоги;
 - вироби медичного призначення можуть направлятись у стаціонарні медичні заклади або у мобільні пункти.
10. Активація або розміщення центрів дистрибуції:
 - для стаціонарної форми надання медичної допомоги, ДОЗ активує наявні об'єкти або створює (розміщує) нові (у випадку непокриття попиту наявними) в якості ЦД;
 - для мобільної форми надання медичної допомоги, ДОЗ приймає рішення про розміщення мобільних ЦД;

11. ДОЗ здійснює постійний моніторинг ефективності роботи та попиту в центрах, здійснює необхідні корективи для задоволення мінливих потреб населення в медичній допомозі.

12. ДОЗ покладає на регіональні центри відповідальність за побудову плану транспортування відповідно до наявних та запланованих потреб.

Схематичне подання алгоритму ілюструє діаграма на рис. 2.6

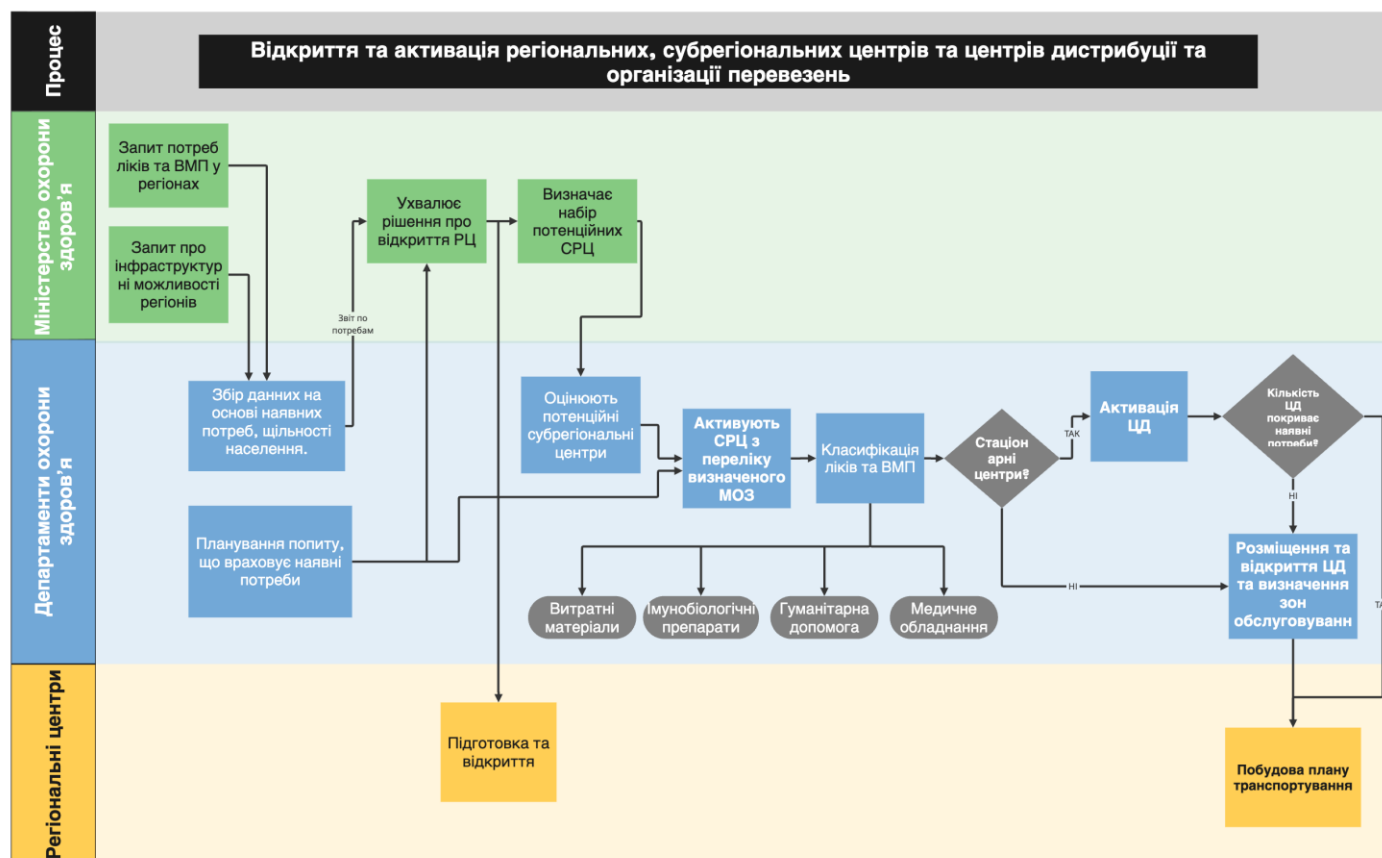


Рис. 2.6. Відкриття та активація регіональних, субрегіональних центрів та центрів дистрибуції та організації перевезень

Процес відкриття регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів з організацією перевезень ліків та виробів медичного призначення (рис. 2.6) має певні слабкі сторони, а саме:

- масштабування інфраструктури відбувається на основі прийняття разових адміністративних рішень, без системного урахування просторових та логістичних

факторів, що призводить до необ'єктивності та неузгодженості між різними вертикалями управління;

- задачі розміщення центрів, планування транспортних маршрутів і розподілу ліків та виробів медичного призначення вирішуються без застосування засобів математичного та комп'ютерного моделювання, значно залежать від кваліфікації і досвіду експерта, що несе ризики збільшення транспортно-логістичних витрат та негативно позначається на доступності медичної допомоги, організації маршрутів пацієнтів і раціональному використанні ресурсів;
- відсутність механізмів оперативного реагування на зміну поточної ситуації (руйнування об'єктів медичної інфраструктури), зростання потреб населення в окремих видах медичної допомоги та послуг, які раніше не були пріоритетними.

Наявність цих аспектів підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на покращення процесів прийняття рішень при плануванні матеріальних потоків у системах медичної логістики.

2.3. Компоненти системи медичної логістики

Медична логістика охоплює широкий спектр видів діяльності, що є життєво важливими для забезпечення ефективного, безпечного та надійного надання медичних послуг і товарів. Наведемо опис ключових компонентів медичної логістики та будемо враховувати, серед інших, сортування, контроль, облік, перевірку якості та боротьбу з корупцією.

Компоненти медичної логістики:

- *Закупівлі*: придбання ліків та ВМП, забезпечення відповідності продукції необхідним стандартам і специфікаціям. Переговори щодо укладання контрактів, управління взаємодія з постачальниками та забезпечення етичного вибору постачальників (Головна MedData, 2025).
- *Управління резервами*: ефективне управління запасами має вирішальне значення для уникнення дефіциту або надмірних запасів. Воно передбачає прогнозування попиту,

встановлення рівня запасів та впровадження систем контролю резервів для відстеження їх руху і термінів придатності.

- *Зберігання*: належні умови зберігання є важливими для збереження цілісності медичних виробів. Це поєднує зберігання фармацевтичних препаратів з контрольованою температурою, безпечне зберігання підконтрольних речовин та організацію складів для ефективного пошуку та розподілу.
- *Транспортування*: планування оптимальних маршрутів, управління постачальниками логістичних послуг, а також забезпечення безпечної та своєчасної доставки продукції в медичні заклади, аптеки та безпосередньо отримувачам.
- *Контроль та забезпечення якості*: впровадження заходів контролю якості по всьому логістичному ланцюгу гарантує, що вся продукція відповідає стандартам охорони здоров'я та безпеки. Це включає регулярні перевірки, дотримання протоколів зберігання та обробки, а також моніторинг умов транспортування.
- *Запобігання корупції*: впровадження перевірок та заходів для запобігання корупції, шахрайству та крадіжкам у ланцюгу постачання. Сюди входять аудити, ініціативи з прозорості та заходи безпеки для захисту дорогої або чутливої продукції.
- *Сталий розвиток та зниження викидів*: розвиток сталих логістичних практик, включаючи скорочення відходів, програми переробки та екологічно чисті пакувальні рішення, набуває все більшого значення.

Схематично компоненти медичної логістики наведено на рис. 2.7. Перейдемо до опису структури інформаційної системи медичної логістики (рис. 2.8).

Система електронного документообігу використовується для управління, зберігання та відстеження електронних документів та електронних зображень паперової інформації. У медичній логістиці СЕВ (*Система електронної взаємодії (СЕВ)*, 2012) допомагає впорядкувати роботу з медичними картками пацієнтів, платіжною інформацією та документами, що відповідають нормативним вимогам. Додатково може бути застосовані системи електронних підписів. Приклади таких систем: *Microsoft Office 365*, *АСКОД* тощо.

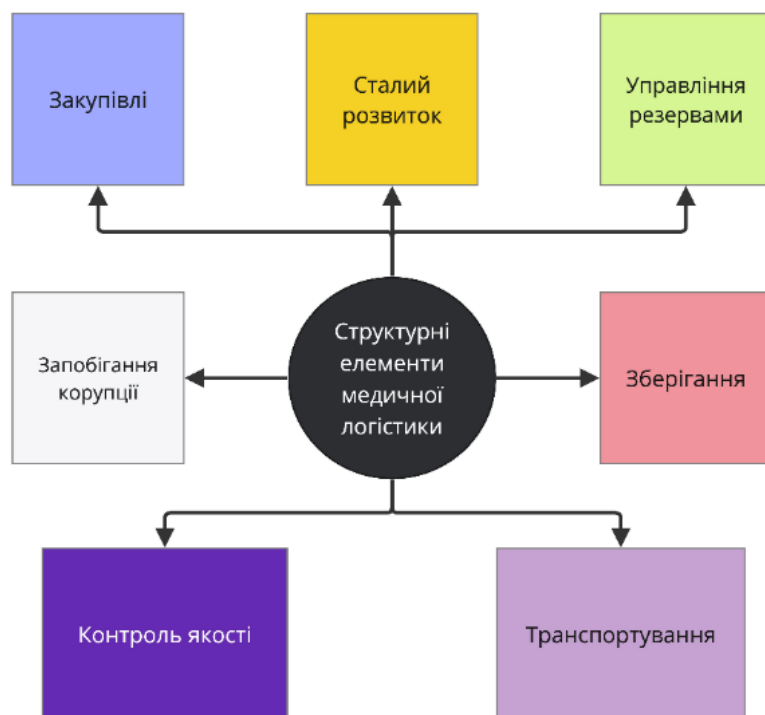


Рис. 2.7. Компоненти медичної логістики

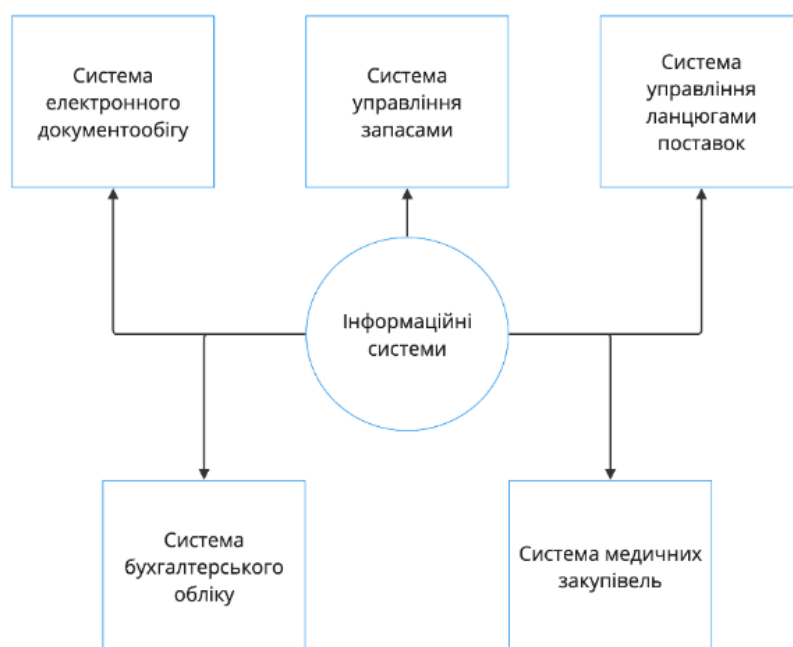


Рисунок 2.8. Інформаційна система медичної логістики

Системи управління запасами допомагають медичним закладам більш ефективно управляти запасами медичних матеріалів та обладнання. Вони відстежують рівень запасів, точки повторного замовлення та керують обігом запасів. Маючи дані про медичні запаси в режимі реального часу, лікарні можуть уникнути надлишкових запасів або дефіциту, забезпечити наявність критично важливих медичних матеріалів і зменшити витрати, пов'язані з надлишковими запасами. Приклад таких систем: (*Головна — Med Data, 2025*) та (*Система e-Stock, 2023*).

Системи управління ланцюгами поставок – це система, яка орієнтована на інтегроване управління всіма інформаційними потоками, що стосуються сировини, продукції та послуг в рамках логістичної та виробничої процесів компанії. Метою є досягнення вимірюваних загальних показників економічної вигоди, таких як зниження витрат і задоволення попиту на кінцеву продукцію. Система управління ланцюгами поставок передбачає систематичну, стратегічну координацію традиційних бізнес-функцій всередині компанії та по всьому ланцюгу поставок для покращення довгострокових результатів діяльності окремих компаній та ланцюга поставок в цілому. Приклад таких систем, що застосовуються: IT Enterprise SCM.

Система бухгалтерського обліку – використовуються для управління фінансовими операціями, включаючи закупівлю медичних товарів, відстеження витрат і бюджетування логістичних операцій. Вони допомагають забезпечити правильний облік і аудит усіх фінансових операцій, що використовуються для прозорості та дотримання нормативних вимог. Приклади таких систем: (*ISPro, 1990*).

Система медичних закупівель. Керується державним підприємством, яке відповідальне за централізовану закупівлю медичних товарів за кошти державного бюджету. Його було створено з метою підвищення прозорості, ефективності та економічності державних закупівель медичних товарів, що стало відповіддю на поширену корупцію в попередніх системах. Роль підприємства полягає у формуванні політики закупівель без безпосереднього виконання, що дозволяє спеціалізованим міжнародним організаціям керувати закупівлями на початковому етапі. Зокрема, Агенція

«Медичні закупівлі України» прагне перейняти провідні практики та механізми цих організацій для забезпечення ефективних медичних закупівель.

Наявні підсистеми не забезпечують комплексного вирішення нагальних проблем, пов'язаних із розміщенням центрів, побудовою транспортних маршрутів і розподілом ліків та виробів медичного призначення, що підкреслює необхідність розробки інтегрованої системи для планування мережі регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів та побудови плану перевезень на основі формалізованих математичних моделей та методів.

2.4. Постановка проблеми масштабування системи медичної логістики

Сформулюємо проблему масштабування системи медичної логістики, враховуючи описаний вище алгоритм відкриття регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів та побудови плану перевезень.

Задача розміщення-активації. У разі виникнення критичної ситуації в регіоні з'являється нагальна потреба в оперативному та ефективному розподілі основних медичних засобів, таких як ліки і вироби медичного призначення, серед населення. Це може статися, наприклад, під час епідемій, природних катастроф, чи інших надзвичайних подій, коли швидке забезпечення громадян необхідними медикаментами є пріоритетним завданням.

Для забезпечення такої оперативності, в кожному регіоні визначено N регіональних центрів та M субрегіональних центрів, які виконують функцію первинних пунктів розподілу медичних засобів. Ці центри відіграють ключову роль у логістичній мережі, забезпечуючи отримання, зберігання та первинний розподіл ліків та ВМП до подальших етапів дистрибуції. Враховуючи обмеженість наявних матеріальних і фінансових ресурсів та необхідність їх ефективного використання, потребу у забезпеченні надійного транспортування, урядом може бути активовано лише L з M субрегіональних центрів. Вибір центрів, які підлягають активації, здійснюється на основі кількох критеріїв, які включають географічне розташування, доступність і надійність транспортних шляхів,

емність зберігання, вартість відкриття центру та можливість швидкого реагування на надзвичайні ситуації.

Активовані субрегіональні центри здійснюватимуть перерозподіл медичних товарів до K центрів дистрибуції, які або вже функціонують або стратегічно мають бути розміщені в області. Ці центри відповідають за подальший розподіл ліків та ВМП безпосередньо до кінцевих споживачів – населення своїх зон обслуговування.

Завданням планування є визначення комбінації регіональних і субрегіональних центрів, оптимальне розміщення центрів дистрибуції і визначення зон їх обслуговування. Крім того, необхідно розробити раціональний план транспортування ліків та ВМП від субрегіональних центрів до центрів дистрибуції і, далі, до кінцевих споживачів. Основною метою цього планування є мінімізація загальних транспортних витрат при одночасному забезпеченні повного задоволення потреб кожної установи та кінцевих споживачів у необхідних ліках та ВМП.

Схему описаної системи транспортування показано на рис. 2.9. На ній зображено 1 регіональний центр, 3 субрегіональні центри та 6 центрів дистрибуції. Неактивовані субрегіональні центри позначені більш прозорим кольором, що дозволяє швидко ідентифікувати його у мережі та розуміти, який з них наразі не функціонує у контексті розподілу медичних засобів.

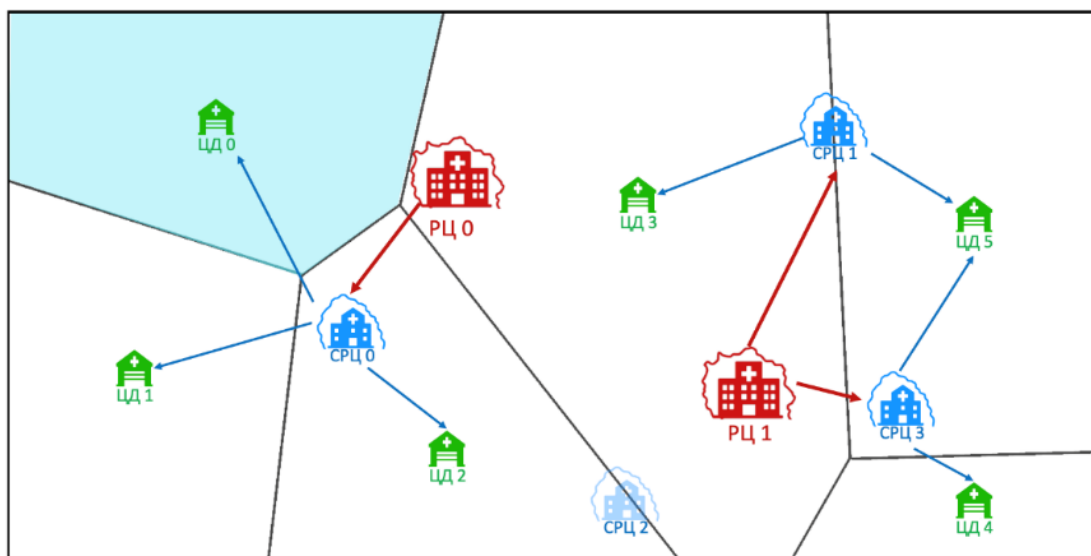


Рис. 2.9. Візуалізація предметної постановки задачі

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено системний аналіз розподільчих процесів медичної логістики. Досліджено систему медичної логістики на прикладі регіонального рівня в Україні з акцентом на вдосконалення процесів ухвалення рішень щодо розвитку інфраструктури. Проведений аналіз висвітлив актуальність та необхідність створення більш стійкої та адаптивної логістичної інфраструктури, особливо в умовах кризових ситуацій, таких як пандемії чи стихійні лиха, коли існує підвищений попит на ліки та медичні вироби.

Було ідентифіковано ключові компоненти системи медичної логістики, серед яких Верховна Рада України, Міністерство охорони здоров'я України, регіональні та субрегіональні центри, а також центри дистрибуції. Розглянуто детальний алгоритм організації системи медичної логістики у кризових ситуаціях, що включає етапи затвердження бюджетних програм, розподіл ресурсів, визначення центрів дистрибуції, планування транспортування та моніторинг ефективності роботи системи.

Застосування системного підходу та нотації IDEF0 дозволило структурувати процеси надання медичної допомоги та організації логістичної інфраструктури, що сприяє підвищенню ефективності та прозорості операцій. Аналіз внутрішніх та зовнішніх учасників процесу підкреслив важливість координації між різними рівнями управління та постачальниками. Визначено алгоритм дій, що передують масштабуванню системи медичної логістики під час кризових ситуацій.

Визначено необхідність інтеграції інформаційних підсистем, таких як системи електронного документообігу, управління запасами та ланцюгами поставок, для забезпечення оперативного та точного обліку медичних ресурсів. Крім того, підкреслено важливість фінансового управління та запобігання корупції для забезпечення прозорості та ефективності медичних закупівель.

При аналізі наявного процесу відкриття регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів з організації перевезень ліків та виробів медичного призначення було виявлено низку недоліків. Зокрема, масштабування інфраструктури відбувається на

основі разових адміністративних рішень без урахування просторових і логістичних факторів, що призводить до неузгодженості управлінських рішень на різних рівнях. Прийняття рішень про розміщення центрів, планування маршрутів і розподілу ресурсів здійснюється без використання математичних і комп'ютерних методів, що підвищує ризики зростання транспортно-логістичних витрат і знижує оперативність надання медичних послуг. Крім того, відсутні механізми швидкого реагування на руйнування об'єктів медичної інфраструктури та зміни структури попиту на медичні послуги. Наявні підсистеми не забезпечують комплексного вирішення цих завдань, що підкреслює необхідність розробки інтегрованої системи для планування мережі регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів та побудови плану перевезень на основі формалізованих математичних моделей та методів.

Проведено аналіз послідовних задач, пов'язаних зі збором та обробкою запитів на медичні засоби від регіональних департаментів охорони здоров'я (ДОЗ), визначення оптимальної кількості та розміщення субрегіональних центрів, а також організації ефективної мережі дистрибуції для задоволення потреб населення у кризових ситуаціях. Відповідно до існуючого алгоритму відкриття регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів і організації перевезень було сформульовано актуальну проблему масштабування, що підлягає вирішенню.

Отримані результати свідчать про складність та багатогранність системи медичної логістики на регіональному рівні, що вимагає постійного вдосконалення та адаптації до змінних умов.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЕТАПНИХ НЕПЕРЕРВНО-ДИСКРЕТНИХ ЗАДАЧ РОЗМІЩЕННЯ-АКТИВАЦІЇ

3.1. Класифікація задач розміщення-активації

Розглянемо сформульовану у розділі 2 задачу розміщення-активації та її можливі варіанти, з огляду на область розміщення центрів. Описана задача включає три види центрів розподілу ліків (РЦ, СРЦ, ЦД) і відповідно три етапи перевезень. Кожна група центрів може бути визначеною заздалегідь або підлягати визначенню у процесі прийняття рішень (при розв'язуванні задачі), при цьому центри можуть обиратися із деякої скінченної множини визначених заздалегідь можливих місць розміщення (задача активації) або бути розміщені у будь-якій точці області (задача розміщення). Вважаємо, що кінцеві споживачі неперервно розподілені у заданій області і отримують постачання лише з того центру дистрибуції, до зони обслуговування якого вони належать. Ємність центрів кожного етапу також може бути визначеною, або обчислюватися у процесі розв'язування задачі. Отже, можна сформулювати наступні варіанти задачі розміщення/активації.

1. Фіксовані центри дистрибуції, активація регіональних і субрегіональних центрів.

Передбачаємо, що центри дистрибуції і їх потреба у товарах медичного призначення є визначеною, зони обслуговування відомі. Необхідно сформувати мережу регіональних та субрегіональних центрів для яких відомо місця їх потенційного розташування, ємність і вартість транспортування між ними та до центрів дистрибуції, і визначити план транспортування від регіональних центрів до субрегіональних і далі до центрів дистрибуції, який забезпечить задоволення потреб центрів дистрибуції з мінімальними сумарними витратами на транспортування і активацію центрів.

2. Фіксовані регіональні центри, активація субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування.

В цій задачі передбачається, що регіональні центри визначені і фіксовані, субрегіональні центри активуються із наперед заданої множини можливих місць розміщення, центри дистрибуції, максимальна кількість яких відома, розміщуються у заданій області. Визначенню підлягають: субрегіональні центри, які активуються, місця розташування центрів дистрибуції, зони їх обслуговування, ємність та план транспортування від регіональних центрів до субрегіональних і далі від субрегіональних до центрів дистрибуції.

3. Фіксовані регіональні та субрегіональні центри, розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування.

Передбачаємо, що регіональні та субрегіональні центри відомі і фіксовані, центри дистрибуції, максимальна кількість яких задана, розміщуються у заданій області. Визначенню підлягають: місця розташування, ємність та зони обслуговування кожного центра дистрибуції та план перевезень від субрегіональних центрів до центрів дистрибуції.

4. Фіксовані регіональні центри, розміщення субрегіональних та дистрибуційних центрів з визначенням їх зон обслуговування.

В цій задачі передбачається, що регіональні центри визначені і фіксовані, задана максимальна кількість субрегіональних та дистрибуційних центрів, які можуть бути розміщені у відомій області. Визначенню підлягають координати субрегіональних центрів та центрів дистрибуції, зони обслуговування кожного центра дистрибуції, їх ємність і план транспортування від регіональних центрів до субрегіональних і далі від субрегіональних до центрів дистрибуції.

5. Активація регіональних і субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції. В цій задачі визначенню підлягають місця розташування всіх центрів (регіональних, субрегіональних і дистрибуції), при цьому для регіональних і субрегіональних центрів місця їх потенційного розташування, вартість транспортування між ними і ємність (задача активації), а визначена кількість центрів дистрибуції розміщується у заданій області. Зони обслуговування кожного центра дистрибуції, їх ємність і план

транспортування між регіональними, субрегіональними і дистрибуційними центрами підлягає визначенню.

6. Активація субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції.

Ця задача відрізняється від попередніх тим, що регіональні центри або відсутні, або не беруться до уваги, оскільки транспортування від регіонального центру є заданим. Визначенню підлягають субрегіональні центри, які будуть активовані, місця розміщення центрів дистрибуції, зони їх обслуговування та план перевезень від субрегіональних центрів до центрів дистрибуції.

Цей сценарій є актуальним у кризових умовах, коли необхідно швидко адаптувати існуючу інфраструктуру до нових викликів. Описані варіанти візуалізовано на рис. 3.1.

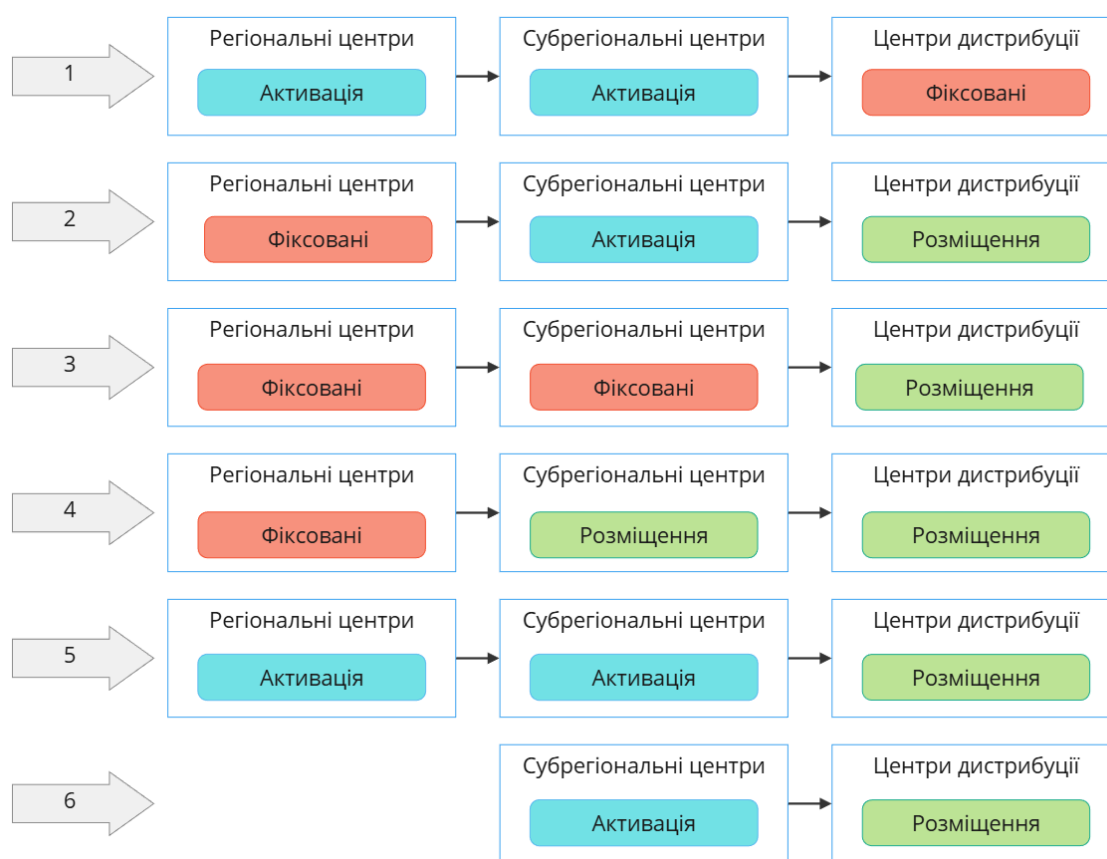


Рис. 3.1. Класифікація задач розміщення-активації

Побудуємо математичні моделі задач розміщення-активації, враховуючи такі припущення:

- вартість перевезення лінійно залежить від кількості транспортованих одиниць об'ємної ваги ліків та ВМП;
- рух матеріальних потоків дозволений лише в такому напрямку:

$$РЦ \rightarrow СРЦ \rightarrow ЦД \rightarrow \text{кінцевий споживач},$$

транзит через інші вузли не допускається;

- кожен споживач обслуговується лише одним центром дистрибуції, і кожен ЦД здійснює постачання лише у своїй зоні обслуговування;
- обсяги перевезень вимірюються в одиницях об'ємної ваги;
- весь попит кінцевих споживачів має бути задоволений;
- неактивний центр має нульову пропускну здатність;
- розглядаються спрощені перевезення (план транспортування) у вигляді потоків між центрами без деталізації графіків руху. У разі практичного впровадження модель може бути розширена до задач маршрутизації транспортних засобів.

3.2. Математична модель багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією регіональних та субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції

Припустимо, що відомі:

- K – загальна кількість доступних для активації регіональних центрів;
- J – необхідна кількість регіональних центрів;
- M – загальна кількість доступних для активації субрегіональних центрів;
- L – необхідна кількість субрегіональних центрів;
- N – кількість центрів дистрибуції.

Метою задачі є мінімізація загальних транспортних витрат на доставку ліків та ВМП з регіональних центрів до ЦД та вибір оптимальних локацій для регіональних та субрегіональних центрів. Транспортні витрати включають:

- c_{kj}^{II} – вартість транспортування одиниці об’ємної ваги ліків та ВМП з регіонального центру k до субрегіонального центра j ($j = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}$);
- c_{ij}^I – вартість транспортування одиниці об’ємної ваги ліків та ВМП з субрегіонального центру j до центра дистрибуції i ($i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}$).

Також відомо:

- A_j – операційні витрати при активації субрегіонального центру j ($j = \overline{1, M}$);
- P_k – операційні витрати при активації регіонального центру k ($k = \overline{1, K}$);
- b_k^{III} – ємність регіонального центру k ($k = \overline{1, K}$);
- b_j^{II} – ємність субрегіонального центру j ($j = \overline{1, M}$);
- b_i^I – потреба центру дистрибуції i ($i = \overline{1, N}$).

Невідомими у задачі є

- v_{kj}^{II} – кількість одиниць об’ємної ваги ліків та ВМП, перевезених з регіонального центру k до субрегіонального центру j ($j = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}$);
- v_{ij}^I – кількість одиниць об’ємної ваги ліків та ВМП, перевезених з субрегіонального центру j до центра дистрибуції i ($i = \overline{1, N}$);
- γ_k – булева змінна, де $\gamma_k = 1$, якщо активовано регіональний центр k , $\gamma_k = 0$ в іншому випадку ($k = \overline{1, K}$);
- θ_j – булева змінна, де $\theta_j = 1$, якщо активовано субрегіональний центр j , $\theta_j = 0$ в іншому випадку ($j = \overline{1, M}$).

Маємо задачу А-1:

$$\min_{v^I, v^{II}, \gamma, \theta} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M c_{kj}^{II} v_{kj}^{II} + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N c_{ij}^I v_{ij}^I + \sum_{k=1}^K P_k \gamma_k + \sum_{j=1}^M A_j \theta_j, \quad (3.1)$$

враховуючи такі обмеження:

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq b_j^{II} \theta_j, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} \leq b_k^{III} \gamma_k, \quad \forall k = \overline{1, K}, \quad (3.3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_{ij}^I, \quad (3.4)$$

$$\sum_{k=1}^K \gamma_k \leq J, \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I \geq b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (3.7)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{kj}^{II} = b_j^{II} \theta_j, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad (3.8)$$

$$\sum_{k=1}^K \gamma_k b_k^{III} \geq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j \geq \sum_{i=1}^N b_i^I. \quad (3.9)$$

В (3.1) перший доданок відображає загальні транспортні витрати на доставку ліків та ВМП із регіональних центрів до субрегіональних центрів, другий – транспортні витрати на доставку лікарських засобів та ВМП із субрегіональних центрів до центрів дистрибуції, третій та четвертий враховують операційні витрати на активацію регіональних та субрегіональних центрів. Обмеження моделі: (3.2) – на ємність субрегіональних центрів, тобто кількість ліків та ВМП, перевезених з кожного субрегіонального центру, має бути не більшою ніж їх ємність; (3.3) вимагає, щоб кількість ліків та ВМП, перевезених з кожного регіонального центру, не перевищувала його ємність; (3.4) – рівняння балансу між першим та другим етапами медичної логістики. Обмеження (3.5) та (3.6) встановлюють ліміт на максимальну кількість активованих регіональних та субрегіональних центрів. Умова (3.7) гарантує, що кількість ліків та ВМП, отриманих кожним ЦД не менше ніж його потреби, (3.8) означає, що ліки та ВМП не транспортуються в неактивований СРЦ, а для активованого центру відповідають його потребам. (3.9) вказує на те, що сумарна ємність активованих регіональних і субрегіональних центрів має бути спроможною забезпечити потреби всіх центрів дистрибуції. Схематично, багатоетапна дискретна задача активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції представлена на рис. 3.2.

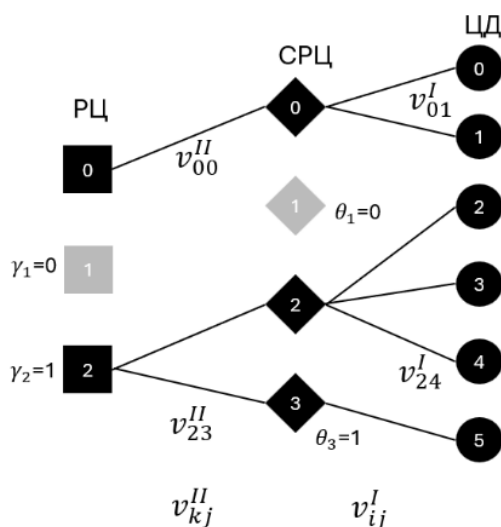


Рис. 3.2. Схематичне подання багатоетапної дискретної задачі активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції

Як бачимо, побудована математична модель (3.1) – (3.9), описує задачу дискретної оптимізації. Вона належить до класу NP-складних, оскільки потребує побудови багаторівневого плану транспортування одночасно з активацією центрів із відомого набору, що спричиняє збільшення кількості можливих розв’язків. Точні методи розв’язання для таких задач можуть бути обчислювально неефективними коли кількість центрів є великою, тому для пошуку наближених оптимальних рішень доцільно застосовувати метаевристичні підходи (генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок, мурашині алгоритми та інші).

3.3. Математична модель багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією субрегіональних центрів, розміщенням центрів дистрибуції та фіксованими регіональними центрами

Нехай Ω – обмежена, замкнена двовимірна множина, $\tau_i \in \Omega, i = \overline{1, N}$ – дистрибуційні центри, які необхідно розмістити.

Позначимо:

- Ω_i – область обслуговування центра дистрибуції $i, i = \overline{1, N}$;
- N – необхідна кількість центрів дистрибуції;
- M – загальна кількість доступних для активації СРЦ;
- K – відома кількість РЦ;
- L – максимальна кількість СРЦ, які можуть бути активовані;
- b_j^{II} – ємність j -го субрегіонального центру, $j = \overline{1, M}$;
- b_k^{III} – ємність k -го регіонального центру, $k = \overline{1, K}$;
- $c_i^I = c(x, \tau_i^I)$ – вартість транспортування одиниці об’ємної ваги ліків та ВМП від центра дистрибуції з координатами τ_i^I до споживача $x \in \Omega, i = \overline{1, N}$;

- $c_{ij} = c(\tau_j^{II}, \tau_i^I)$ – вартість транспортування ліків та ВМП від субрегіонального центра з координатами τ_j^{II} ($j = \overline{1, M}$) до центра дистрибуції з координатами τ_i^I ($i = \overline{1, N}$).
- $c_{kj} = c(\tau_k^{III}, \tau_j^{II})$ – вартість транспортування ліків та ВМП від регіонального центра з координатами τ_k^{III} ($k = \overline{1, K}$) до субрегіонального центра з координатами τ_j^{II} ($j = \overline{1, M}$).
- $\rho(x)$ – попит на ліки та ВМП в точці x в області Ω ;
- A_j – витрати на активацію j -го субрегіонального центра, $j = \overline{1, M}$;
- $\tau_i^r = (\tau_{i1}^r, \tau_{i2}^r)$ – координати центра дистрибуції ($r=I$) або субрегіонального центра ($r=II$) або регіонального центра ($r=III$);
- v_{ij}^I – кількість одиниць об'ємної ваги ліків та ВМП, що транспортується від субрегіонального центра j до центра дистрибуції i , $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$;
- v_{kj}^{II} – кількість одиниць об'ємної ваги ліків та ВМП, що транспортується від регіонального центра k до субрегіонального j , $k = \overline{1, K}, j = \overline{1, M}$.
- $\theta_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо СРЦ } j \text{ активований,} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, j = \overline{1, M}.$

Сумарні витрати на активацію субрегіональних центрів та транспортування ліків та ВМП можна описати таким чином:

$$\sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} v_{ij}^I + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M c_{kj} v_{kj}^{II}.$$

Обмеження задачі:

- Кількість одиниць об'ємної ваги та ліків та ВМП, доставленої до i -го центра дистрибуції дорівнює його потребам:

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I = \int_{\Omega_i} \rho(x) dx, \quad i = \overline{1, N}.$$

- Кількість одиниць об'ємної ваги та ліків та ВМП, вивезеної з j -го субрегіонального центра не більше його ємності:

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}.$$

- Кількість одиниць об'ємної ваги та ліків та ВМП, вивезеної з k -го регіонального центра не більше його запасів:

$$\sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} \leq b_k^{III}, \quad k = \overline{1, K}.$$

- Потреби всіх споживачів мають бути забезпечені активованими РЦ:

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx \leq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j,$$

- Кількість активованих субрегіональних центрів не перевищує L , ($L > 0$):

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L,$$

- Сумарна ємність регіональних і активованих субрегіональних центрів має бути спроможною забезпечити потреби всіх центрів дистрибуції:

$$\sum_{k=1}^k b_k^{III} \geq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j \geq \int_{\Omega} \rho(x) dx,$$

- Неактивовані СРЦ не мають транспортних надходжень з РЦ, а для активованого центру задовольняють його потребам:

$$\sum_{k=1}^K v_{kj}^{II} = \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M},$$

- Зони обслуговування центрів дистрибуції включають всю область Ω :

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega.$$

- Кожен споживач обслуговується лише одним центром дистрибуції:

$$mes\left(\Omega_i \cap \Omega_j\right) = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, N}.$$

Тоді математична модель набуває такого вигляду:

Задача **P-A-1**.

$$\min_{\tau^I, \theta, v^I, v^{II}, \Omega_i} \sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} v_{ij}^I + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M c_{kj} v_{kj}^{II}, \quad (3.10)$$

за таких обмежень

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I = \int_{\Omega_i} \rho(x) dx, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3.11)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.12)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} \leq b_k^{III}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (3.13)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{kj}^{II} = \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.14)$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx \leq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j, \quad (3.15)$$

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad (3.16)$$

$$\sum_{k=1}^K b_k^{III} \geq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j \geq \int_{\Omega} \rho(x) dx, \quad (3.17)$$

$$\tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I \dots \tau_N^I), \tau^I \in \Omega^N, \quad (3.18)$$

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \quad (3.19)$$

$$mes(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, N}, \quad (3.20)$$

$$v_{ij}^I \geq 0, v_{kj}^II \geq 0, \theta_j \in \{0; 1\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, K} \quad (3.21)$$

Схематично багатоетапна неперервно-дискретна задача активації субрегіональних центрів з розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції і фіксованими регіональними центрами представлена на рис. 3.3.

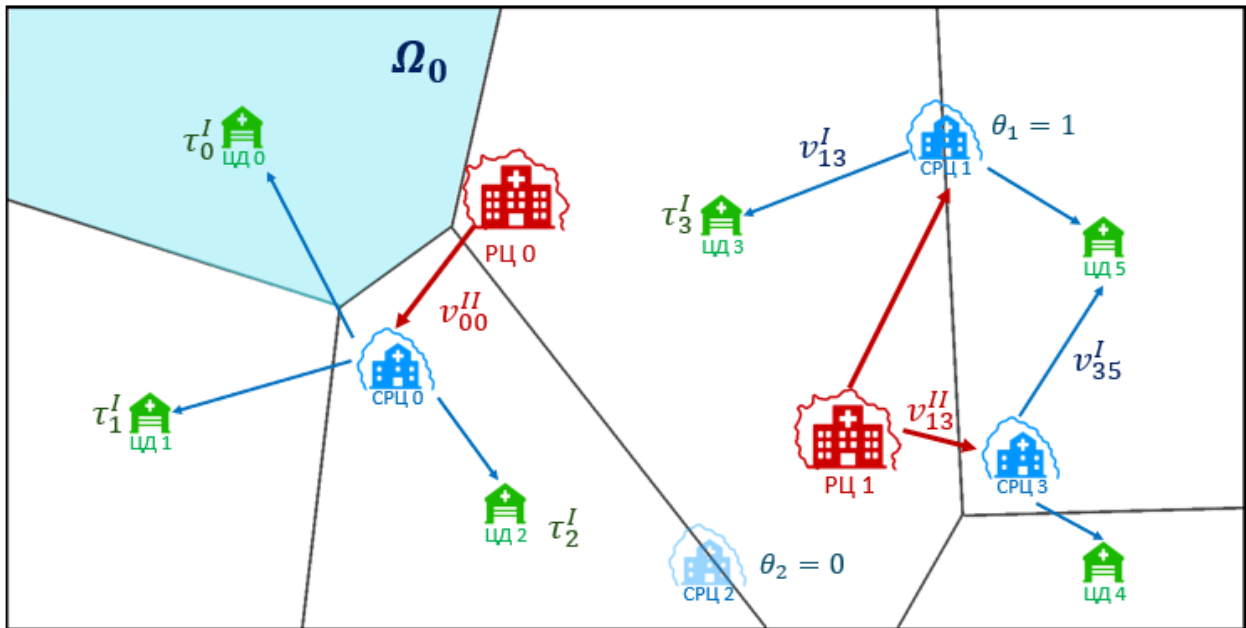


Рис. 3.3. Схематичне представлення багатоетапної неперервно-дискретної задачі активації субрегіональних центрів з розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції та фіксованими регіональними центрами

Перший доданок цільового функціоналу відображає витрати на активацію субрегіональних центрів, другий – витрати, пов'язані з розміщенням центрів дистрибуції

та визначенням зон їх обслуговування, третій і четвертий доданки враховують витрати на транспортування між етапами. Як бачимо, сформульована задача мінімізації (3.10) – (3.21) включає дискретні та неперервні компоненти і є неперервно-дискретною задачею оптимізації, де присутня неперервна складова для розміщення ЦД і дискретна для активації СРЦ. Отже, для розв'язання потрібне застосування комбінованих підходів, які включають поєднання методів дискретної і неперервної оптимізації, зокрема метаевристичні підходи для дискретної складової і методи ОРМДЗ для неперервної.

Слід зазначити, що навіть окремо кожна з цих задач є складною і нетривіальною для розв'язування. Їх інтеграція в межах єдиної комбінованої моделі підвищує якість рішення, але суттєво підвищує складність процесу розв'язання, що зумовлює потребу у пошуку більш ефективних методів і підходів.

3.4. Математична модель багатоетапного процесу розподілу ліків та виробів медичного призначення з активацією субрегіональних центрів і розміщенням центрів дистрибуції

Для цього випадку характерна відсутність регіональних центрів. Враховуються субрегіональні центри, які потребують активації та дистрибуційні центри, що потребують розміщення.

Позначимо:

- Ω_i – область обслуговування центра дистрибуції, $i = \overline{1, N}$;
- N – необхідна кількість центрів дистрибуції;
- M – загальна кількість доступних для активації СРЦ;
- L – максимальна кількість можливо активованих СРЦ;
- b_j^I – ємність j -го субрегіонального центру, $j = \overline{1, M}$;
- $c_i^I = c(x, \tau_i^I)$ – вартість транспортування одиниці об'ємної ваги ліків та ВМП від центра дистрибуції з координатами τ_i^I до споживача $x \in \Omega$, $i = \overline{1, N}$;

- $c_{ij} = c(\tau_j^I, \tau_i^I)$ – вартість транспортування ліків та ВМП від субрегіонального центра з координатами τ_j^I ($j = \overline{1, M}$) до центра дистрибуції з координатами τ_i^I ($i = \overline{1, N}$).
- $\rho(x)$ – попит на ліки та ВМП в точці x в області Ω ;
- A_j – витрати на активацію j -го субрегіонального центру, $j = \overline{1, M}$;
- $\tau_i^r = (\tau_{i1}^r, \tau_{i2}^r)$ – координати центра дистрибуції ($r=I$) або субрегіонального центру ($r=II$);
- v_{ij}^I – кількість одиниць об'ємної ваги ліків та ВМП, що транспортується від субрегіонального центра j до центра дистрибуції i , $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}$;
- $\theta_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо СРЦ } j \text{ активований,} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, j = \overline{1, M}$;

Сумарні витрати на активацію субрегіональних центрів та транспортування ліків та ВМП можна описати таким чином:

$$\sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} v_{ij}^I.$$

З такими обмеженнями:

- Кількість одиниць об'ємної ваги та ліків та ВМП, доставленої до i -го центра дистрибуції дорівнює його потребам:

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I = \int_{\Omega_i} \rho(x) dx, \quad i = \overline{1, N}.$$

- Кількість одиниць об'ємної ваги та ліків та ВМП, вивезеної з j -го субрегіонального центра не більше його потужності:

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}.$$

- Потреби всіх споживачів мають бути забезпечені:

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx \leq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j.$$

- Кількість активованих субрегіональних центрів не перевищує L , ($L > 0$):

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L.$$

- Зони обслуговування центрів дистрибуції включають всю область Ω :

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega.$$

- Кожен споживач обслуговується лише одним центром дистрибуції:

$$mes\left(\Omega_i \cap \Omega_j\right) = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, N}.$$

Тоді математична модель набуває такого вигляду:

Задача Р-А-2:

$$\min_{\tau^I, \theta, v^I, \Omega_i} \sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} v_{ij}^I, \quad (3.22)$$

за таких обмежень

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I = \int_{\Omega_i} \rho(x) dx, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3.23)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.24)$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx \leq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j, \quad (3.25)$$

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad (3.26)$$

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \quad (3.26)$$

$$mes(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (3.27)$$

$$\tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I \dots \tau_N^I), \quad \tau^I \in \Omega^N, \quad (3.28)$$

$$v_{ij}^I \geq 0, \theta_j \in \{0; 1\}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, M}. \quad (3.29)$$

Схематично багатоетапна неперервно-дискретна задача активації субрегіональних центрів з розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції представлена на рис. 3.4. Отримана математична модель (3.22) – (3.29) також є задачею неперервно-дискретної оптимізації, у якій неперервна частина відповідає за розміщення центрів дистрибуції, а дискретна – за активацію субрегіональних центрів. Для її розв'язання можуть застосовуватись комбіновані підходи, що поєднують методи оптимального розбиття множин із додатковими зв'язками з метаевристичними алгоритмами.

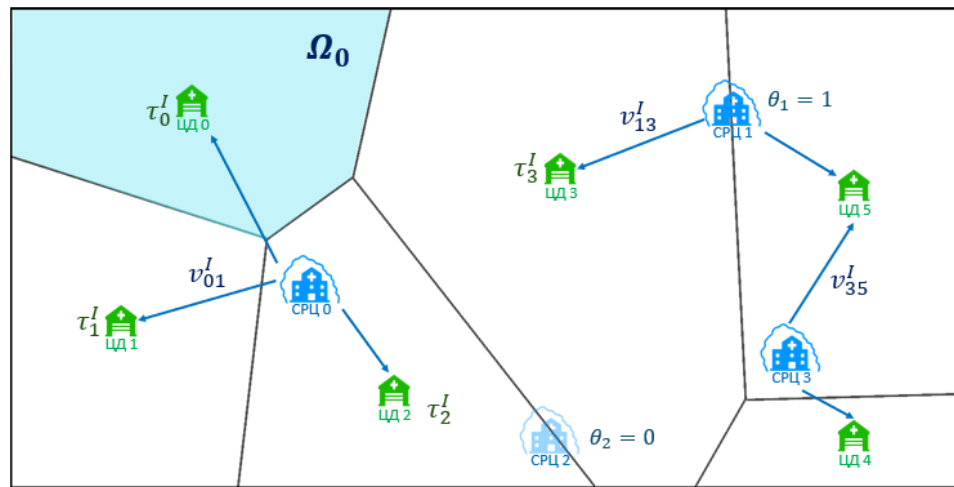


Рис. 3.4. Схематичне представлення багатоетапної неперервно-дискретної задачі активації субрегіональних центрів з розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції

Висновки до розділу 3

У розділі було розширено клас багатоетапних задач розміщення-розподілу за рахунок доповнення багатоетапними неперервно-дискретними задачами розміщення-активації. Розроблено класифікацію цих задач, що охоплює наступні варіанти.

1. Фіксовані центри дистрибуції, активація регіональних і субрегіональних центрів.
2. Фіксовані регіональні центри, активація субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування.
3. Фіксовані регіональні та субрегіональні центри, розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування.
4. Фіксовані регіональні центри, розміщення субрегіональних та дистрибуційних центрів з визначенням їх зон обслуговування.
5. Активація регіональних і субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції.
6. Активація субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції.

Розглянуто багатоетапну дискретну математичну модель задачі (А-1) активації регіональних та субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції. Модель мінімізує суму транспортних та операційних витрат, враховує ємності центрів, попит дистрибуційних центрів, баланс матеріальних потоків між етапами та ліміти на кількість активованих об'єктів. Ця задача належить до класу NP-складних задач, оскільки потребує побудови багаторівневого плану транспортування одночасного з активацією центрів із відомого набору, що спричиняє збільшення кількості можливих розв'язків.

Запропоновано нові математичні моделі багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення у вигляді неперервно-дискретних задач розміщення-активації (Р-А-1 та Р-А-2). У цільовому функціоналі об'єднано транспортні витрати декількох етапів і витрати активації, а система обмежень гарантує покриття всього попиту, дотримання ємностей і єдиний вибір сервісного центру для кожного споживача. Запропонована модель описує випадок комбінованої оптимізації, де присутня задача неперервної оптимізації для розміщення центрів дистрибуції і задача дискретної оптимізації для активації субрегіональних центрів. Така комбінація суттєво підвищує

складність процесу розв'язання отриманої задачі, що зумовлює що потребу у пошуку більш ефективних обчислювальних методів і підходів.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ БАГАТОЕТАПНИХ НЕПЕРЕРВНО-ДИСКРЕТНИХ ЗАДАЧ РОЗМІЩЕННЯ- АКТИВАЦІЇ

Математичні моделі, запропоновані у розділі 3, є неперервно-дискретними задачами оптимізації, які включають неперервну та дискретну складову, що визначає їхню особливість. Дискретна компонента відповідає за активацію центрів із відомого набору, неперервна частина – за розміщення центрів дистрибуції та визначення їх зон обслуговування. Складність задачі підвищує необхідність враховувати зв'язки між різними етапами. Тому, для розв'язання цих задач пропонується використовувати комбінацію методів, які базуються на двох різних теоретичних підходах:

- Еволюційний підхід, а саме генетичний алгоритм, для задач дискретної оптимізації;
- підходи з теорії оптимального розбиття множин, які передбачають континуальність множини що розбивається.

Варто зазначити, що навіть окремо ці задачі характеризуються високою складністю і потребують глибокого теоретичного та практичного дослідження. Комбінація цих підходів породжує додаткові виклики, які необхідно ефективно розв'язувати.

4.1. Розв'язання дискретної задачі активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції

Розглянемо багатоетапну дискретну задачу активації (А-1) регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції, а саме:

$$\min_{v^I, v^{II}, \gamma, \theta} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M c_{kj}^{II} v_{kj}^{II} + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N c_{ij}^I v_{ij}^I + \sum_{k=1}^K P_k \gamma_k + \sum_{j=1}^M A_j \theta_j, \quad (4.1)$$

враховуючи такі обмеження:

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq b_j^{II} \theta_j, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad (4.2)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} \leq b_k^{III} \gamma_k, \quad \forall k = \overline{1, K}, \quad (4.3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M v_{ij}^I, \quad (4.4)$$

$$\sum_{k=1}^K \gamma_k \leq J, \quad (4.5)$$

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad (4.6)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I \theta_j \geq b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (4.7)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{kj}^{II} = b_j^{II} \theta_j, \quad \forall j = \overline{1, M}. \quad (4.8)$$

$$\sum_{k=1}^K \gamma_k b_k^{III} \geq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j \geq \sum_{i=1}^N b_i^I. \quad (4.9)$$

(4.1) – (4.9) є задачею дискретної оптимізації, в якій наявні декілька етапів ланцюгів поставок та потребує побудови багаторівневого плану транспортування одночасного з активацією центрів із відомого набору.

Еволюційний підхід проявляє високу ефективність у розв'язанні NP-складних дискретних задач активації об'єктів у транспортно-логістичних системах завдяки здатності опрацьовувати великі комбінаторні простори шляхом імітації природного відбору. Застосування еволюційних операторів кросоверу та мутації забезпечує дослідження нових областей простору розв'язків з поглибленою оптимізацією.

Загальну схему підходу до розв'язання багатоетапної дискретної задачі активації показано на рис. 4.1.

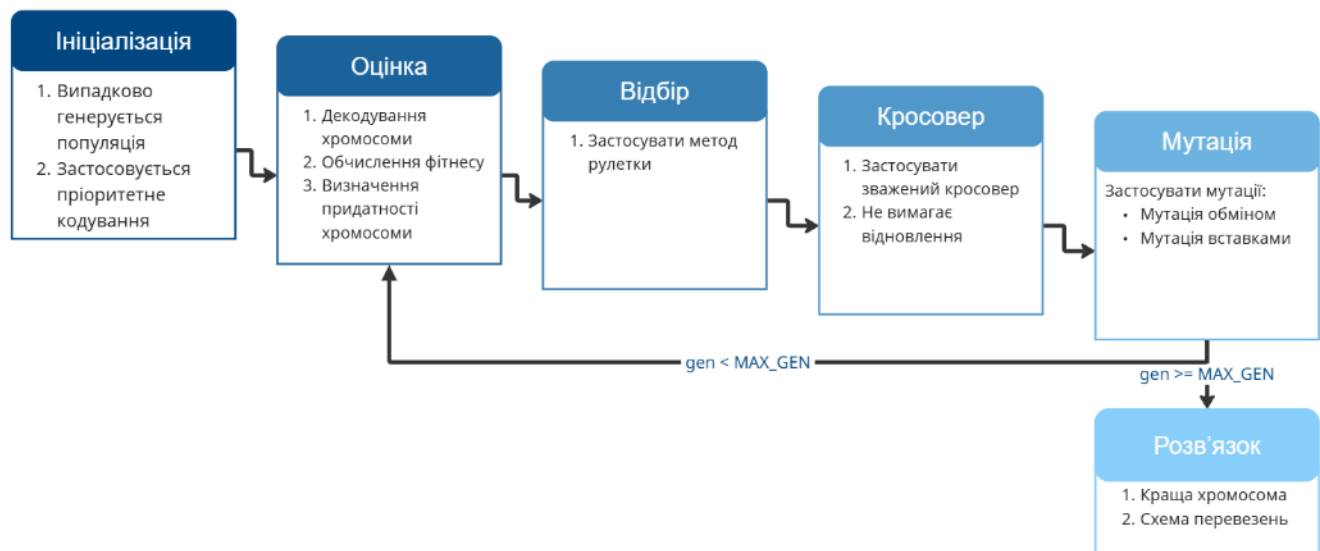


Рис. 4.1. Загальна схема підходу до розв'язання багатоетапної дискретної задачі активації

Відповідно до схеми з рис. 4.1, опишемо загальний алгоритм розв'язання задачі.

Алгоритм 4.1

Крок 1. Ініціалізуємо популяцію $P(t)$ за допомогою кодування на основі пріоритетів ((Gen та ін., 2018), (Y.-T. Chen & Cao, 2020) та (Mishra & Bajpai, 2024)). Отримуємо перше покоління потенційних розв'язків задачі.

- Крок 2. Оцінюємо придатність кожної хромосоми за допомогою процедури оцінювання.
- Крок 3. Відбираємо хромосоми для відтворення за допомогою метода рулетки.
- Крок 4. Застосовуємо процедуру кросовера із заданою ймовірністю, для відібраних хромосом.
- Крок 5. Із заданою ймовірністю застосування, деякі хромосоми піддаємо мутації для внесення варіацій.
- Крок 6. Формуємо нову популяцію $P(t+1)$ з нащадків i , можливо, деяких особин з поточної популяції. Нове покоління замінює старе.
- Крок 7. Перевіряємо виконання вимоги зупинки (максимальна кількість поколінь). Якщо так – переходимо на наступний крок. Інакше повертаємось на крок 2 зі значенням популяції $t+1$.
- Крок 8. Завершуємо еволюційний алгоритм. Декодуємо найкращу хромосому (з найменшим значенням фітнесу), повертаємо значення цільової функції та план перевезень.

Алгоритм 4.1 описаний.

Перейдемо до детального опису кожної з процедур. Позначимо:

Популяція P – представляє поточну множину кандидатів-розв'язків для покоління t ; $P(t) = \{y_1^{(t)}, y_2^{(t)}, \dots, y_K^{(t)}\}$, де K – розмір популяції;

Тут i надалі, y – це розв'язок-кандидат (або хромосома) у вигляді вектора, закодованого на основі пріоритетів. Кожен з етапів перевезення представлений окремим вектором цілих унікальних чисел фіксованої довжини.

Приклад хромосоми для декількох етапів перевезення для 3 регіональних центрів, 4 субрегіональних та 5 центрів дистрибуції наведено на рис. 4.2.

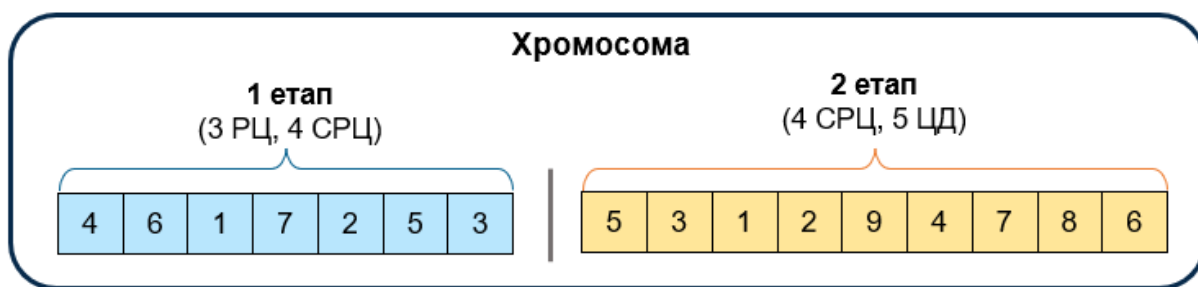


Рис. 4.2. Представлення пріоритетно закованої хромосоми

З рис. 4.2 можна побачити, що розмір першого етапу становить 7 (3 регіональних центра та 4 субрегіональних центра); другого етапу – 9 (4 субрегіональних центра та 5 центрів дистрибуції). Хромосома для першого та другого етапів мають тільки унікальні цілі числа, що відповідають пріоритетам.

Наведемо алгоритм ініціалізації.

Алгоритм ініціалізації.

Нехай необхідно згенерувати початкову популяцію $P(0)$, що містить K хромосом розміром $U = M + N$.

Крок 1. Згенеруємо хромосому y_i ($i = \overline{1, K}$), для цього призначимо випадковий пріоритет кожному гену хромосоми y_i . Значення пріоритету варіюється у проміжку $[1; U]$.

Крок 2. Застосуємо функції оцінювання та декодування й визначимо значення цільової функції і плану перевезень. Перевіримо чи задовольняє хромосома умови (4.2) – (4.9). Якщо так, додаємо згенеровану хромосому до популяції $P(0)$.

Крок 3. Якщо розмір початкової популяції $|P(0)| = K$, алгоритм ініціалізації завершено. Інакше повернутись на крок 1.

Алгоритм описаний.

Схема процедури ініціалізації наведена на рис. 4.3.

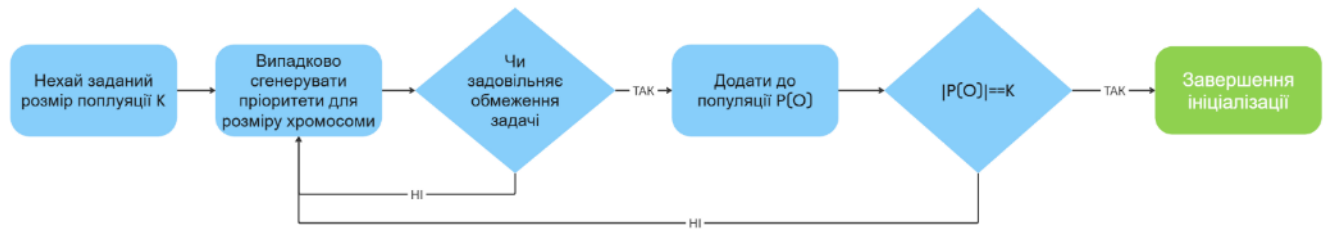


Рис. 4.3. Схема процедури ініціалізації

Перейдемо до опису алгоритму декодування, котрий застосовується в процедурі оцінювання (на прикладі декодування частини хромосоми, що відповідає за перевезення між СРЦ та ЦД).

Алгоритм декодування.

Вхідні дані:

- Хромосома y , що має розмір $|y| = M + N$.
- Вектор ємностей субрегіональних центрів $B^{II} = \{b_1^{II}, \dots, b_M^{II}\}$.
- Вектор попиту центрів дистрибуції $B^I = \{b_1^I, \dots, b_N^I\}$.
- Пустий план транспортування T .

Крок 0. Обчислюємо матрицю відстаней $D = \{d_{ij}\}$ розміром $M \times N$, де d_{ij} відповідає відстані між СРЦ i та ЦД j ($i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}$). Копіюємо вектори ємностей та потреб B^I, B^{II} у $B^{I'}, B^{II'}$ відповідно. Копіюємо хромосому $y \rightarrow y'$.

Крок 1. Знаходимо максимальний пріоритет у хромосомі y . Позначаємо його $c = \max_k y_k$. Відповідний індекс максимального пріоритету будемо позначати $idx(c)$.

Крок 2. Визначаємо, відповідає $idx(c)$ СРЦ або ЦД за допомогою перевірки $idx(c) < N$.

Крок 3. Якщо максимальний пріоритет c належить СРЦ, знаходимо ЦД з наявним попитом та мінімальною вартістю перевезень до цього СРЦ: $v = \min_{j; b_j^{II'} > 0} d_{ij}, i = idx(c)$. Інакше, якщо максимальний пріоритет c належить ЦД,

знаходимо СРЦ з мінімальною вартістю перевезень й невикористаною потужністю: $v =$

$$\min_{i; b_i^I > 0} d_{ij}, j = idx(c)$$

Крок 4. Визначаємо кількість одиниць об'ємної ваги перевезень: $q = \min\{b'_{idx(v)}, b''_{idx(v)}\}$. Обновлюємо елементи $b'_{idx(v)} = b'_{idx(v)} - q$ та $b''_{idx(v)} = b''_{idx(v)} - q$. Встановлюємо значення пріоритету $y'[c] = 0$. Додаємо $idx(c)$, $idx(v)$ та перевезення q до плану T .

Крок 5. Якщо $y' \equiv 0$, алгоритм декодування завершено, в іншому випадку, переходимо на крок 1.

Концептуальна схема алгоритму декодування наведена на рис. 4.4.

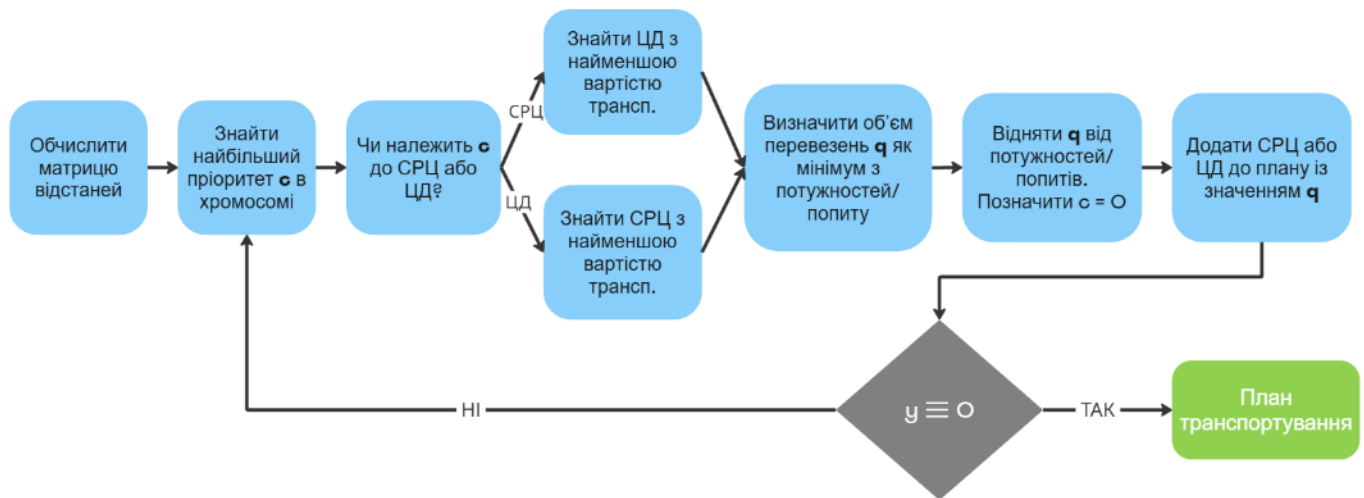


Рис. 4.4. Схема процедури декодування

Приклад декодування хромосоми для декількох логістичних етапів для 3 регіональних центрів, 4 субрегіональних та 5 центрів дистрибуції наведено на рис. 4.5.

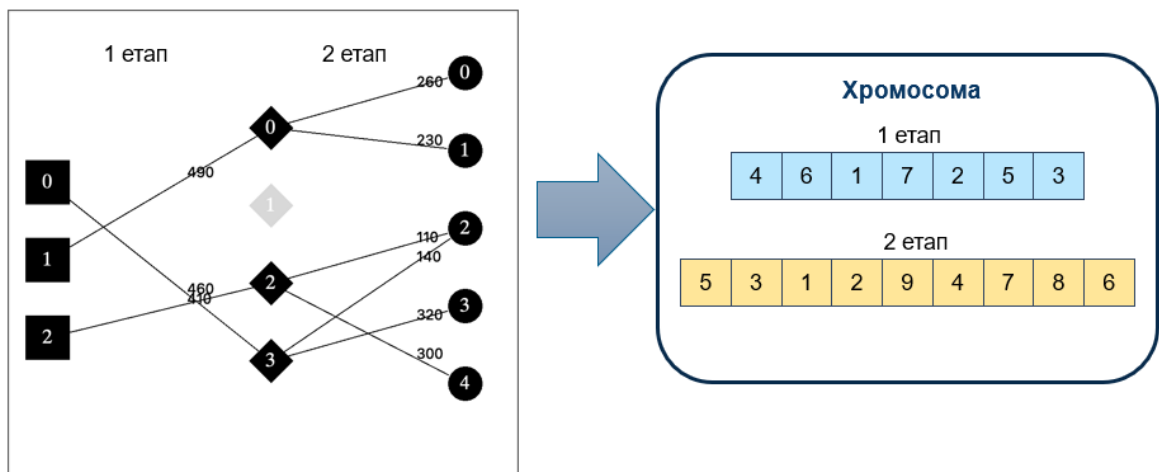


Рис. 4.5. Приклад декодування хромосоми

Перейдемо до опису процедури оцінювання.

Алгоритм оцінювання.

Крок 1. Декодувати хромосому та отримати план транспортування.

Крок 2. Обчислити значення цільової функції за формулою (4.1).

Крок 3. Перевірити, чи задовольняє план транспортування обмеження (4.2) – (4.9) з математичної моделі. Якщо будь-яке з обмежень не виконується – позначити хромосому як невалідну, і задати фітнес значення хромосомі (-1).

Алгоритм описаний.

Перейдемо до опису процедури вибору (рис 4.6). Для неї застосовується метод рулетки, який є ймовірнісним. Шанс відбору кожної особини є пропорційним значенню її фітнес-функції. Отже, індивіди з меншим значенням цільової функції мають більшу ймовірність бути відібраними до наступного покоління. Цей процес імітує механізм виживання найбільш пристосованих, що спостерігається в природній еволюції

Алгоритм відбору методом рулетки.

Крок 0. Для всіх хромосом у популяції $P(t)$ обчислюємо значення цільової функції $I_j, \forall j \in [0, |P| - 1]$ за формулою (4.1).

Крок 1. Обчислюємо значення S – суму значень цільової функції всіх хромосом популяції $P(t)$.

Крок 2. Створюємо масив ймовірностей. Оскільки метою задачі є мінімізація витрат, змінюємо вектор ймовірностей так, щоб мінімальні елементи мали більшу ймовірність бути обраними:

$$p_j = 1 - \frac{I_j}{S}, \forall j \in [0, |P| - 1],$$

Крок 3. Обираємо випадково з масиву ймовірностей індекс, що відповідає хромосомі.

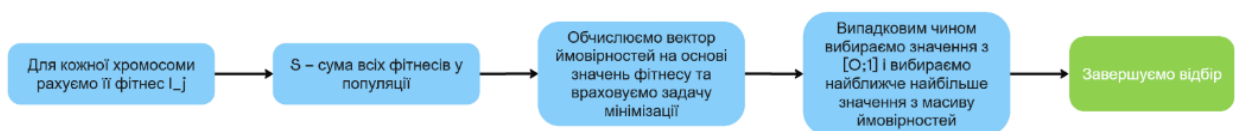


Рис. 4.6. Схема процедури відбору

Перейдемо до опису процедури зваженого кросоверу (Lotfi & Tavakkoli-Moghaddam, 2013).

Алгоритм кросоверу.

Вхідні дані: дві батьківські хромосоми y_1, y_2 з довжиною n .

Крок 1. Обираємо випадково точку розрізу хромосоми $p = rand(1, n)$, де $rand(1, n)$ генерує випадкове число від 1 до n .

Крок 2. Визначаємо довжину сегмента хромосоми після точки розрізу як $l = n - p$. Створюємо нові хромосоми y'_1 і y'_2 шляхом обміну сегментів батьківських хромосом після точки розрізу:

$$y'_1 = [y_1[1:p], y_2[p+1:n]], s_1[\cdot] = sort(y_1[p+1:n]),$$

$$y'_2 = [y_2[1:p], y_1[p+1:n]], s_2[\cdot] = sort(y_2[p+1:n]),$$

Крок 3. $\forall i, j \in \overline{1, l}$: якщо $y'_1[p+i] = s_2[j]$, то $y'_1[p+i] = s_1[j]$;
якщо $y'_2[p+i] = s_1[j]$, то $y'_2[p+i] = s_2[j]$.

Алгоритм описаний.

Ідея та схема алгоритму показана на рис. 4.7.

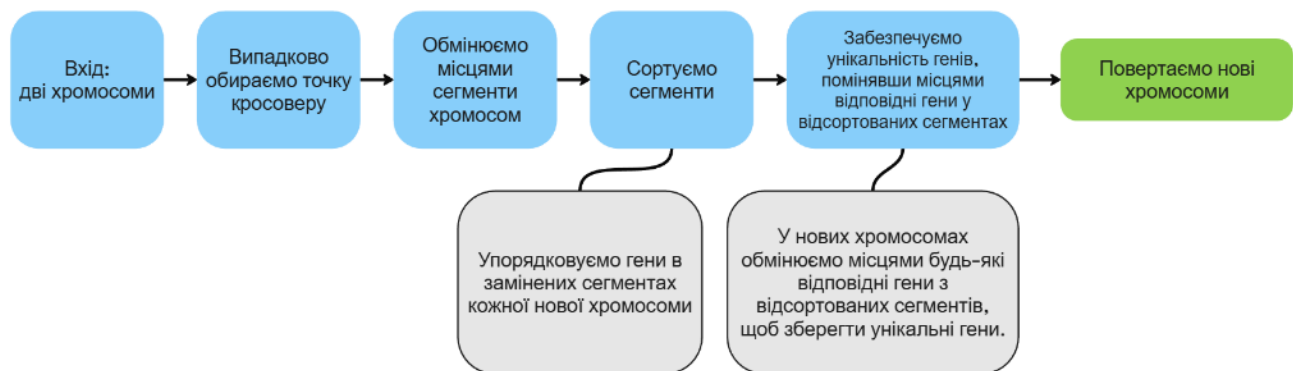


Рис. 4.7. Схема процедури кросовера

Для підтримання різноманітності та запобігання зупинці пошуку в локальних екстремумах застосовується процедура мутації.

Алгоритм процедури мутації.

Нехай:

- n – розмір хромосоми;
- $y = (y_1, \dots, y_n)$ – хромосома.
- y' – мутована хромосома.

Крок 1. Згенерувати випадкове число p з інтервалу $[0,1]$.

Крок 2. Вибір типу мутації: якщо $p \leq 0.5$, то перейти до кроку 3 (мутація обміном), інакше – до кроку 5 (мутація вставками)

Крок 3. (Мутація обміном) Обрати два різні випадкові індекси i та j з $[1;n]$.

Крок 4. Обміняти місцями y_i та y_j . Перейти до кроку 6.

Крок 5. (Мутація вставками). Обираються дві випадкові позиції в хромосомі та переміщуються елементи з однієї позиції в іншу.

Крок 6. Повернути мутовану хромосому y' .

Алгоритм описаний.

Схематично, процедура мутації наведена на рис. 4.8.

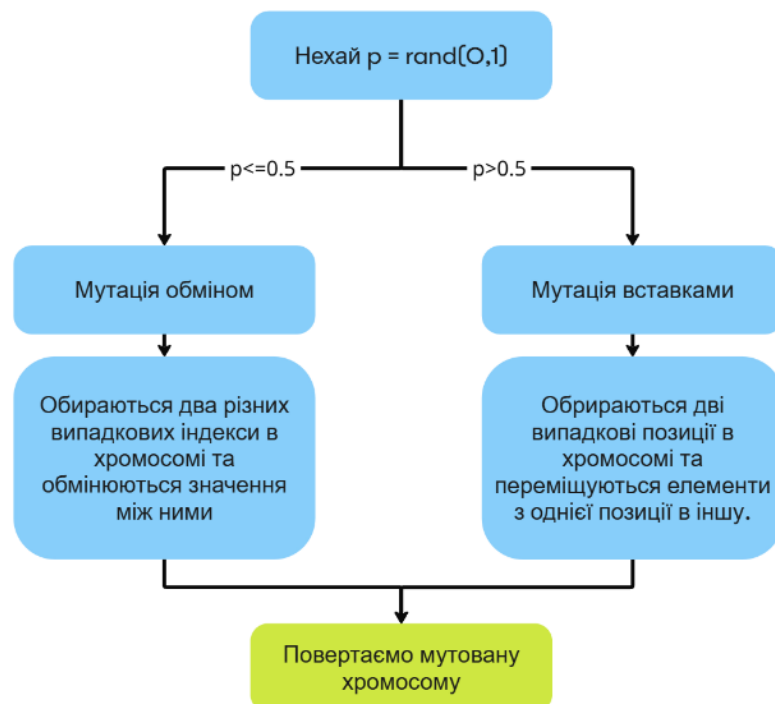


Рис. 4.8. Схеми процедури мутації

Примітка. Процедура мутації застосовується не для всіх елементів популяції, а відповідно із певною ймовірністю застосування. Для покращення процедури пошуку, доречним є застосовувати описану на рис. 4.8 процедуру мутації адаптивним шляхом: якщо на наступній ітерації еволюційного підходу відсутнє покращення розв'язку більше ніж N разів (N – ціле додатне число), то слід збільшити значення ймовірності застосування процедури мутації з деяким фіксованим кроком.

Запропонований алгоритм розв'язання базується на підході, представленому в роботі (Gen та ін., 2018), проте містить низку модифікацій, необхідних для розв'язання задачі А-1. Зокрема, у алгоритмі враховано активацію центрів (регіональних та субрегіональних) на двох етапах, реалізовано адаптивну процедуру змішаної мутації з урахуванням особливостей вхідних даних і постановки задачі, а також застосовано стратегію відбору нащадків на основі заміни за віком.

4.2. Підходи до розв'язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі активації субрегіональних центрів з розміщенням та визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції та фіксованими регіональними центрами

Перейдемо до розв'язання неперервно-дискретної задачі розміщення-активації (Р-А-1) з визначенням зон обслуговування центрів дистрибуції. Наведемо математичну модель:

Мінімізувати

$$\min_{\tau^I, \theta, v^I, v^{II}, \Omega_i} \sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} v_{ij}^I + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M c_{kj} v_{kj}^{II}, \quad (4.10)$$

за таких обмежень

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I = \int_{\Omega_i} \rho(x) dx, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (4.12)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} \leq b_k^{III}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4.13)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{kj}^{II} = \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (4.14)$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) dx \leq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j, \quad (4.15)$$

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad (4.16)$$

$$\sum_{k=1}^K b_k^{III} \geq \sum_{j=1}^M b_j^{II} \theta_j \geq \int_{\Omega} \rho(x) dx, \quad (4.17)$$

$$\tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I \dots \tau_N^I), \quad \tau^I \in \Omega^N, \quad (4.18)$$

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \quad (4.19)$$

$$mes(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, N}, \quad (4.20)$$

$$v_{ij}^I \geq 0, v_{kj}^{II} \geq 0, \theta_j \in \{0; 1\}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, K} \quad (4.21)$$

Модель (4.10) – (4.21) описує випадок комбінованої оптимізації, яка включає задачу неперервної оптимізації для розміщення ЦД і задачу дискретної оптимізації для активації СРЦ.

В цьому випадку запропоновано два підходи до розв’язання:

1. Послідовне розв’язування неперервної та дискретної задач. Тут центри дистрибуції розміщуються одноразово і після цього розв’язується задача активації субрегіональних центрів та визначення плану перевезень.
2. Інтегрований еволюційний підхід. Для кожного потенційного розв’язку у поколінні розв’язується неперервна задача розміщення центрів дистрибуції, що забезпечує врахування зміни координат центрів дистрибуції під час активації субрегіональних центрів та формування плану перевезень.

Розглянемо кожен з них детально.

Підхід I

Пропонується використовувати поєднання еволюційного алгоритму та підходу з теорії оптимального розбиття множин. Враховуючи це, можна поділити розв’язання задачі (4.10) – (4.21) на два етапи.

На першому етапі розміщуються центри дистрибуції та визначаються їх зони обслуговування і потреби через розв’язування задачі оптимального розбиття множин у постановці (4.22) – (4.24), де N – необхідна кількість центрів.

Мінімізувати

$$\sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx, \quad (4.22)$$

за таких обмежень:

$$\bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \quad (4.23)$$

$$\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, i \neq j, i, j = \overline{1, N}. \quad (4.24)$$

$$\int_{\Omega_i} \rho(x) dx = b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (4.25)$$

Як результат розв'язання задачі (4.22) – (4.25) отримаємо розміщені центри дистрибуції $\tau_i^{*I} (i = \overline{1, N})$ та їх зони обслуговування.

На другому етапі розв'язуємо дискретну задачу активації (4.26) – (4.32):

$$\min_{\theta, v^I, v^{II}} \sum_{j=1}^M A_j \theta_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij} v_{ij}^I + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M c_{kj} v_{kj}^{II} \quad (4.26)$$

за таких обмежень

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I \leq \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (4.27)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{kj}^{II} \leq b_k^{III}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (4.28)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I \theta_j = b_i^I, \quad i = \overline{1, N}, \quad (4.29)$$

$$\sum_{j=1}^M \theta_j \leq L, \quad (4.30)$$

$$\sum_{k=1}^K v_{kj}^{II} = \theta_j b_j^{II}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (4.31)$$

$$v_{ij}^I, v_{jk}^{II} \geq 0, \theta_j \in \{0; 1\}, \quad i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}. \quad (4.32)$$

тут $\tau^I = (\tau_1^I, \tau_2^I \dots \tau_N^I)$, $\tau^I \in \Omega^N$ – розташування центрів дистрибуції, отримане на першому етапі.

Дискретна задача (4.26) – (4.32) розв’язується за допомогою алгоритму 4.1.

Схематично, підхід I зображений на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Схеми підходу I до розв’язання неперервно-дискретної задачі розміщення-активації

Одним з недоліків цього підходу є те, що при розв'язанні задачі оптимального розбиття множин і розміщенні ЦД не враховується розташування і ємність СРЦ, які будуть здійснювати постачання.

З метою усунення цього недоліку, пропонується застосування другого підходу.

Підхід II

Відрізняється від першого тим, що неперервна і дискретна складова задачі розв'язуються у комплексі. А саме: для кожної хромосоми, яка включає набір регіональних та субрегіональних центрів, визначається свій набір центрів дистрибуції із зонами їх обслуговування, і оцінка хромосоми проводиться із врахуванням цих розміщених центрів. Тут визначення координат центрів дистрибуції проводиться через розв'язування задачі ОРМДЗ (S. A. Us та ін., 2019) та (Ус & Станіна, 2017), що дає змогу враховувати активовані СРЦ. Тобто внутрішня задача розміщення набуває такого вигляду:

$$\min_{\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, (\tau_1^I, \dots, \tau_N^I), (v_{11}, \dots, v_{NM})} F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, (\tau_1^I, \dots, \tau_N^I), (v_{11}, \dots, v_{NM})), \quad (4.33)$$

при обмеженнях:

$$\int_{\Omega_i} \rho(x) dx = b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (4.34)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{ij} = b_i^I, \quad \forall i = \overline{1, N}, \quad (4.35)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij} = b_j^H, \quad \forall j = \overline{1, M}, \quad (4.36)$$

$$(\Omega_1, \dots, \Omega_N) \in \sum_{\Omega}^N, \quad (4.37)$$

$$\sum_{\Omega}^N = \{(\Omega_1, \dots, \Omega_N) : \bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = \emptyset, i \neq j, i, j = \overline{1, N}\}, \quad (4.38)$$

$$v_{ij} \geq 0, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, J}, \quad (4.39)$$

де

$$\begin{aligned} F(\{\Omega_1, \dots, \Omega_N\}, (\tau_1^I, \dots, \tau_N^I), (v_{11}, \dots, v_{NM})) = \\ = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega_i} c_i^I(x, \tau_i^I) \rho(x) dx + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II}) v_{ij}, \end{aligned} \quad (4.40)$$

- b_i^I – потужність i -го підприємства I-го етапу;
- b_j^{II} – потужність j -го підприємства II-го етапу;
- $c_i^I(x, \tau_i^I)$ – вартість доставки одиниці сировини з точки $x \in \Omega$ до i -го підприємства I етапу;
- $c_{ij}^{II}(\tau_i^I, \tau_j^{II})$ – вартість доставки одиниці продукту від i -го підприємства I етапу до j -го підприємства II етапу;
- $\rho(x)$ – кількість ресурсу в точці $x \in \Omega$;
- $\tau_i^r = (\tau_{i1}^r, \tau_{i1}^r)$ – координати i -го підприємства r -го етапу;
- v_{ij} – обсяг продукції, що постачається від i -го підприємства I етапу до j -го підприємства II етапу: $v_{ij} \geq 0, i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}$.

Загальна схема алгоритму наведена на рис. 4.10.

Алгоритм 4.2

Крок 1. Популяція $P(t)$ ініціалізується за допомогою кодування на основі пріоритетів. Отримуємо перше покоління потенційних розв’язків задачі активації.

- Крок 2. Оцінюється придатність кожної хромосоми в популяції за допомогою розв'язання задачі ОРМДЗ на моделі (4.33) – (4.40). Після розв'язання, для кожної хромосоми отримані розташування ЦД, їх зони обслуговування та план перевезень.
- Крок 3. Хромосоми відбираються для відтворення за методом рулетки.
- Крок 4. До відібраних хромосом застосовується процедура кросоверу для отримання потомства.
- Крок 5. Деякі хромосоми піддаються мутації для внесення варіацій.
- Крок 6. Нова популяція $P(t+1)$ формується з нащадків і, можливо, деяких особин з поточної популяції. Нове покоління замінює старе.
- Крок 7. Перевіряємо чи виконана вимога зупинки. Якщо так – переходимо на наступний крок. Інакше повертаємось на крок 2 зі значенням популяції $t+1$.
- Крок 8. Завершуємо еволюційний алгоритм. Декодуємо ефективну хромосому, повертаємо значення цільової функції та план перевезень. Алгоритм описаний.

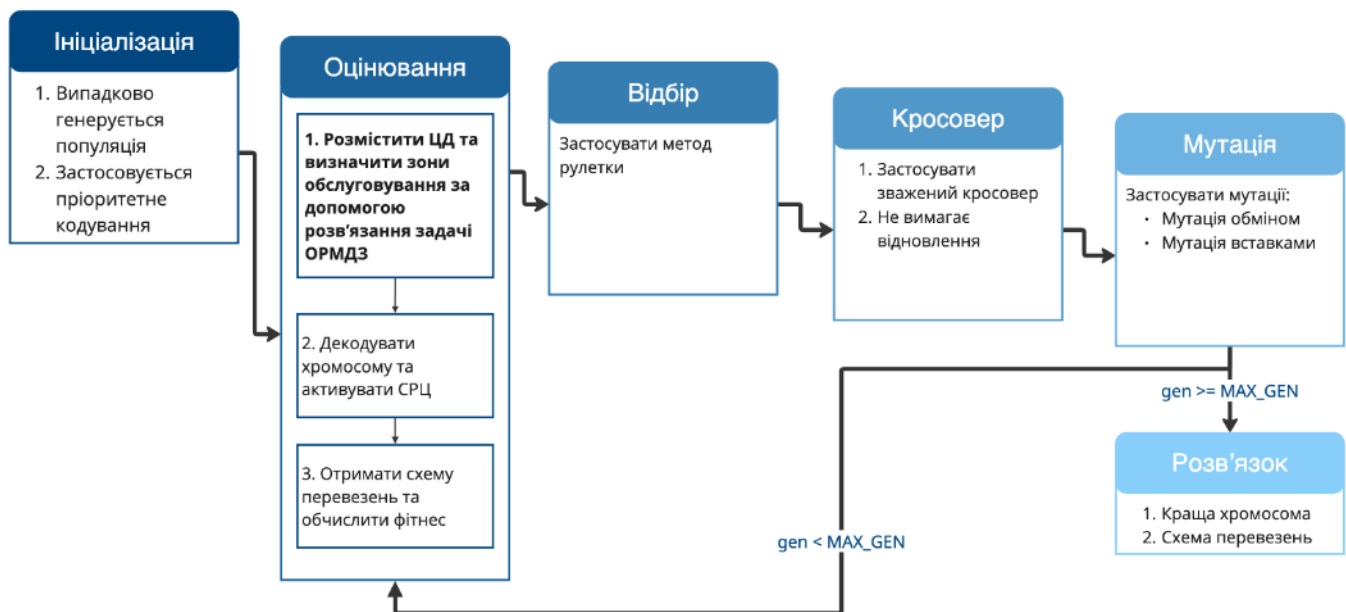


Рис. 4.10. Схема підходу II до розв'язання неперервно-дискретної задачі розміщення-активації

Відповідно до рис. 4.1 та 4.10, підхід II містить етапи, що були описані у Алгоритмі 4.1. Детальний опис відповідних процедур був наведений у розділі 4.1. Вагомою відмінністю

в цьому другого підходу є процедура оцінювання, що виконує додаткові кроки у вигляді розв'язання задачі ОРМДЗ для кожного набору активованих СРЦ. Детальний опис алгоритму ОРМДЗ подано у (Станіна та ін., 2021).

4.3. Порівняння підходів

Порівняємо підхід I та II з підрозділу 4.2. Для цього проведемо серію експериментів із такими вихідними даними: кількість центрів для задач (РЦхСРЦхЦД): $1 \times 4 \times 10$, $2 \times 7 \times 20$, $2 \times 10 \times 35$, $3 \times 12 \times 40$, $2 \times 15 \times 65$. Оскільки випадкове генерування відіграє вирішальну роль під час розв'язування, кожен експеримент повторюється 20 разів і знаходиться середнє значення для таких параметрів: час виконання алгоритму та значення цільового функціоналу. Отримані результати наведені рис. 4.11.

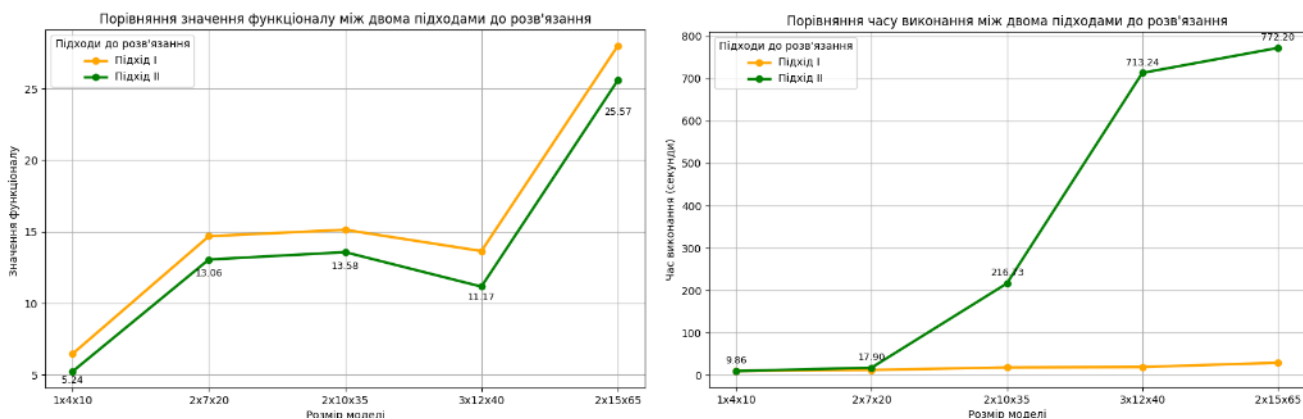


Рис. 4.11. Графіки порівняння значення функціоналу (ліворуч) та часу виконання (праворуч) за моделями в залежності від підходу

З результатів, отриманих в ході експериментів, можна стверджувати, що, як і очікувалося, час розв'язування для другого підходу значно більший (починаючи з моделі $2 \times 10 \times 35$), ніж для першого. Це очікувано, оскільки у другому підході розміщення центрів виконується для кожної хромосоми, тоді як у першому центри розміщуються лише один раз. Водночас, оскільки у другому підході розміщення ЦД та активація СРЦ проводиться із врахуванням їхньої взаємодії, другий підхід дає кращі результати за значенням цільового функціоналу, а саме: середнє значення функціоналу на 13,44% нижче, ніж при

застосуванні першого підходу. Отже, можна зробити висновок, що перший підхід може застосовуватись, коли потрібні швидкі та наближені рішення для процесу активації-розташування (наприклад, маршрутизація в режимі реального часу транспортних засобів для доставки медичних товарів або пунктів у місті, де швидкі рішення мають вирішальне значення для забезпечення своєчасної доставки ліків та ВМП). Другий підхід дає краще рішення, але вимагає значно більше часу для виконання (наприклад, довгострокове планування створення нових центрів медичної логістики для оптимізації покриття та розподілу ресурсів у регіоні).

4.4. Аргументація вибору генетичного алгоритму

Визначимо еволюційний підхід, що виявляє найбільшу ефективність до розв'язання зазначених задач. Для цього порівнюємо такі методи: еволюційний підхід; оптимізацію методом рою часток (Namami & Ismail, 2022); оптимізацію мурашиними алгоритмами (Blum, 2024). Порівняння та опис підходів наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння різних еволюційних підходів

Підхід	Еволюційний підхід	Оптимізація методом рою часток	Оптимізація мурашиними алгоритмами
Тип популяції	Рандомізовані вектори перестановок		
Представлення	Кодування на основі пріоритетів		
Оцінка пристосованості	Розміщення центрів із розв'язання задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками та обчислення значення цільового функціоналу		
Відбір	Метод рулетки	PSO використовує кращі позиції прямо в рівняннях оновлення швидкості й положення.	Мурахи імовірно обирають шляхи на основі концентрації феромонів та евристичної інформації
Відтворення	Зважений кросовер	Оновлення швидкості на основі обміну, з урахуванням інерції, когнітивних та соціальних компонентів	Мурахи залишають феромонові сліди, оновлення феромонів обумовлене якістю рішення та випаровуванням феромонів
Збереження різноманітності	Адаптивна комбінована мутація (вставками та обміном)	Дослідження заохочується оновленнями швидкості на основі обміну, що походять від особистого та глобального найкращого	Дослідження заохочується випаровуванням феромонів та евристичним керуванням під час вибору шляхів
Умова зупинки	Фіксована кількість поколінь або досягнення порога пристосованості		

Проведемо експерименти для розв'язання модельних задач із використанням різних еволюційних підходів. Кількість центрів для задач (РЦ×СРЦ×ЦД): $1 \times 4 \times 10$, $2 \times 7 \times 20$, $2 \times 10 \times 35$, $3 \times 12 \times 40$, $2 \times 15 \times 65$. Оскільки випадковість відіграє ключову роль, кожен експеримент повторюємо 20 разів, та розраховуємо середнє значення часу виконання алгоритму й значення цільової функції. Отримані результати наведено на рис. 4.12.

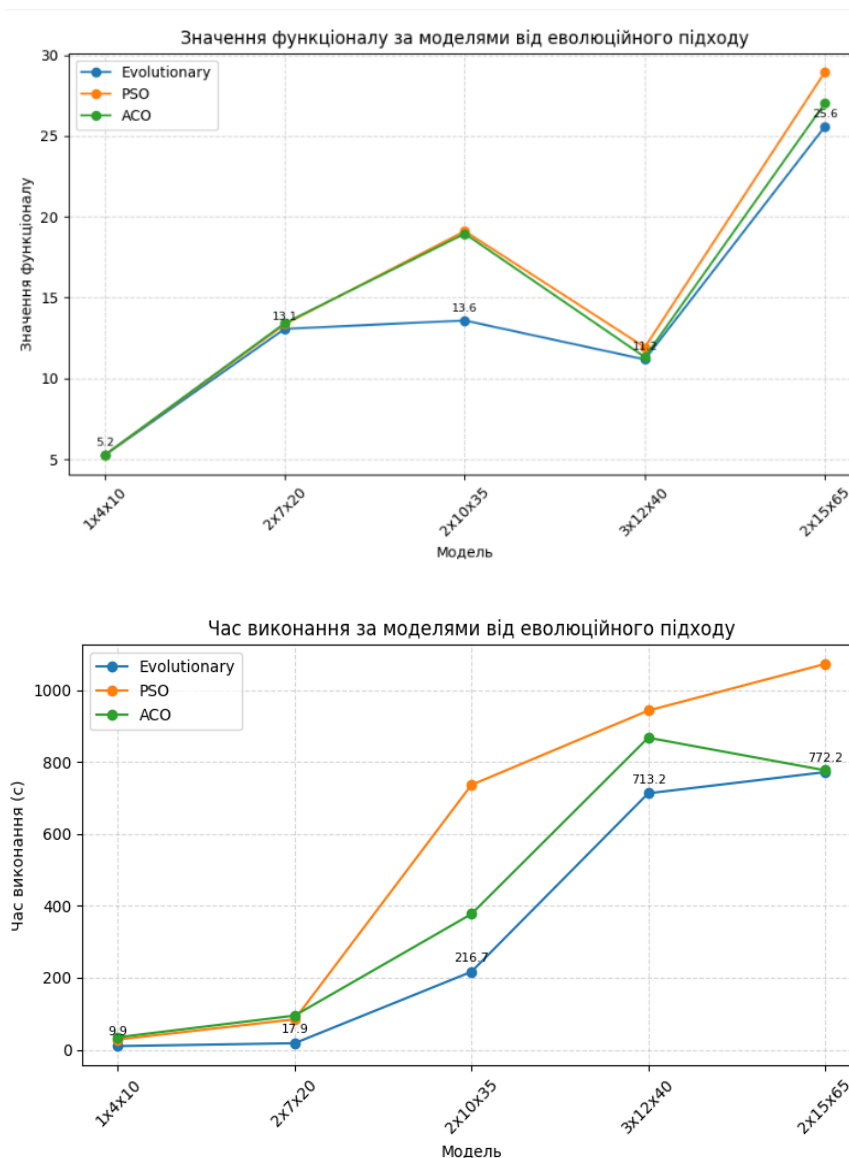


Рис. 4.12. Графіки порівняння значення функціоналу та часу виконання за моделями в залежності від еволюційного підходу

Можна побачити, що в обох випадках (і за значенням функціоналу і за часом виконання) еволюційний підхід працює краще за інші. Отже, його вибір є раціональним.

4.5. Програмна реалізація

Для демонстрації та подальшого дослідження алгоритмів 4.1 і 4.2 розроблено їх програмну реалізацію з таким можливостями:

- завантаження початкових умов задачі;
- застосування алгоритмів 4.1 та 4.2 до розв'язання задачі розміщення-активації;
- візуалізація процесу розв'язання;
- отримання плану транспортування між центрами різних рівнів;
- навігація за поколіннями розв'язку;
- збереження, завантаження та відтворення розв'язків різних задач для подальшого використання.

Для програмної реалізації застосовані такі технології: мова Python3 – для еволюційного підходу; бібліотека PyQt6 для інтерфейсу користувача; C++ для розв'язання частин, пов'язаних з модулем розміщення центрів.

Архітектура застосунку побудована у вигляді модульної структури. Початковою точкою взаємодії є модуль інтерфейсу користувача, який забезпечує завантаження моделей, розв'язання задач, перегляд результатів, навігацію за поколіннями та керування допоміжними функціями. Центральний модуль координації виконує функції диспетчера, передаючи запити між інтерфейсом та внутрішніми компонентами. Відповідно до запиту користувача, модуль координації здійснює виклики до таких модулів:

- Модуль візуалізації, що відтворює процес розв'язання задачі на канвасі: схематично (для модельних даних) або на географічній мапі (для реальних даних);
- модуль керування процесом розв'язання задач розміщення/активації;
- модуль керування даними, що відповідає за логування результатів, збереження отриманого розв'язку для подальшого його відтворення, навігацію за поколіннями.

При розв'язанні дискретної задачі активації, здійснюється виклик модуля еволюційного алгоритму. Для неперервно-дискретної задачі розміщення-активації, еволюційний модуль звертається до модуля розміщення для визначення місць раціонального розташування центрів з їх зонами обслуговування.

При розв'язанні практичних задач з реальними даними, модулі керування процесом розв'язання та візуалізації застосовують модуль взаємодії з ГІС для отримання географічних координат, відстаней, транспортних маршрутів та завантаження мапи місцевості. У ньому використовується програмний інтерфейс (API) від OpenStreetMap, який забезпечує доступ до необроблених геоданих з їх подальшим збереженням і кешуванням у базі даних.

Діаграму архітектури програмної реалізації наведено на рис. 4.13.

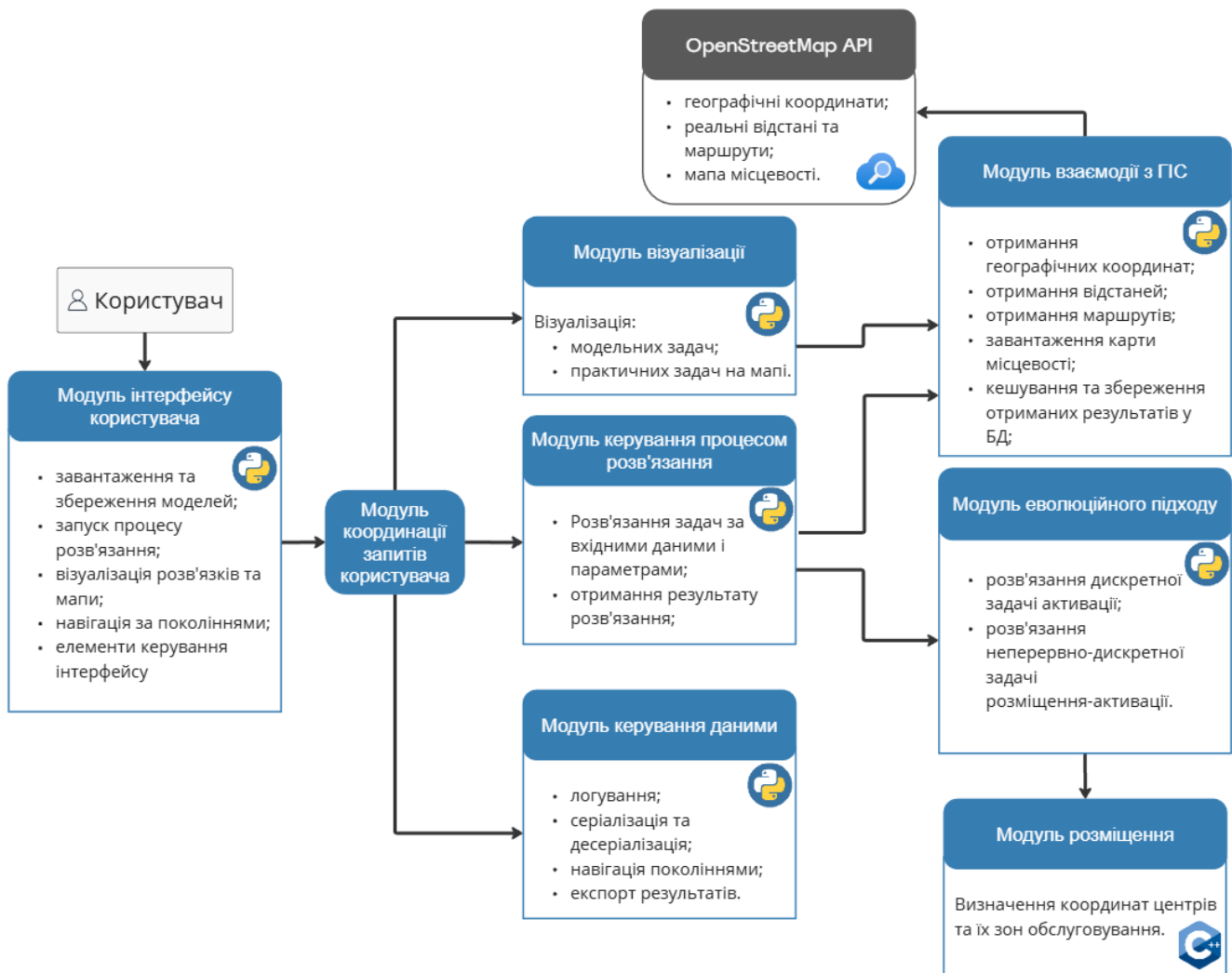


Рис. 4.13. Діаграма архітектури програмної реалізації

Висновки до розділу 4

У розділі розроблено комбінований підхід до розв'язання неперервно-дискретних задач розміщення-активації заснований на еволюційних алгоритмах і використанні методів оптимального розбиття множин. Використано еволюційний підхід для активації регіональних і субрегіональних центрів при фіксованих центрах дистрибуції з такими послідовними процедурами: пріоритетне кодування, алгоритми ініціалізації, декодування та оцінювання, відбір методом рулетки, зважений кросовер і адаптивна комбінована мутація.

Для задач P-A-1 та P-A-2 запропоновано два підходи до розв'язання:

- у першому підході поєднується еволюційний алгоритм та методи з теорії оптимального розбиття множин і розв'язання задачі зводиться до двох етапів. При цьому на першому етапі розміщуються центри дистрибуції та визначаються їх зони обслуговування і потреби шляхом розв'язування задачі оптимального розбиття множин, на другому етапі розв'язується дискретна задача активації з відомими координатами центрів дистрибуції і зонами обслуговування;
- у другому підході загальний процес розв'язання здійснюється із застосуванням еволюційного алгоритму, у якому при оцінюванні кожної хромосоми розв'язується задача ОРМДЗ для визначення координат центрів дистрибуції та їхніх зон обслуговування з урахуванням активованих СРЦ.

Проведено експериментальне порівняння підходів I та II та виявлено, що підхід II суттєво знижує середнє значення цільової функції (до 13,5%), але потребує більше часу. Натомість підхід I забезпечує швидкі наближені рішення. Це дозволяє рекомендувати підхід I для задач реального часу, а підхід II для оптимального стратегічного планування.

Аргументовано вибір еволюційного підходу через його порівняння з методом рою часток та мурашиним алгоритмом. Еволюційний підхід показав кращі результати і за значенням функціоналу і за часом виконання.

Набули подальшого розвитку засоби комп'ютерного моделювання шляхом інтеграції сучасних ГІС з програмною реалізацією алгоритму розв'язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення-активації з визначенням зон обслуговування. Програмно реалізовано алгоритми 4.1 та 4.2 з використанням Python3 для еволюційного підходу, бібліотеки PyQt6 для інтерфейсу користувача, C++ для розв'язання частин, пов'язаних з модулем розміщення. Інтегровано сервіс OpenStreetMap для візуалізації карти та отримання реальних відстаней.

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ. РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАДАЧ НА МОДЕЛЬНИХ ТА РЕАЛЬНИХ ДАНИХ

Застосування еволюційних алгоритмів часто демонструє чутливість до вхідних параметрів і мінливість своєї ефективності залежно від конкретних даних і вхідних конфігурацій, тому для оцінки їх надійності та практичної ефективності й обґрунтованого вибору параметрів проведемо експериментальне дослідження. Метою цього розділу є дослідження впливу зміни вхідних параметрів запропонованих у розділі 4 алгоритмів на розв’язок багатоетапної задачі розміщення-активації.

5.1. Мета експерименту

Для демонстрації роботи алгоритмів 4.1 та 4.2, було розроблено їх програмну реалізацію та проведено обчислювальні експерименти. Вони спрямовані на:

- перевірку коректності роботи алгоритмів;
- з’ясування рекомендованих параметрів і процедур алгоритмів;
- визначення залежності часу виконання від розміру задачі при розв’язанні багатоетапних задач розміщення-активації;
- обґрунтування доцільності використання математичних моделей і алгоритму розв’язання багатоетапних неперервно-дискретних задач при розв’язанні практичних проблем з використанням реальних даних.

Досліджено такі параметри та процедури алгоритму:

- розмір популяції;
- максимальна кількість поколінь;
- ймовірність застосування процедури кросоверу;
- ймовірність застосування процедури мутації;
- стратегії відбору батьків;
- стратегії відбору нащадків.

Для кожного експерименту проведено вимірювання таких параметрів:

- мінімальний, максимальний, середній час виконання;
- мінімальне значення цільового функціоналу;
- мінімальне, максимальне, середнє значення цільового функціоналу;
- мінімальна, максимальна, середня ітерація останнього покращення;
- час виконання при мінімальному значенні цільового функціоналу;
- значення цільового функціоналу при мінімальному часі виконання.

5.2. Підготовка до експерименту

Для запуску експериментів було імплементовано алгоритми 4.1 та 4.2 у вигляді консольної версії програмного забезпечення, що дозволяє за двома вхідними файлами (вхідний файл з описом модельної задачі та конфігураційний файл з параметрами алгоритму) отримати розв’язок для модельної задачі. Також консольний застосунок виводить звіт з розв’язання модельної задачі при успішному виконанні програми.

Основні характеристики апаратного забезпечення, застосованого для проведення експериментів, подано у таблиці 5.1.

Модельні задачі для проведення експериментів були згенеровані відповідно до допустимої множини математичної моделі (3.10) – (3.21) розділу 3. Для цього розроблено допоміжний консольний застосунок, що приймає такі вхідні параметри:

- кількість регіональних центрів;
- кількість субрегіональних центрів;
- кількість дистрибуційних центрів;
- булевий параметр, що відповідає за рівномірність чи нерівномірність розподілення ємності субрегіональних центрів;
- булевий параметр, що відповідає за рівномірність чи нерівномірність розподілення попиту дистрибуційних центрів.

Таблиця 5.1 – Характеристики апаратного забезпечення для проведення експериментів

Компонент	Характеристика
CPU	AMD Ryzen 7 5800X (8 ядер, 16 потоків; базова частота 3,8 GHz, Turbo Boost до 4,7 GHz; фактична частота 3801 MHz)
Материнська плата	ASUS B85M-G (Intel B85, LGA 1150, форм-фактор Micro-ATX)
Версія BIOS / Дата	American Megatrends Inc. 2409 (12.02.2020), SMBIOS версія 3.3
Оперативна пам'ять	32 GiB DDR4-3200 MHz (2×16 GiB)
Основне сховище	Kingston A400 480 GB, 2,5" SATA III (до 500 MB/s читання, до 450 MB/s запис)
GPU	ASUS Dual GeForce RTX 3060 TI OC Edition, 8 GB GDDR6X; 4864 CUDA-ядер; інтерфейс 256-bit; швидкість пам'яті 14 Gbps
Операційна система	Microsoft Windows 11 Pro (версія 10.0.26100, збірка 26100)
Компілятор	MSBuild vc143 (Visual Studio 2022); Python 3.10.12
Утиліти для замірювання часу	std::chrono (C++); time.perf_counter (Python)

Для визначення необхідних розмірів модельних задач було враховано практичне застосування та розміри можливих задач на практиці. З практичної точки зору, можна зазначити, що, на регіональному рівні, кількість регіональних центрів може коливатися в межах [1;5]; субрегіональних центрів – [10;30]; центрів дистрибуції – [10;200].

Для проведення експериментального аналізу обрано обмежений набір репрезентативних модельних сценаріїв, що визначаються комбінаціями головних параметрів, таких як РЦ, СРЦ та ЦД. Для ефективного досягнення широкого і систематичного покриття, контролюючи при цьому масштаб експерименту, можна використовувати стандартний ортогональний масив (наприклад, ортогональний масив L9). Додатково були враховані деякі граничні випадки для забезпечення широкого охоплення дослідження й збільшило загальну кількість сценаріїв до дванадцяти.

Таблиця 5.2 – Розміри модельних задач для експериментів

Експеримент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кількість РЦ	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	5	3
Кількість СРЦ	10	20	30	10	20	30	10	20	30	5	10	30
Кількість ЦД	10	100	200	100	200	10	200	10	100	30	10	200

5.3. Дослідження параметрів застосування генетичного алгоритму до розв’язання багатостадійних задач розміщення-активації

Було досліджено вплив кожного з параметрів генетичного алгоритму на отриманий розв’язок. Так як кількість параметрів та моделей може бути досить великою, застосовано однофакторний аналіз, а саме послідовно фіксується один параметр ГА, при цьому всі інші залишаються сталими значеннями. Це дозволяє ізолювати їх індивідуальний вплив на результати.

Для кращої візуалізації розділимо задачі відповідно до кількості РЦ, СРЦ та ЦД на моделі малої, середньої та великої розмірності таким чином:

- малої розмірності: 1x10x10; 5x10x10; 5x20x10; 1x30x10;
- середньої розмірності: 3x30x10, 3x10x100, 1x20x100, 5x30x100;
- великої розмірності: 5x10x200; 3x20x200; 1x30x200; 3x30x200.

Виконання та аналіз обчислювальних експериментів буде проводитись за таких загальних припущень:

- для дослідження параметрів і процедур алгоритму, застосовані моделі розмірності яких зазначені у таблиці 5.2.
- Запуск експериментів проводився із початковими параметрами генетичного алгоритму: розмір популяції – 100; кількість поколінь (ітерацій) – 50; ймовірність застосування процедури мутації – 0.3; ймовірність застосування процедури кросоверу – 0.8, якщо не зазначене інше під час експерименту.
- Для аналізу результатів експериментів, отримані значення цільового функціоналу приводяться до шкали [0, 1], де 0 відповідає найкращому результату, а 1 –

найгіршому. Так, наприклад, для моделі 5x10x10 проведено 5 експериментів для різних значень застосування кросоверу; з-поміж них обираються максимальне і мінімальне значення, які є основою для нормалізації.

- При визначенні кращого розв'язку застосовується збалансований критерій. Для кожного значення досліджуваного параметру, нормалізовані оцінки усереднюються за всіма моделями. Показник з найменшим середнім значенням визначається як середньостатистичний переможець, оскільки очікується, що він дасть найменші значення функціоналу, порівняно з будь-яким іншим альтернативним варіантом.
- За результатами кожного експерименту, після визначення рекомендованих значень параметрів або процедур алгоритму, у подальших експериментах за замовчуванням застосовуватимуться саме ці значення.
- Під розмірністю задачі (мала, середня та велика) розуміється відповідна кількість РЦ, СРЦ та ЦД.

5.3.1. Дослідження впливу ймовірності застосування процедури кросоверу

Кросовер використовується для об'єднання генетичної інформації двох батьківських рішень, аналогічно до біологічної рекомбінації, для отримання потенційно кращого нащадка. Рекомбінуючи сегменти генів, кросовер дозволяє досліджувати нові області простору рішень і передавати корисні ознаки від різних батьків одному нащадку. Значення ймовірності застосування процедури кросоверу може балансувати між пошуком та розвитком, де вища частота збільшує різноманітність у поколіннях, а нижча – зберігає вже існуючі високоякісні особини. Параметр змінювався від початкового значення 0.6 до кінцевого 1.0 із кроком 0.1.

Для візуалізації порівняльного аналізу використано радарну діаграму, яка відображає багатовимірні дані в полярних координатах. Кожна спиця діаграми (рис. 5.1) відповідає певному значенню ймовірності застосування процедури кросовера (від 0.6 до 1.0 з кроком 0.1), рівномірно розташованому навколо кола. Нормалізовані значенні цільового

функціоналу відкладаються по відповідних вісях: чим ближча точка до центру, тим кращий розв'язок було отримано.

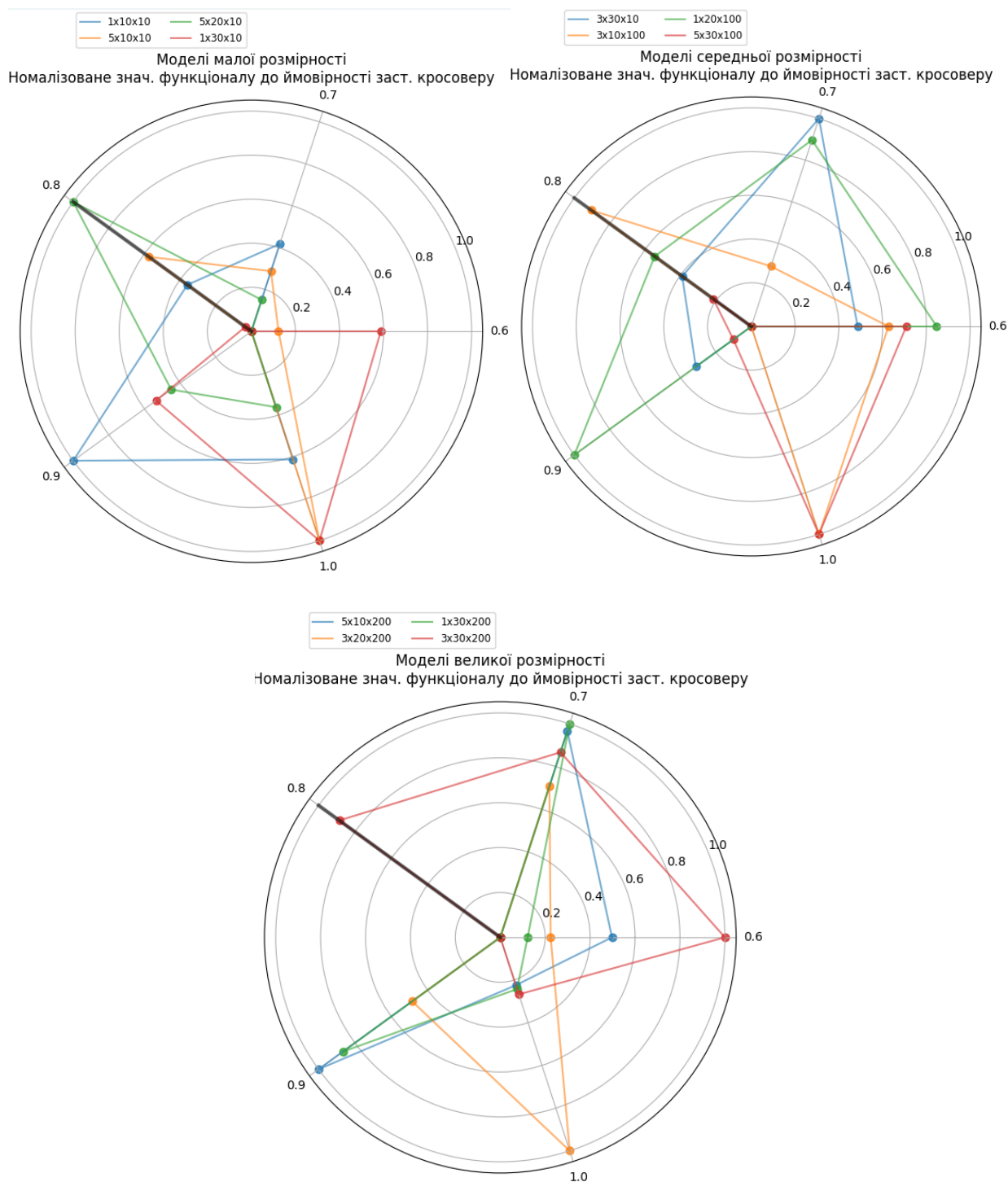


Рис. 5.1. Радарні діаграми для моделей малої, середньої, великої розмірностей із залежністю мінімального значення функціоналу від значення ймовірності застосування процедури кросоверу

Можна побачити, що при застосуванні збалансованого критерія, кращі результати отримані при значенні ймовірності застосування процедури кросоверу 0.8. При цьому можна побачити, що значення 0.7 демонструє гарні результати для моделей малої розмірності.

Результати для всіх груп розмірностей моделей було усереднено. Спочатку виконано порядкову нормалізацію: для кожної моделі мінімальні значення функціоналів, отримані при всіх значеннях ймовірності застосування процедури кросоверу нормалізуються за описаними вище принципами. Потім виконано групове усереднення. Для однієї групи моделей і для кожного значення ймовірності нормалізовані оцінки з цієї підмножини усереднюються, щоб отримати середнє арифметичне значення. Отримане значення представляє типові показники цього параметру для групи за тим же проміжком $[0;1]$. Повторення усереднення для всіх протестованих значень ймовірностей визначає середнє значення для кожної ймовірності кросоверу.

Відповідний графік усередненого значення ймовірності застосування процедури кросоверу залежно від розмірностей моделей наведено на рис. 5.2.

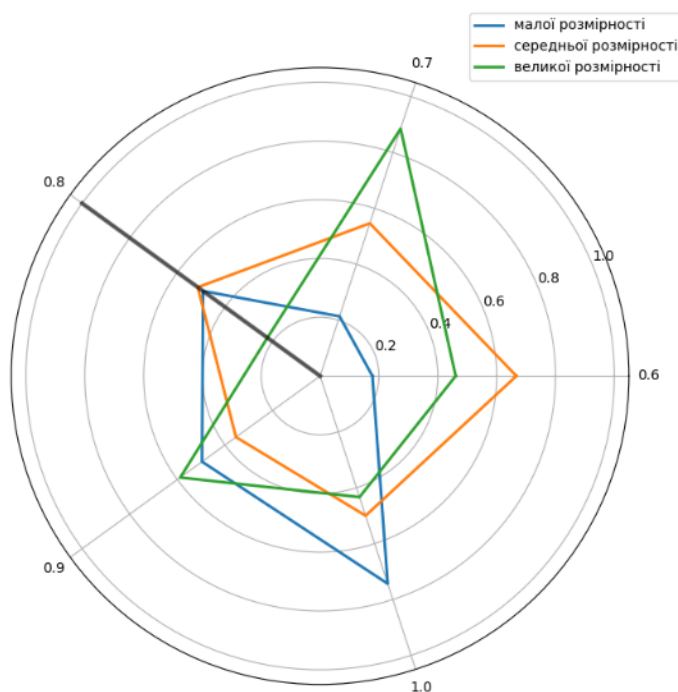


Рис. 5.2. Радарна діаграма усередненого значення ймовірності застосування процедури кросоверу залежно від розмірностей моделей

З результатів діаграми на рис. 5.2 отримано, що при ймовірності застосування процедури кросоверу 0.8 у середньому отримуються кращі результати для моделей різної розмірності.

Для дослідження залежності часу виконання алгоритму від значення ймовірності застосування процедури кросоверу для кожної моделі фіксувався час виконання і обчислювалися його середні значення. Візуалізовані результати залежності нормалізованого часу виконання від ймовірності застосування процедури кросоверу наведено на рис. 5.3 у вигляді стовпчикової діаграми.



Рис. 5.3. Діаграма залежності нормалізованого часу виконання від ймовірності застосування процедури кросоверу

Результати, показані на рис. 5.3, свідчать про те, що найменший середній нормалізований час виконання отримано, коли ймовірність застосування кросоверу дорівнює 0.8 та 0.9. Причому, 0.8 дає кращий результат для моделей малої розмірності, а 0.9 – для моделей середньої та великої розмірностей. З попередніх результатів було

отримано, що значення 0.8 приводить до результатів з меншим значенням цільового функціоналу.

Також було проведено додаткове дослідження щодо ітерацій на яких було останнє покращення значення функціоналу. Ці данні були візуалізовано у такий спосіб: для кожного експерименту визначено ітерацію, на якій розв'язок востаннє покращився при кожному пробному значенні ймовірності застосування процедури кросоверу. Далі для цієї моделі визначено яка частота кросоверу дала останнє покращення. Нарешті, дані агреговані по всіх моделях. В результаті для кожного значення ймовірності застосування процедури кросоверу отримано кількість моделей, що досягли остаточного функціонального покращення при цьому значенні. Результати представлено на рис. 5.4.

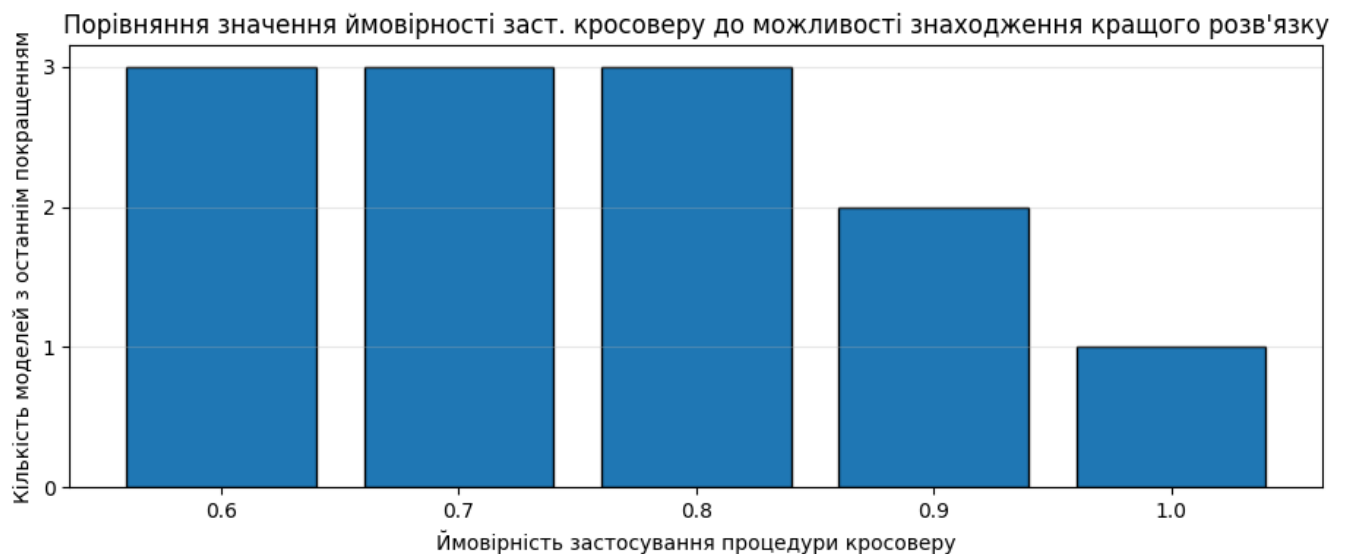


Рис. 5.4. Діаграма залежності покращення на останній ітерації від застосування процедури кросоверу

Значення 0.8 ймовірності застосування процедури є рекомендованим при розв'язанні багатоетапних задач розміщення-активації.

5.3.2. Дослідження впливу ймовірності застосування процедури мутації

Процедура мутації виступає запобіжником, що утримує генетичний алгоритм від генетичного стагнації. Якщо випадково змінювати один або кілька генів у вибраних особин, то це може допомогти вийти за межі локальних оптимумів і підтримувати здоровий рівень дослідження протягом усього пошуку. Було досліджено різні значення ймовірностей застосування процедури мутації у проміжку $[0;0.5]$ з кроком 0.1 (рис. 5.5).

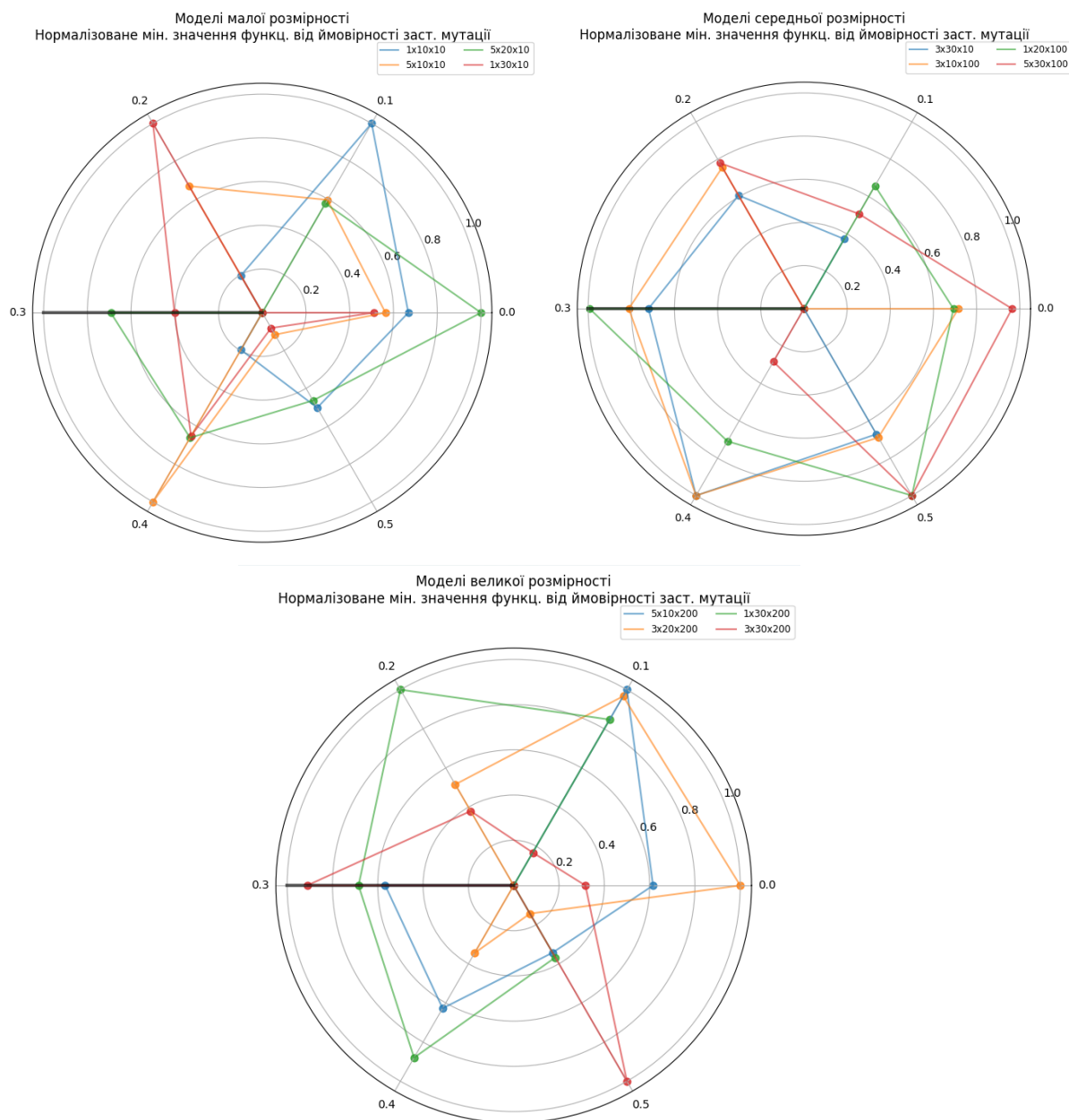


Рис. 5.5. Радарні діаграми для моделей малої, середньої, великої розмірностей із залежності мінімального значення функціоналу від значення ймовірності застосування процедури кросовера

З отриманих результатів, можна побачити, що при застосуванні збалансованого критерія, кращі результати отримані при ймовірності застосування процедури мутації 0.3.

Аналогічно до минулого експерименту виконано порядкову нормалізацію та групове усереднення. Відповідний графік усередненого значення ймовірності застосування процедури мутації залежно від розмірностей моделей наведено на рис. 5.6.

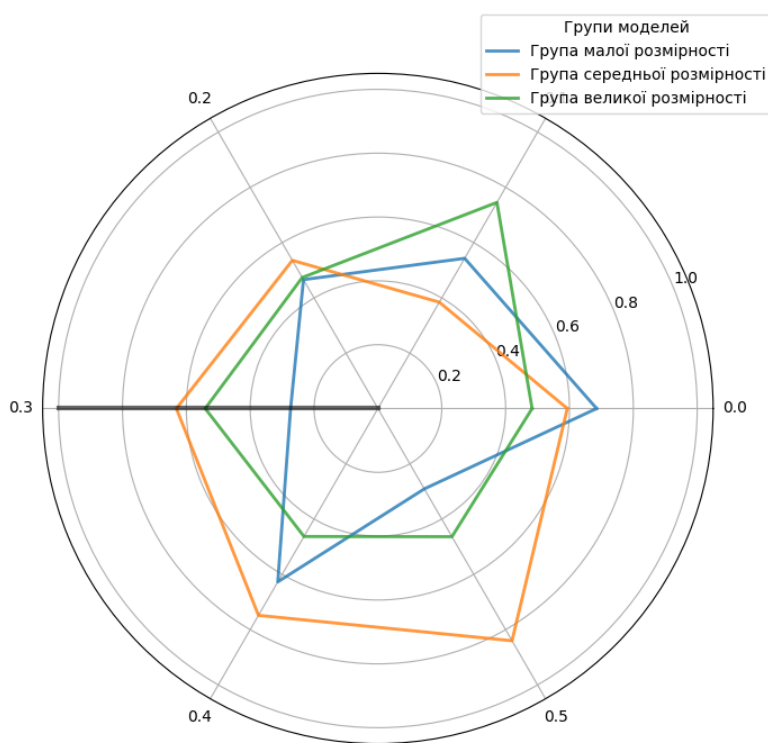


Рис. 5.6. Радарна діаграма усередненого значення ймовірності застосування процедури кросоверу залежно від розмірностей моделей

З результатів діаграми на рис. 5.6 також було отримано, що при значенні ймовірності застосування процедури мутації 0.3 у середньому отримуються кращі результати для моделей різної розмірності.

Візуалізовані результати залежності нормалізованого часу виконання від ймовірності застосування процедури кросоверу наведено на рис. 5.7 у вигляді стовпчикової діаграми.

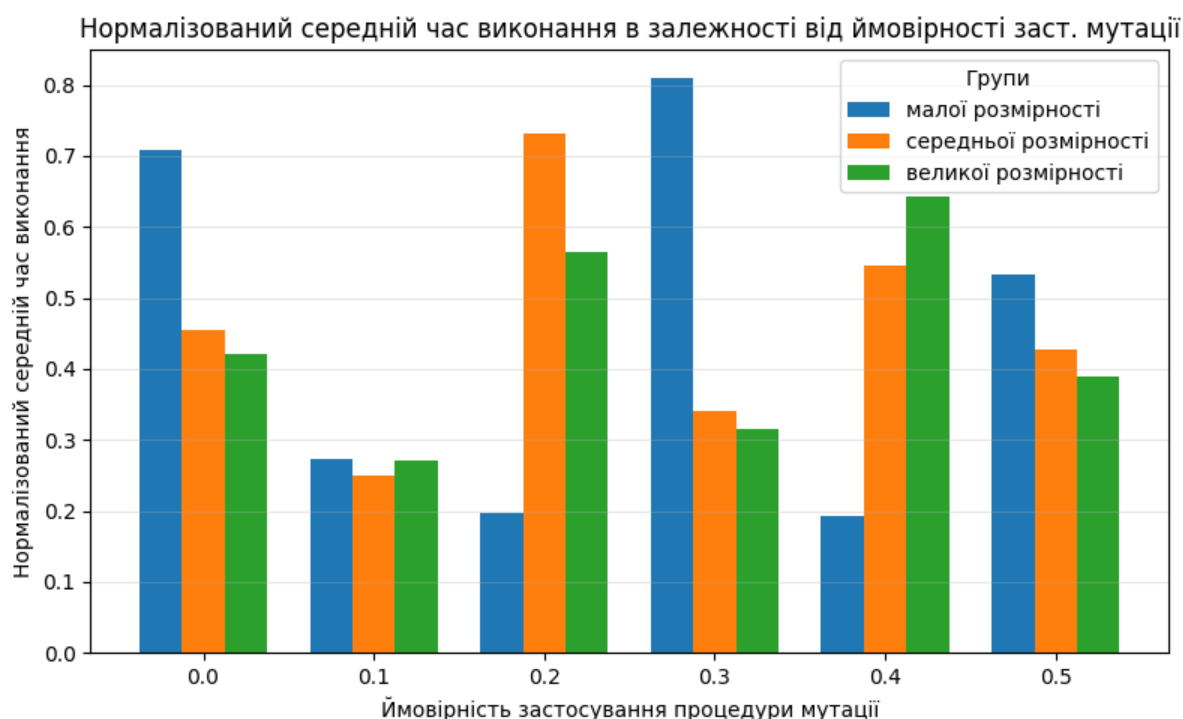


Рис. 5.7. Діаграма залежності нормалізованого часу виконання від ймовірності застосування процедури мутації

З результатів на рис. 5.7 отримано, що найшвидший середній час виконання для моделей малої розмірності можливий при значенні ймовірності застосування процедури мутації 0.4. Для середніх та великих розмірностей – при значенні 0.1.

Результати дослідження щодо останніх ітерацій покращення розв'язку наведено на рис. 5.8. Отримано, що покращення розв'язку трапляється частіше при високому значенні ймовірності застосування процедури мутації (0.5). Це підтверджує головну роль мутації у генетичному алгоритмі, а саме можливість виходу з локального мінімуму. З точки зору найменшого значення функціоналу, значення ймовірності застосування процедури мутації 0.3 приближає до розв'язку з мінімальним значенням функціоналу. Значення 0.1 (для моделей середньої та великої розмірностей) та 0.4 (для моделей малої розмірності) надають найшвидший час розв'язання. Великі значення ймовірності застосування процедури мутації дозволяють знаходити розв'язки з меншим значенням функціоналу. Враховуючи, що мінімальне значення функціоналу має пріоритет при розв'язанні, а інші показники не виявили сильних порушень виконання алгоритму, то

рекомендованим значенням ймовірності застосування процедури мутації при розв'язанні багатоетапних задач розміщення-активації із застосуванням еволюційного алгоритму є 0.3.

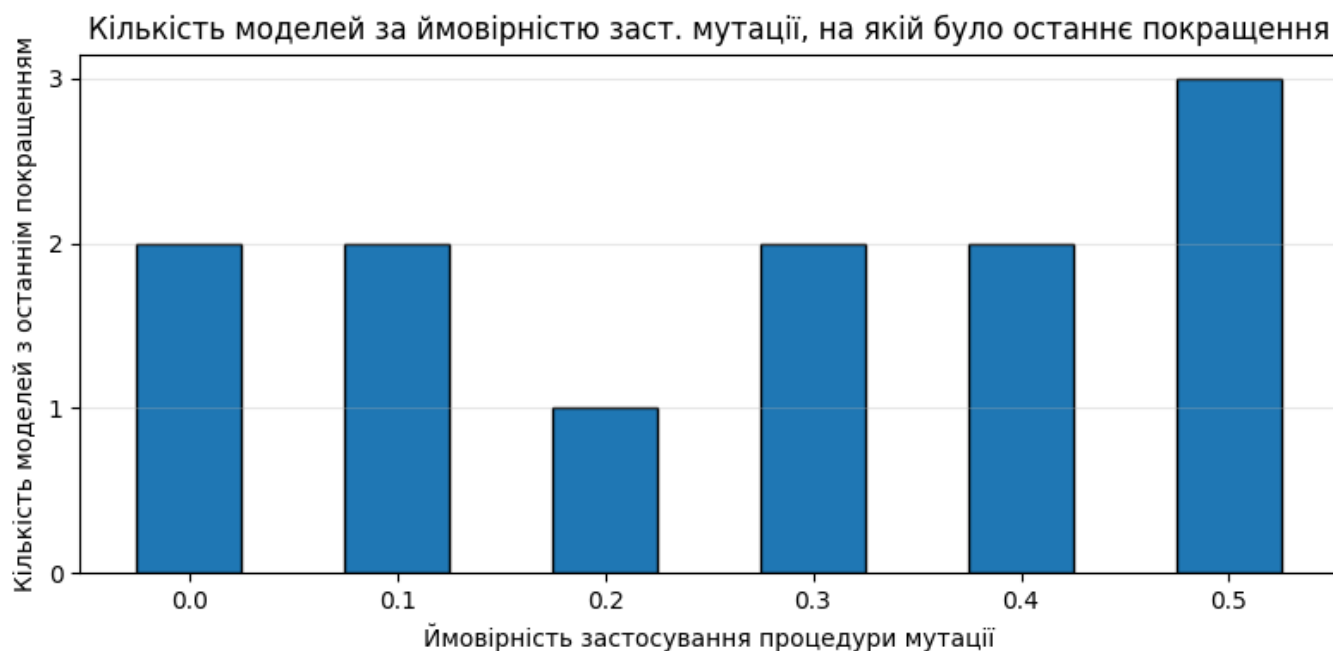


Рис. 5.8. Діаграма залежності покращення на останній ітерації від ймовірності застосування процедури мутації

5.3.3. Дослідження впливу максимальної кількості поколінь

У генетичному алгоритмі значення максимальної кількості поколінь (або ітерацій) діє як верхня межа критерію завершення, що безпосередньо формує і якість рішення, і обчислювальну вартість. Занадто мала кількість поколінь може призвести до того, що популяція не встигне достатньо еволюціонувати та передчасно зупиниться до того, як достатній відбір, кросовер і мутації вдосконалять розв'язок, тоді як занадто велика кількість поколінь може призвести до втрати часу на дослідження простору пошуку, який вже насичений майже однаковими рішеннями.

Параметр максимальної кількості ітерацій було досліджено з початковим значенням 25 та кінцевим 100 із кроком 25.

На рис. 5.9 наведена стовпчикова діаграма залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від максимальної кількості поколінь.

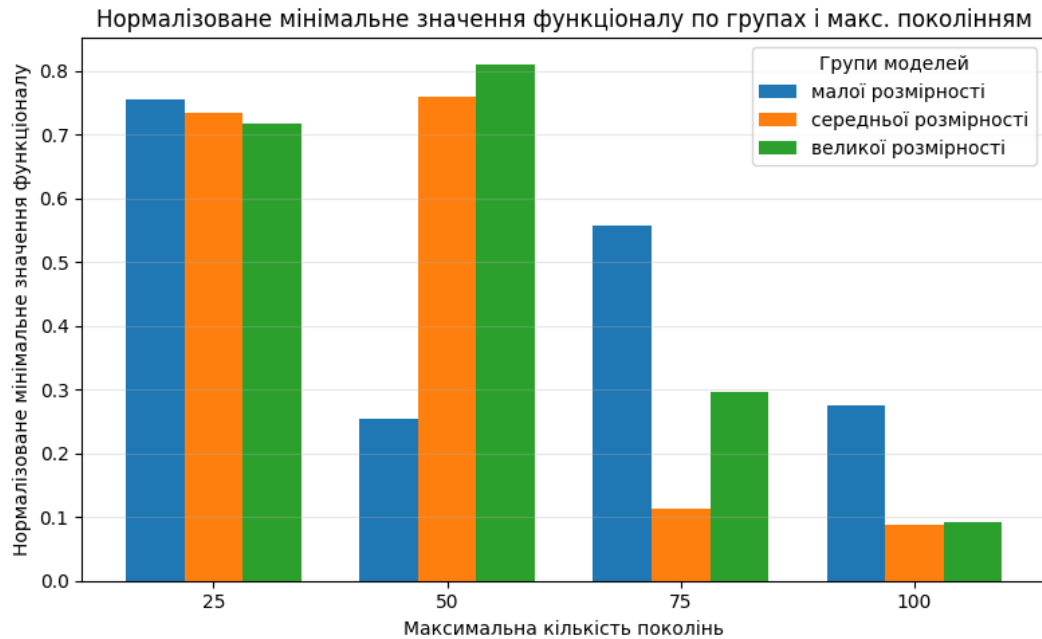


Рис. 5.9. Діаграма залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від максимальної кількості поколінь

З результатів на рис. 5.9. отримано, що при 25 поколіннях усі три групи моделей (малі, середні та великі) дають близькі нормалізовані мінімуми функціоналу ($\approx 0,72$ – $0,75$), що свідчить про недостатню кількість ітерацій для глибокого пошуку; збільшення до 50 поколінь покращує результати малих моделей (до $\approx 0,25$), тоді як середні й великі змінюються до $\approx 0,76$ і $\approx 0,81$ відповідно; при 75 поколіннях середні та великі моделі суттєво знижують функціонал ($\approx 0,11$ і $\approx 0,30$), тоді як малі моделі піднімаються до $\approx 0,56$; нарешті, при 100 поколіннях усі групи сходяться до низьких значень ($\approx 0,28$ для малих і $\approx 0,09$ для середніх та великих), що дозволяє зробити висновок: для малих моделей зазвичай достатньо 50 поколінь, тоді як середнім і великим слід встановити межу в 75–100 ітерацій як оптимальний рішення для мінімального значення функціоналу.

Перейдемо до дослідження часу виконання в залежності від максимальної кількості поколінь (рис. 5.10).

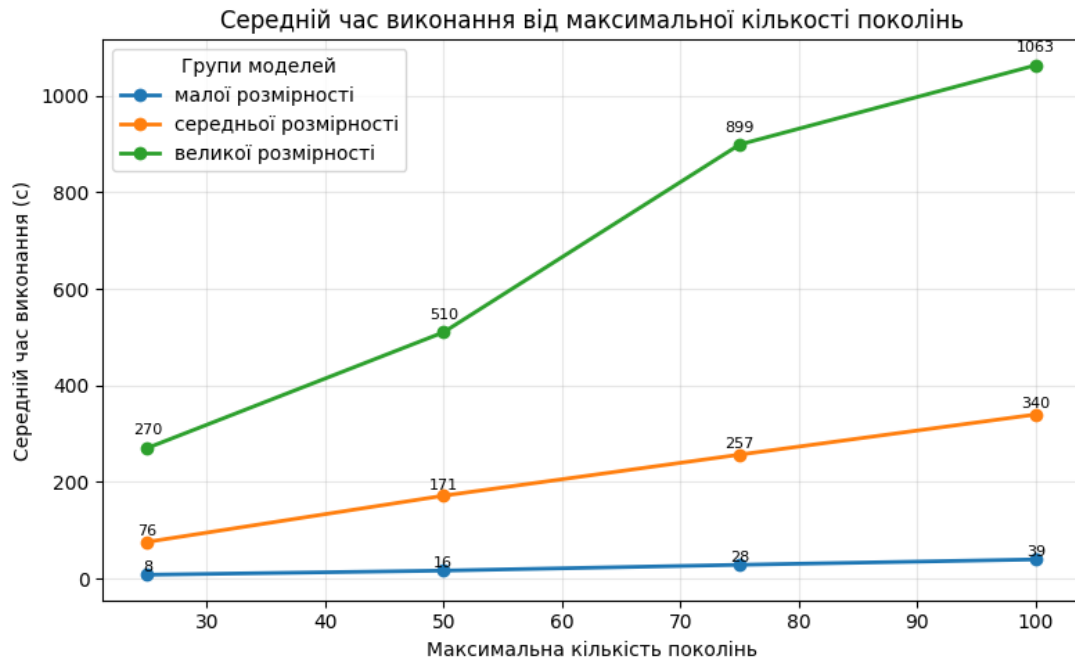


Рис. 5.10. Графік залежності середнього часу виконання від максимальної кількості поколінь

З рис. 5.10 простежується зростання середнього часу виконання зі збільшенням максимальної кількості поколінь для всіх трьох груп моделей: час виконання для моделей малої розмірності змінюється від приблизно 8 с при 25 поколіннях до 39 с при 100 ($\approx 0,4$ с/покоління), середньої розмірності – від ~ 76 с до 340 с ($\approx 3,6$ с/покоління), великої розмірності – від ~ 270 с до 1063 с ($\approx 10,4$ с/покоління). Це вказує на майже лінійну залежність часу від числа ітерацій, але з константою пропорційності, що суттєво зростає з розміром задачі: у великих моделей кожне додаткове покоління додає понад 10 с обчислень, у середніх – близько 3–4 с, а в малих – менше 1 с. Така різниця відображає збільшення обчислювальної складності з ростом розміру моделі: маленькі моделі майже не відчують нарощення поколінь, тоді як середні й особливо великі демонструють значний стрибок часу виконання.

Номер останньої ітерації, на якій відбулось покращення результату для експериментів було візуалізовано. Для цього використано діаграму розсіювання, де по Х-координаті розташовано всі моделі. По Y-координаті ітерації останнього покращення у проміжку від

0 до 100. Також на самому полотні визначено точки: сині кола – максимальна кількість поколінь дорівнює 25; жовті квадрати – 50; зелені трикутники – 75; червоні ромби – 100. Результати наведені на рис. 5.11.

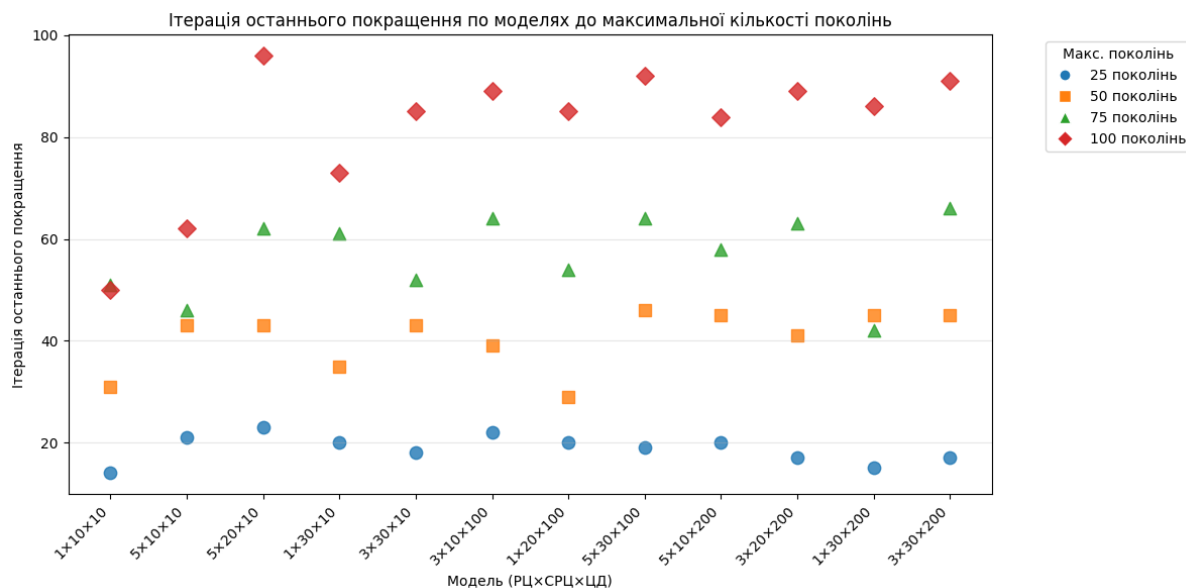


Рис. 5.11. Діаграма розсіювання зі значеннями останньої ітерації на якій відбулось покращення залежно від моделі та значення максимальної кількості поколінь

На діаграмі розсіювання для кожної моделі можна побачити, що середня ітерація останнього покращення зростає практично пропорційно до ліміту поколінь і це свідчить про майже лінійну залежність: алгоритм знаходить останнє покращення переважно в діапазоні 70–90 % від максимальної кількості ітерацій. Отримані результати свідчать, що, при невеликій максимальній кількості поколінь (25 та 50), останнє покращення відбувається поблизу граничного значення кількості поколінь. Водночас при збільшенні цього параметра до 75 та 100 поколінь, останнє зменшення функціоналу відбувається раніше за встановлений ліміт. Додатково було розглянуто ідею впровадження механізму ранньої зупинки на рівні 70–80 % від значення максимальної кількості поколінь, що дозволило зекономити до 20–30 % часу без суттєвої втрати якості розв’язку.

Для раціонального вибору значення, за результатами експериментів, побудовано графік, де для кожного значення максимальної кількості поколінь:

- отримано нормалізоване значення функціоналу та середнє значення нормалізованого часу виконання в діапазоні $[0;1]$;
- на X-координаті розміщено значення максимальної кількості поколінь, що досліджуються; на Y-координаті шкалу $[0;1]$.

Результати зображені на рис. 5.12, де по осі X розташована максимальна кількість поколінь (25, 50, 75, 100), а по осі Y – два нормалізовані індикатори в діапазоні $[0-1]$: сині кола – нормалізоване значення функціоналу (0 – найкраще, 1 – найгірше), помаранчеві квадрати – нормалізований час виконання (0 – найшвидше, 1 – найповільніше).

При 25 поколіннях отримано максимальне значення функціоналу (1.00) та мінімальний час (0.00), при 100 – навпаки: функціонал досягає найнижчого рівня (0.00), але час виконується найдовше (1.00). Особливо цікаві точки при 50 і 75 ітераціях – вони ілюструють класичний компроміс. За 50 поколінь отримано досить швидке рішення (час виконання ≈ 0.30), але за рахунок погіршення якості (значення функціоналу ≈ 0.74). Натомість 75 поколінь надають значно кращий функціонал (значення функціоналу ≈ 0.31) при прийнятному, хоча вже вищому, часі виконання (час виконання ≈ 0.70).

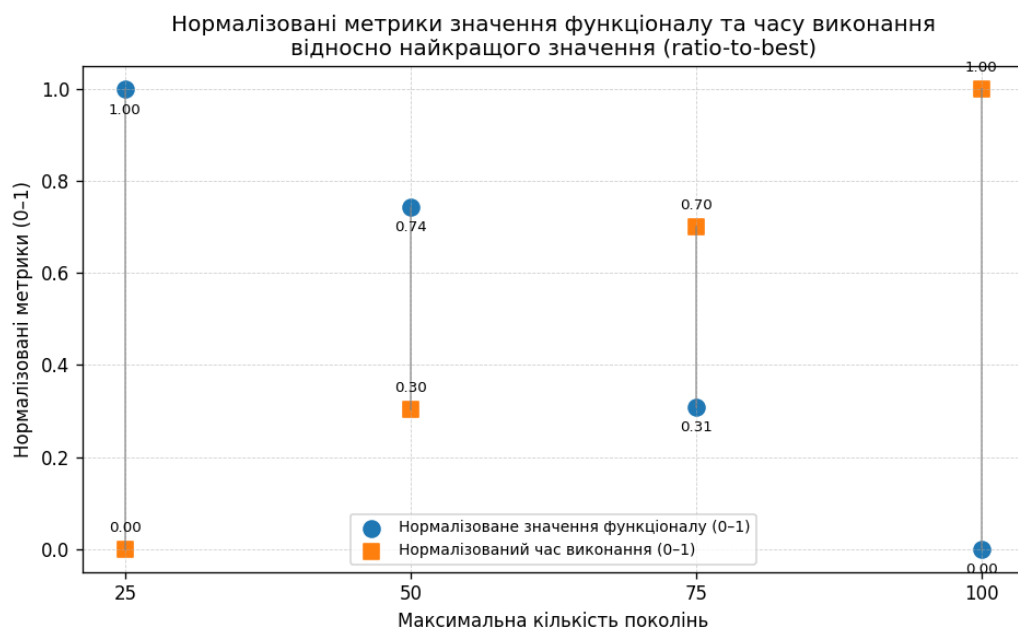


Рис. 5.12. Графік нормалізованих значень функціоналу (квадрати) та часу виконання (кола) до максимальної кількості поколінь

Результати та аналіз експериментів було враховано та обрано критерій за часом виконання, відповідно до якого значення максимальної кількості поколінь 50 є рекомендованим значенням при розв'язанні багатоетапних задач розміщення-активації із застосуванням генетичного алгоритму.

5.3.4. Дослідження впливу розміру популяції

Розмір популяції в еволюційному алгоритмі відповідає кількості можливих розв'язків (хромосом), що зберігаються в кожному поколінні. Параметр розміру популяцій змінювався з початковим значенням 25 та кінцевим 150 із кроком 25.

На рис. 5.13 наведена стовпчикова діаграма залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від максимальної кількості поколінь з похибками.

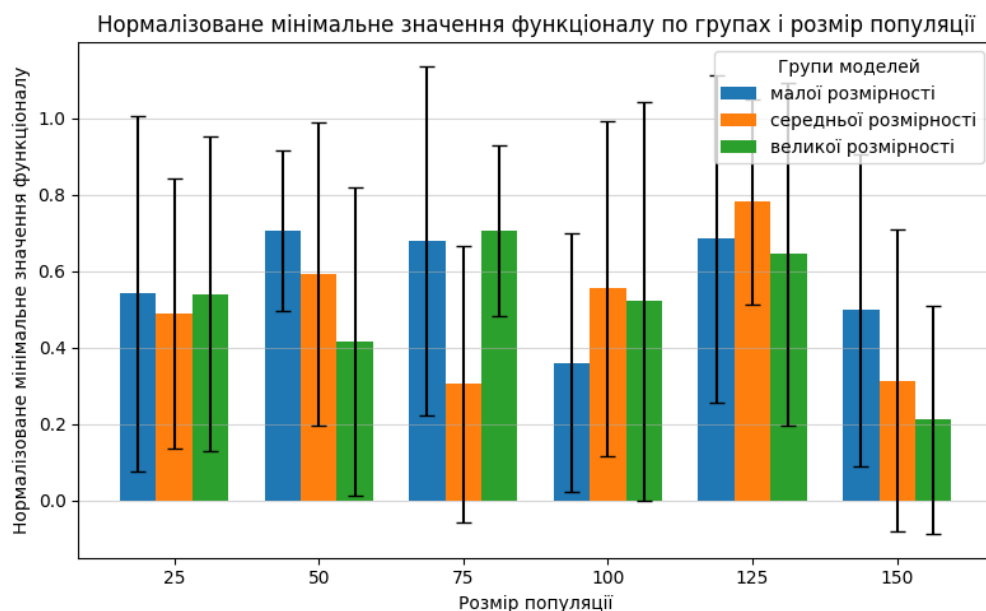


Рис. 5.13. Діаграма залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від розміру популяції

Розмір популяції 100 (для моделей малої розмірності), 75 або 150 (для моделей середньої розмірності) і 150 (для моделей великої розмірності) є попередніми значеннями, що можуть бути кандидатами для рекомендованих значень за замовчуванням.

Побудовано теплову карту (рис. 5.14), що відображає залежність мінімального значення функціоналу від розміру популяції, де кожен стовпець на горизонтальній осі відповідає одному з розмірів популяції, тоді як кожен рядок на вертикальній осі – це одна з моделей. Колір кожної клітинки відповідає спектру від світлого до темного: клітинки на темній границі (синій) позначають моделі, де нормалізоване мінімальне функціональне значення було найближчим до 0 (найкращі розв’язки), а клітинки на світлій (білий) показують значення ближче до 1 (найгірші відносні показники).

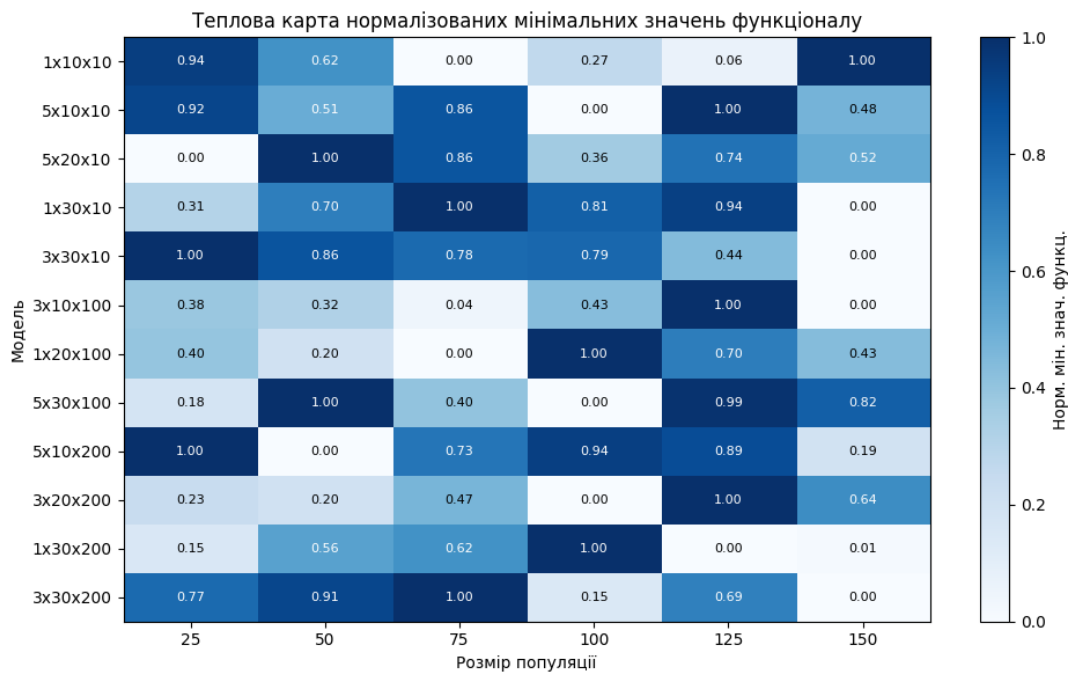


Рис. 5.14. Теплова карта мінімального нормалізованого значення функціоналу та розміру популяції

Як бачимо, невеликий розмір популяції (25) нечасто забезпечує мінімальні значення функціоналу, за винятком двох відносно простих моделей, тоді як найвище значення (150), зазвичай, є оптимальним для більших моделей. Середні значення 75 і 100 забезпечують найкращі показники приблизно для половини моделей і майже ніколи не демонструють найгірших результатів, що свідчить про їхню надійність як універсального вибору. На противагу цьому, сукупність 125 є помітно темною для багатьох рядів, що означає, що вона часто дає найгірший нормалізований мінімум, і її вибору слід уникати. Отже, оптимальна кількість особин в популяції є дуже чутливою

до розміру моделі, але значення 75-100 забезпечують найбільш послідовну мінімізацію, тоді як дуже малі або 125 одиниць є ризикованим вибором.

Наступним кроком було досліджено час виконання в залежності від розміру популяції (рис. 5.15).

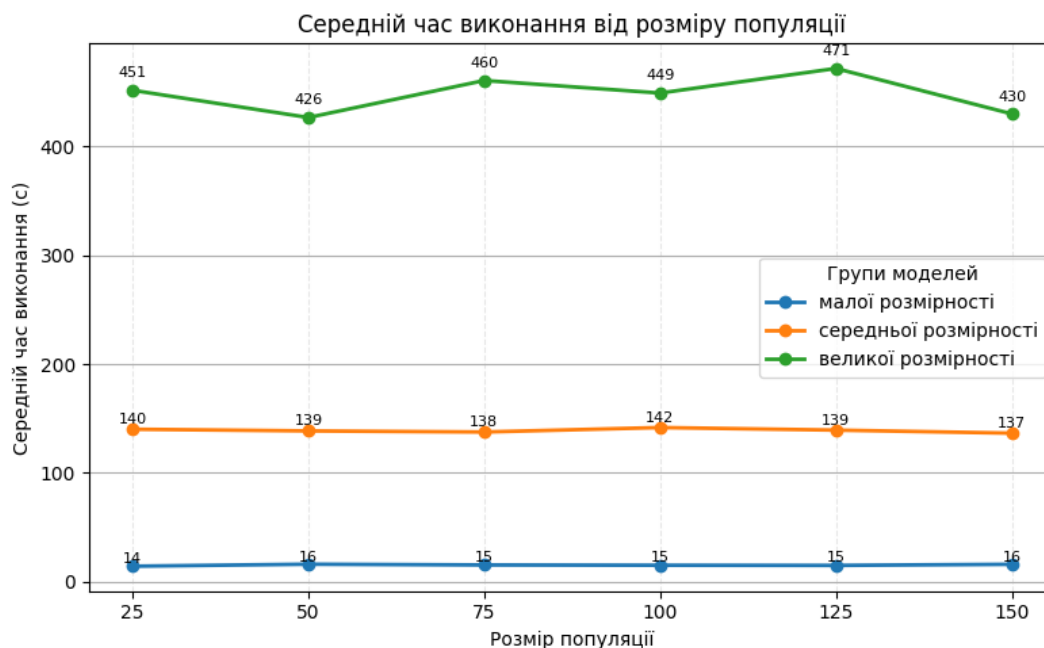


Рис. 5.15. Графік залежності середнього часу виконання від максимальної кількості поколінь

Отримані результати свідчать, що середній час виконання залежить більше від розміру моделі, ніж від розміру популяції: маленькі моделі стабільно працюють за $\approx 14 - 16$ с незалежно від кількості хромосом; середні розв'язуються за $137 - 142$ с, і збільшення популяції від 25 до 150 додає тільки кілька секунд, тобто навантаження росте досить повільно; великі моделі (зелена крива) потребують у 3 – 4 рази більше часу – від 420 до 470 с: найшвидше виконання при 50 та 150 особинах (≈ 426 і 430 с), найповільніше – при 125 (≈ 471 с), але коливання залишаються в межах 10%. Таким чином, збільшення розміру популяції майже не вплинуло на тривалість виконання порівняно з розміром самої моделі. Відчутний пік часу спостерігається лише на великих моделях – близько 125 особин.

Для раціонального вибору значення, за результатами експериментів, побудовано графік, де для кожного значення максимальної кількості поколінь:

- отримано нормалізоване значення функціоналу та середнє значення нормалізованого часу виконання в діапазоні $[0;1]$;
- на X-координаті розміщено значення максимальної кількості поколінь, що досліджуються; на Y-координаті шкалу $[0;1]$.

Результати зображено на рис. 5.16, де по горизонтальній осі розташовані розміри популяцій (25, 50, 75, 100, 125, 150), а по вертикальній осі – два нормалізовані індикатори в діапазоні $[0-1]$: сині кола – нормалізоване значення функціоналу (0 – найкраще, 1 – найгірше), помаранчеві квадрати – нормалізований час виконання (0 – найшвидше, 1 – найповільніше).



Рис. 5.16. Графік нормалізованих значень функціоналу (квадрати) та часу виконання (кола) до розміру популяцій

Вочевидь, найбільш невдалим виявився розмір популяції 125: і функціонал, і час досягають найгіршого рівня (1.0). Популяція 25 забезпечує мінімальний час (0.0), але

лишає функціонал на посередньому рівні (≈ 0.63). Зі збільшенням до 50 часу стає більше, а якість не покращується, тому виграшу немає. При 75 обидві метрики знаходяться у середині шкали (≈ 0.47 і 0.58), тобто це компроміс без явних переваг. Найкращими виглядають два останні варіанти: 100 дає майже мінімальне значення функціоналу (0.06) за помірний час (0.34), тоді як 150 взагалі досягає найкращої якості (0.00) і при цьому тримає час на прийнятному рівні (0.19). Отже, практичний вибір – 100 особин для збалансованого підходу або 150, якщо пріоритетом є максимальна якість рішення.

Дослідження щодо останніх ітерацій покращення розв’язку візуалізовано аналогічно до попередніх досліджень (рис. 5.17). Можна зробити висновок, що покращення розв’язку трапляється частіше при розмірі популяції – 100. Також результати для значень 75 та 125 мають високу ймовірність покращення.



Рис. 5.17. Діаграма залежності покращення на останній ітерації від розміру популяції

В результаті було отримано, що з точки зору найменшого значення функціоналу, максимальне значення розміру популяції наближається до найкращого рішення. Також було виявлено, що збільшення розміру популяції істотно не впливає на час виконання алгоритму. Компромісні відносно часу виконання та значення функціоналу розміри

перебувають між значеннями 75 та 100. Рекомендованим значенням розміру популяції обрано 100.

5.3.5. Дослідження впливу стратегії відбору батьків

Ще одним важливим етапом у генетичному алгоритмі є процедура відбору батьків. Відбір у генетичному алгоритмі визначає, які особини з поточної популяції передадуть свої гени наступному поколінню на основі їхньої придатності.

Відбір за *принципом колеса рулетки* розподіляє для кожної особини ймовірність відбору, пропорційну її пристосованості, таким чином досягаючи випадкової вибірки популяції.

Турнірний відбір – це стохастична процедура, в якій для кожного з батьків, що обираються, з популяції рівномірно випадковим чином відбирають k особин і обирають ту, яка має найменше цільове значення. Регулюючи розмір турніру k , можна безпосередньо моделювати тиск відбору: більше k збільшує ймовірність того, що відтворюватимуться лише особини з найнижчими значеннями, тоді як менше k дозволяє слабшим розв'язкам виживати і, таким чином, зберігає генетичне різноманіття.

Ранговий відбір обчислює ймовірність розмноження кожної особини на основі її позиції в популяції, відсортованої за об'єктивною цінністю. Завдяки розподілу ваг відповідно до рангу так, що рішення з найменшими витратами (найкращі) отримують найбільшу вагу, а рішення з найбільшими витратами (найгірші) – найменшу, цей метод запобігає монополізації розмноження винятково придатними особинами і зберігає генетичне різноманіття.

Стохастична універсальна вибірка викладає скориговані значення придатності популяції наскрізь, а потім розміщує N рівновіддалених показників уздовж цієї «лінії придатності», щоб вибрати N батьків за один прохід – замість того, щоб крутити колесо окремо для кожного відбору. Це гарантує, що кожна особина буде обрана приблизно стільки разів, скільки дозволяє її фітнес, що значно зменшує випадкові коливання, які зустрічаються при незалежному обертанні рулетки.

Для кожної моделі було застосовано різні стратегії відбору, зокрема принципи колеса рулетки, турнірний, ранговий та стохастичну універсальну вибірку.

На рис. 5.18 наведений графік залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від стратегії відбору батьків.

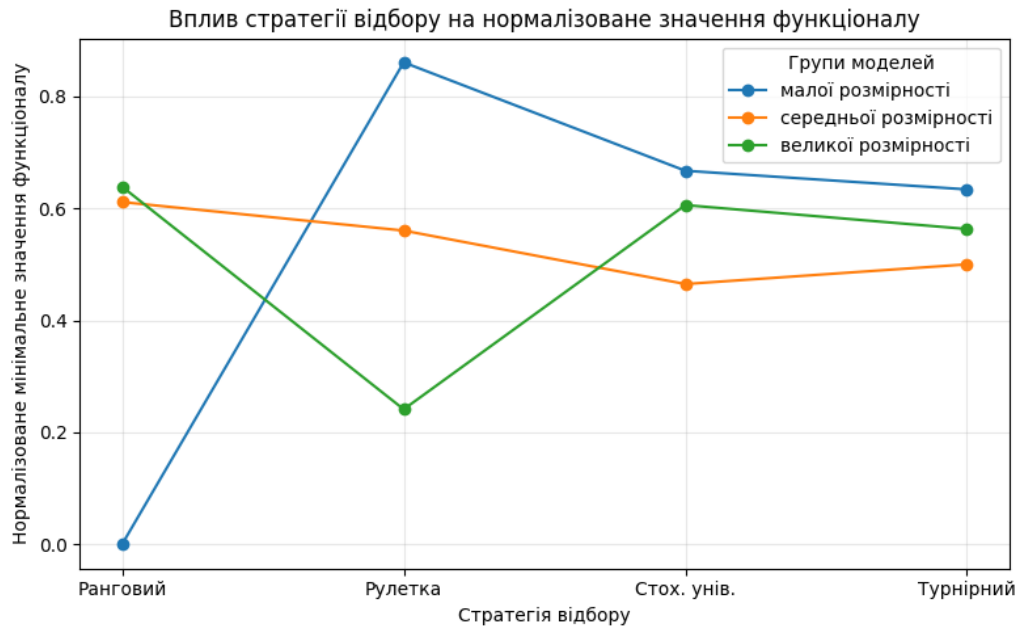


Рис. 5.18. Графік залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від стратегії відбору батьків

З результатів дослідження випливає, що вибір методу відбору має помітний вплив на значення функціоналу для моделей різного розміру. Для моделей малої розмірності відбір за допомогою рулетки дає найкращі результати ($\approx 0,87$), тоді як відбір на основі рангів практично не дає покращення. У моделях середньої розмірності ранговий відбір показує гірші результати ($\approx 0,61$), далі йдуть метод рулетки ($\approx 0,56$), турнірний ($\approx 0,50$) та стохастична універсальна вибірка ($\approx 0,47$). Для моделей великої розмірності ранговий відбір знову показує найкращі результати ($\approx 0,64$), рулетка – найгірші ($\approx 0,24$), а стохастична універсальна вибірка ($\approx 0,60$) і турнірний відбір ($\approx 0,56$) дають стабільні, проміжні результати.

Було побудовано теплову карту (див. рис. 5.19), де кожен стовпець на горизонтальній осі відповідає одній зі стратегій відбору батьків, тоді як кожен рядок на вертикальній осі – це одна з моделей.

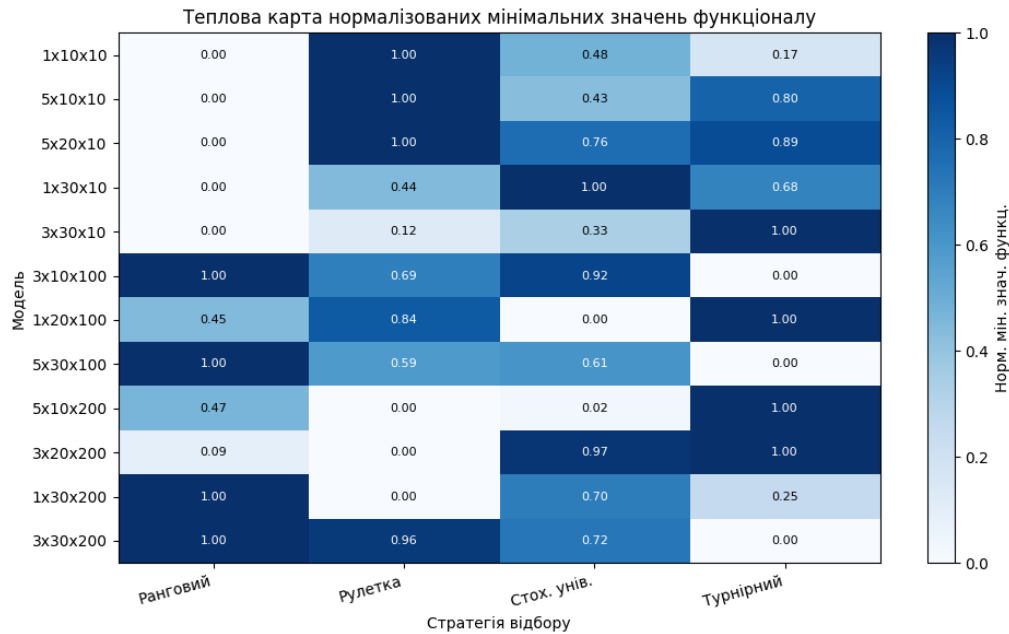


Рис. 5.19. Теплова карта мінімального нормалізованого значення функціоналу та стратегії відбору батьків

Отже, бачимо, що стохастична універсальна вибірка найчастіше дає високі мінімуми (значення між 0,48 і 1,00) для всіх дванадцяти конфігурацій моделей, тоді як відбори на основі рангів і рулетки демонструють екстремальні коливання – досягаючи ідеальних оцінок (1,00) для деяких дрібномасштабних моделей, але прямують до нуля для кількох більших. Турнірний відбір так само досягає максимуму в окремих випадках, але повністю провалюється в інших. Загалом, стохастична універсальна вибірка забезпечує найстабільнішу продуктивність для задач різного розміру.

Наступним кроком було досліджено час виконання в залежності від стратегії відбору батьків. На рис. 5.20 наведено відповідний лінійний графік.

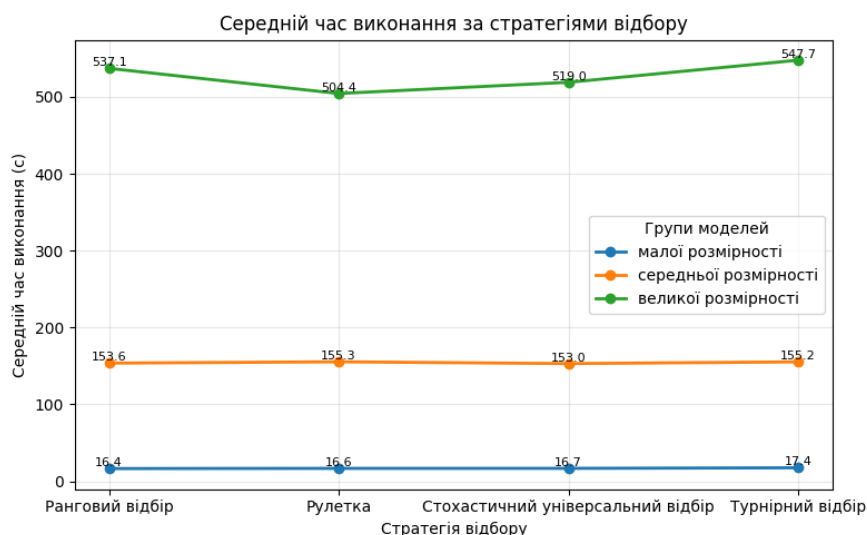


Рис. 5.20. Графік залежності середнього часу виконання від стратегії відбору батьків

Таким чином, стратегія відбору рулеткою надає помірне прискорення на великих задачах. Для кожної стратегії відбору досліджено кількість моделей, що досягли остаточного зменшення значення функціоналу. Ці данні зображено на рис. 5.21.

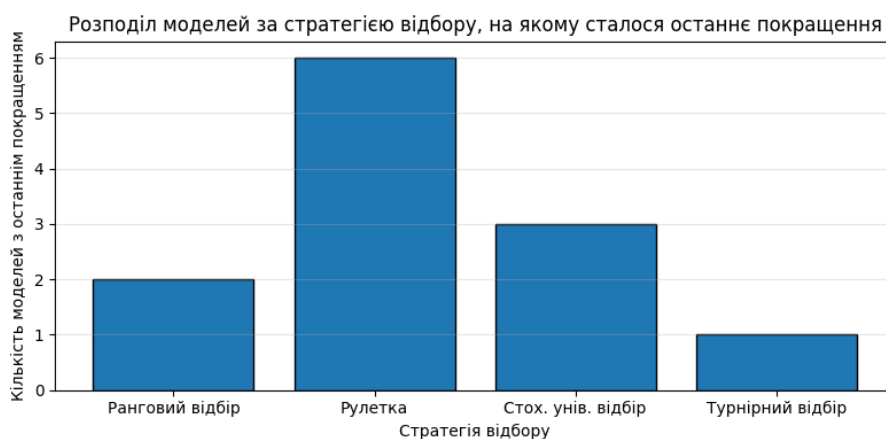


Рис. 5.21. Діаграма залежності покращення на останній ітерації від стратегії відбору

Отже, метод рулетки дозволяє максимально покращувати розв'язки і є рекомендованою процедурою.

5.3.6. Дослідження впливу стратегії відбору нащадків

Стратегія виживання в еволюційному алгоритмі визначає, які особини переходять у наступне покоління після того, як з'являються нащадки. Було досліджено такі стратегії їх відбору.

Стратегія виживання *методом відтинання (truncation)* наступне покоління формується шляхом ранжування всіх особин за фітнесом і залишення лише найкращих, а решту відкидають.

Стратегія виживання *із заміною на основі віку* доповнює оцінку придатності явним обмеженням тривалості життя: кожна особина має лічильник віку, і як тільки він перевищує заздалегідь визначену максимальну кількість поколінь, особина видаляється, незалежно від її придатності.

Стратегія *заміщення популяції* зберігає структуру субпопуляції, оскільки кожне потомство конкурує безпосередньо зі своїм найбільш схожим представником у поточній популяції, а не з найгіршим представником у глобальному масштабі. Подібність вимірюється в просторі генотипів або фенотипів, і якщо пристосованість нащадка перевершує пристосованість його найближчого сусіда, він займає його місце; в іншому випадку його відкидають.

Було розглянуто такий перелік стратегій виживання для кожної моделі: *методом відтинання, заміною на основі віку, заміщення популяції*.

На рис. 5.22 наведено графік залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від стратегії відбору нащадків, де можна побачити, що найкраща стратегія виживання істотно залежить від розміру задачі. Для моделей малої розмірності як заміна за віком, так і метод відтинання досягають найнижчих нормалізованих значень функціоналу ($\approx 0,33$), помітно перевершуючи заміщення ($\approx 0,75$). У моделях середньої розмірності виділяється заміна за віком ($\approx 0,09$), тоді як заміщення ($\approx 0,50$) і метод відтинання ($\approx 0,82$) демонструють гірші результати. На противагу цьому, на моделях великої розмірності заміщення дає найкращі результати ($\approx 0,32$), тоді як заміна за віком ($\approx 0,50$) та метод відтинання ($\approx 0,72$) мають гірші показники. Ці результати вказують на

те, що заміна за віком є найефективнішою для моделей середньої складності, заміщення – на великих задачах, а відтинання залишається конкурентоспроможним лише на найменших прикладах.

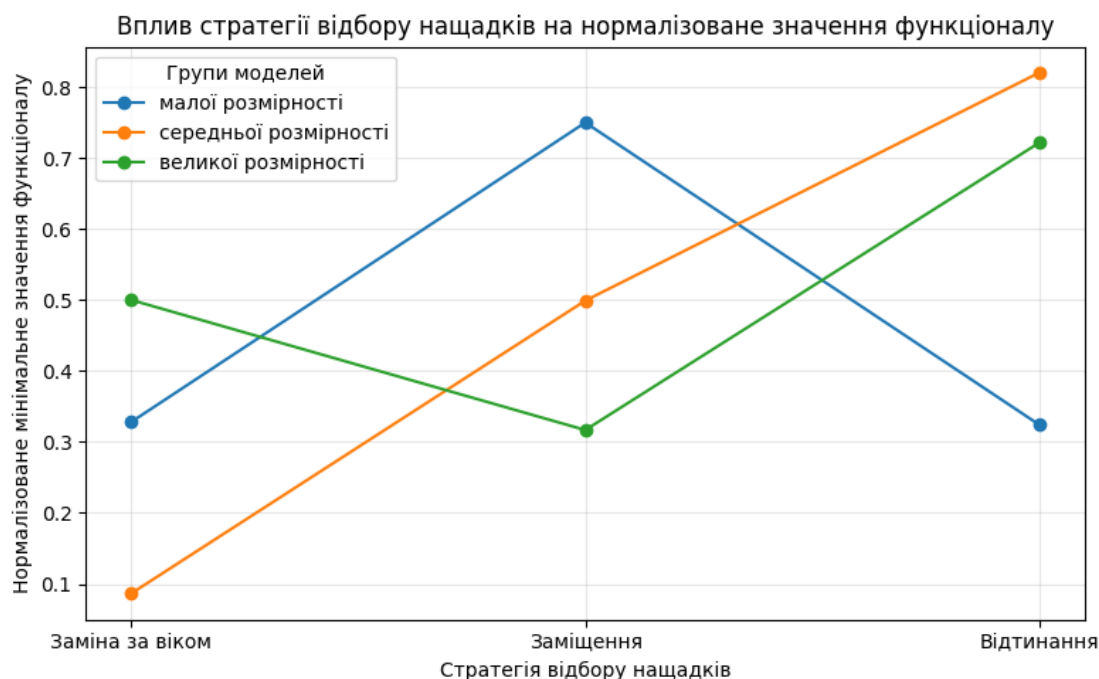


Рис. 5.22. Графік залежності мінімального нормалізованого значення функціоналу від стратегії відбору нащадків

Побудовано теплову карту (рис. 5.23), де кожен стовпець на горизонтальній осі відповідає одній зі стратегій відбору нащадків, а кожен рядок на вертикальній осі – це одна з моделей. Впливає, що заміна за віком виявляється найефективнішою в різних масштабах моделі, причому відтинання іноді перевершує проміжні та дуже великі сценарії, а заміщення конкурує з нею лише моделях малої розмірності.

Наступним кроком, було досліджено час виконання в залежності від стратегії відбору нащадків. На рис. 5.24 наведений відповідний лінійний графік.

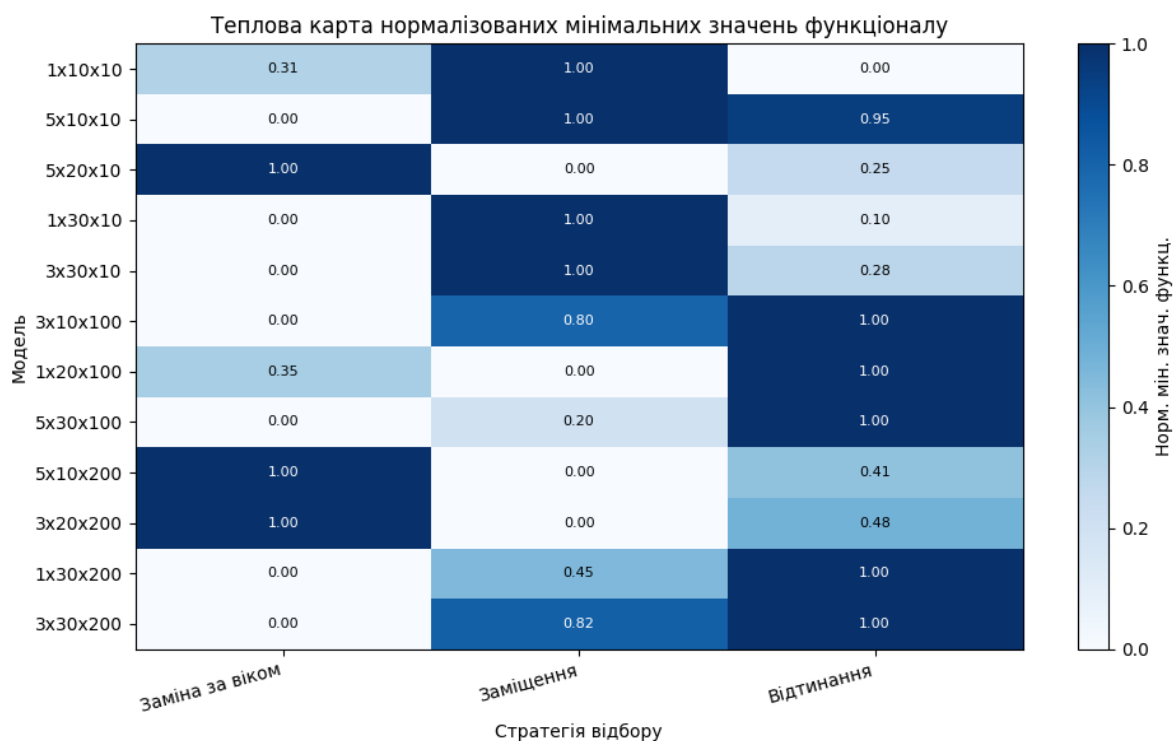


Рис. 5.23. Теплова карта мінімального нормалізованого значення функціоналу та стратегії відбору нащадків

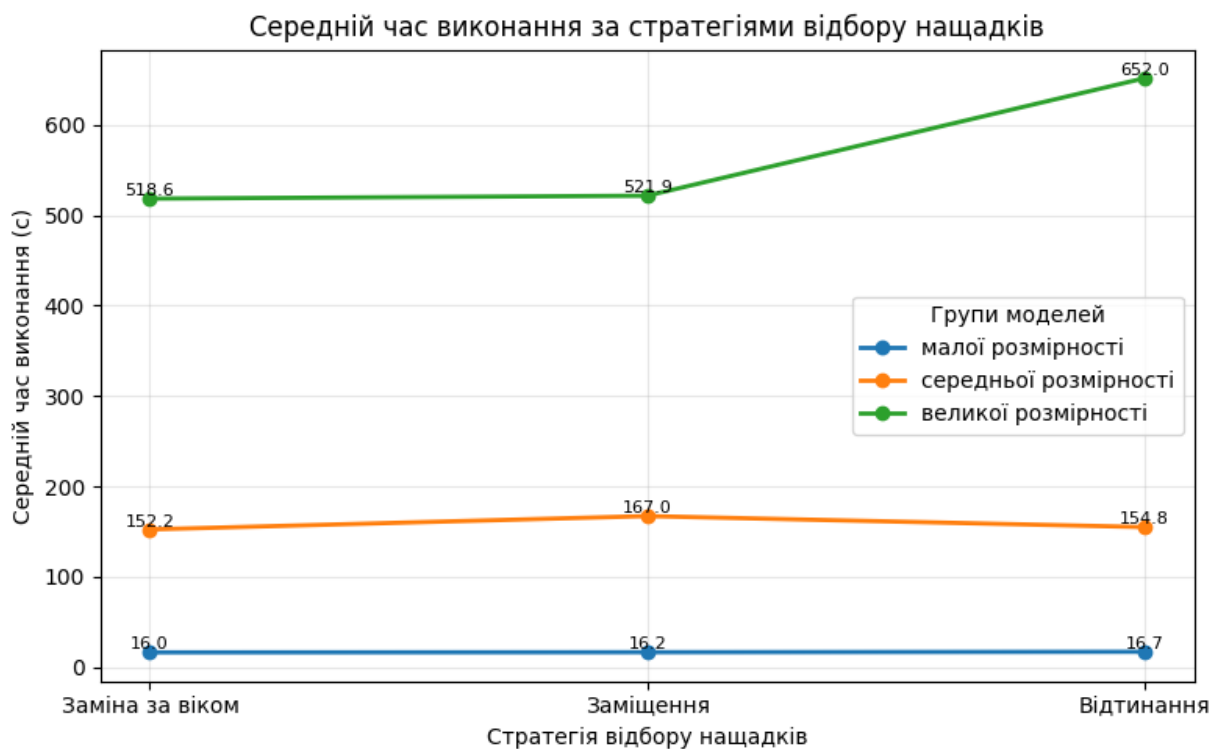


Рис. 5.24. Графік залежності середнього часу виконання від стратегії відбору батьків

Отже, для моделей малої розмірності всі три стратегії відбору нащадків мають практично однакові за часом виконання (~ 16 с). У моделях середньої розмірності заміщення є найповільнішим (≈ 167 с), тоді як заміна за віком та відтинання працюють майже однаково (≈ 152 - 155 с). У моделях великої розмірності відтинання стає найдорожчим (≈ 652 с), заміщення дещо сповільнюється (≈ 522 с), а заміна за віком залишається найшвидшою (≈ 519 с). Загалом, заміна на основі віку найкраще масштабується з розміром проблеми, тоді як відтинання різко зростає на великих моделях. Для кожної стратегії відбору нащадків було отримано кількість моделей, що досягли остаточного функціонального покращення при цьому значенні. Ці данні зображено на рис. 5.25.

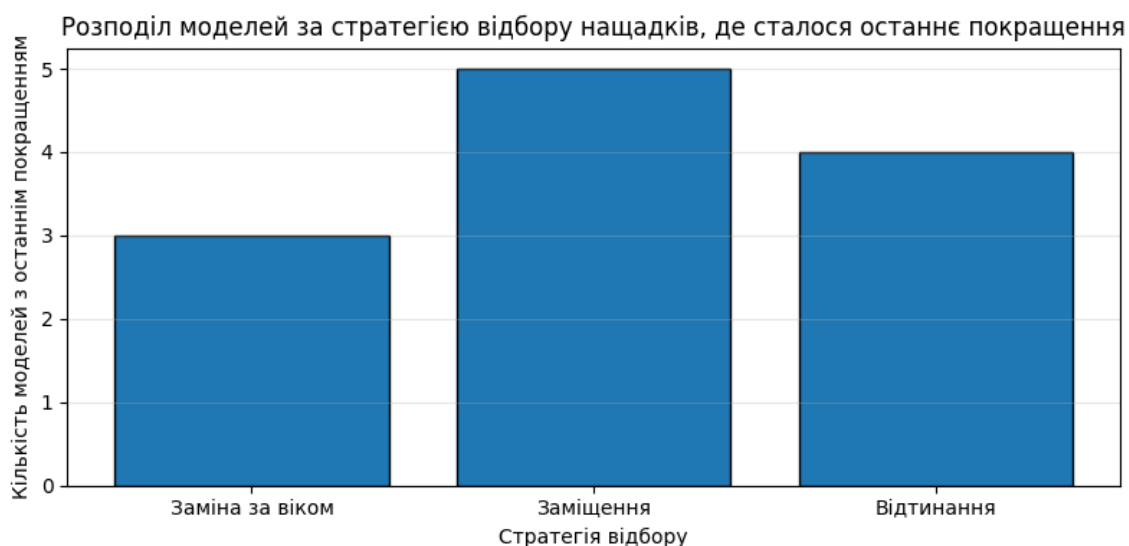


Рис. 5.25. Діаграма залежності покращення на останній ітерації від стратегії відбору нащадків

З результатів випливає, що покращення розв'язків зустрічається частіше для стратегії відбору нащадків методом заміщення. Результати експериментів для дослідження стратегії відбору нащадків було враховано та визначено заміну за віком як рекомендовану процедуру.

Узагальнені результати експериментів наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Узагальнені результати експериментів

Параметр / процедура	Діапазон, що тестувався	Спостереження	Рекомендоване значення
Ймовірність кросоверу	0.6 ... 1.0 (крок 0.1)	Значення 0.8 дає найнижчі значення цільового функціоналу (ЦФ) у всіх групах; значення 0.7 підходить лише для малих моделей	0.8
Ймовірність мутації	0.0 ... 0.5 (крок 0.1)	Значення 0.3 мінімізує ЦФ; 0.1 або 0.4 швидші, але більші за ЦФ	0.3
Макс. кількість поколінь	25, 50, 75, 100	Лінійний ріст часу; 50 поколінь дають прийнятний компроміс (≈ 30 % часу від 100 поколінь при помірній втраті якості)	50
Розмір популяції	25 ... 150 (крок 25)	Найстабільніший баланс часу виконання до значення ЦФ спостерігається при значенні 100; при 150 якість ще краща, але приріст часу й пам'яті вже відчутний	100
Відбір батьків	принцип колеса рулетки, турнірний відбір ранговий відбір, стохастична універсальна вибірка	Метод рулетки забезпечує найбільшу кількість моделей з фінальним поліпшенням та добру якість на малих / середніх розмірах	Метод рулетки
Стратегія виживання (відбору нащадків)	Відтинання, заміна за віком, заміщення популяції	Заміна за віком підтримує різноманітність, показує найкращу якість у середніх моделях і обрана для подальших експериментів	Заміна за віком

5.4. Дослідження залежності часу виконання від розміру задачі при розв'язанні багатостадійних задач розміщення-активації

В цьому підрозділі було досліджено вплив розміру задачі, а саме безпосередньої кількості регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів на час розв'язання.

5.4.1. Експериментальне дослідження залежності часу виконання від розміру задачі

Розмір модельних задач було визначено з практичної точки зору, а саме: на регіональному рівні, кількість регіональних центрів може коливатися в межах [1;5]; субрегіональних центрів – [10;30]. Для дистрибуційних центрів розглянемо більш широкий діапазон значень [10;500].

Для проведення експериментального аналізу обрано обмежений, але різноманітний набір репрезентативних модельних сценаріїв, що визначаються комбінаціями головних параметрів, таких як РЦ, СРЦ та ЦД. Перелік моделей для яких розміри моделей для досліджень у таблиці 5.4.

На лінійному графіку (рис. 5.26) продемонстровано зростання середнього часу виконання алгоритму зі збільшенням розміру задачі. Для задач найменшого масштабу (ЦД – 10) час виконання залишається низьким – між 21.4 с і 30.4 с – незважаючи на зміну кількості РЦ (1, 3 або 5) і субрегіональних центрів (10, 20 або 30). Лінійність цієї ділянки вказує на те, що коли кількість центрів попиту утримується на невеликому рівні, обчислювальне навантаження є незначним додаткові центри не впливають на продуктивність.

Таблиця 5.4 – Розміри модельних задач для експериментів

Експеримент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Кількість РЦ	1	1	1	3	3	3	5	5	5	1	1	5	5	3	3
Кількість СРЦ	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	30	10	30	10	30
Кількість ЦД	10	200	500	200	500	10	500	10	200	500	10	10	500	500	500

При середніх значеннях кількості центрів дистрибуції (ЦД – 200) час роботи збільшується на порядок, зростаючи від 620,1 с до 913,3 с. У цьому проміжку збільшення кількості РЦ з 3 до 5 (при СРЦ – 10) збільшує час роботи приблизно на 16 %, тоді як збільшення кількості СРЦ з 10 до 30 (при РЦ – 3) призводить до ще більшого стрибка на 47%.

Для моделі найбільшої розмірності (ЦД = 500) час виконання коливається від 1718,5 до 2184,0 секунд, що приблизно втричі більше порівняно з випадком кількості ЦД 200. Хоча кількість ЦД залишається домінуючим фактором, РЦ та СРЦ також впливають на час виконання. Наприклад, при СРЦ = 30 перехід від РЦ = 1 до РЦ = 5 збільшує час виконання приблизно на 25 %, тоді як за фіксованого РЦ = 3 зміна СРЦ з 10 до 20 дає

лише 7 % збільшення, що свідчить про зменшення чутливості до СРЦ при великих розмірах.

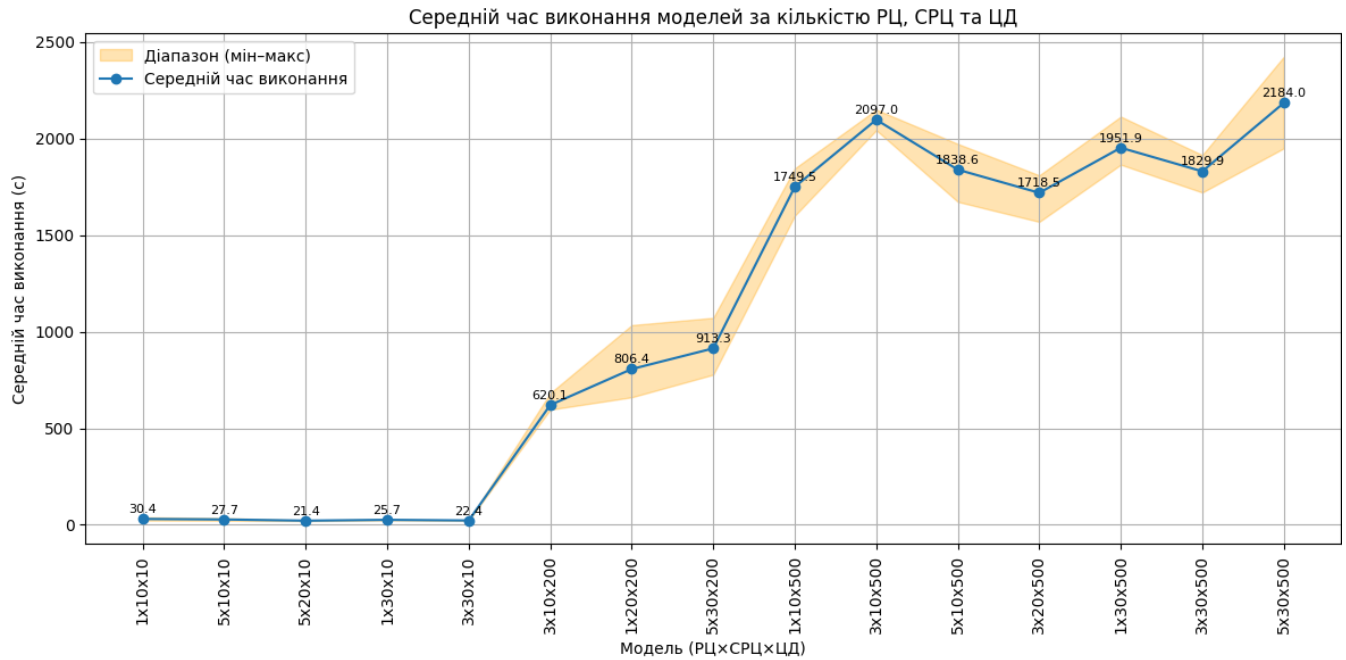


Рис. 5.26. Графік залежності часу виконання від розміру задачі

Загалом, час роботи алгоритму зростає швидше за лінійну залежність, але значно повільніше за експоненційну. При збільшенні числа ЦД у 20 разів (з 10 до 200) час виконання зростає приблизно в 30 разів, а при подальшому збільшенні в 2,5 рази (з 200 до 500) – майже в 2,6 рази. Це вказує на поліноміальну залежність загалом, що наближається до лінійного масштабування при великих обсягах ЦД.

Таким чином, емпірична часова складність алгоритму найкраще описується поліномом $O(N^\alpha)$ з показником $\alpha \approx 1,1$, зі слабкою поліноміальною залежністю в усьому діапазоні розмірів ЦД, яка наближається до лінійного масштабування при великих N .

5.4.2. Оцінка обчислювальної складності програмної реалізації

Було проведено оцінювання обчислювальної складності розробленого алгоритму та відповідної програмної імплементації. В цьому підрозділі наведемо загальні засади з

алгоритму і програмної імплементації, що необхідні для оцінювання обчислювальної складності.

Відповідно до структури розробленої програмної реалізації, існують два модуля, які відповідають за розв'язання задачі: модулі генетичного алгоритму і розміщення. Загальні процедури в кожному з модулів, що можуть та мають бути оцінені. Для модуля генетичного алгоритму, маємо:

- Ініціалізація: створюється початкова популяцію хромосом з пріоритетним кодуванням.
- Генерація популяції: утворює набір хромосом для формування початкової популяції.
- Оцінка: обчислює значення пристосованості кожної хромосоми. Для кожної хромосоми розташовує центри дистрибуції (викликає модуль розміщення).
- Відбір: обирає батьківські хромосоми для відтворення (методом рулетки).
- Кросовер: об'єднує пари батьківських хромосом для отримання нащадків.
- Мутація: внесення випадкових змін до хромосом для підтримки різноманітності.
- Виживання/заміщення: Визначає, які хромосоми перейдуть до наступного покоління на основі пристосованості та стратегії виживання (за віком).
- Загальний цикл розв'язання: повторює відбір, кросовер, мутації, оцінку та виживання протягом декількох поколінь.

Для модуля розміщення, маємо:

- Ітеративна оптимізація (наприклад, субградієнтний спуск) для знаходження оптимального розміщення центрів.
- Обчислення значення у кожній точці сітки: необхідні обчислення у кожній точці дискретизації.
- Обчислення субградієнта: обчислення градієнта для оптимізації, включаючи чисельне інтегрування по сітці.

- Декодування хромосоми: розшифровування хромосоми в план перевезень, призначаючи потоки з центрів до пунктів попиту.
- Чисельне інтегрування: обчислює значення на дискретизованій сітці.

Оцінювання обчислювальної складності алгоритму може бути проведено із застосуванням таких параметрів:

- P – розмір популяції;
- G – максимальна кількість поколінь;
- T – максимальна кількість ітерацій модуля розміщення;
- n – загальна кількість центрів на всіх етапах (корелюється з розміром хромосоми);
- k – кількість ЦД для розміщення;
- hx, hy – розмір сітки для модуля розміщення.

Опишемо порядок роботи алгоритму 4.2 у зручній для аналізу формі:

- Ініціалізація:
 - Згенерувати P хромосом.
 - Оцінити кожну за допомогою модуля розміщення.
- Основний цикл ГА (повторюється G разів):
 - Відбір: обрати батьківські хромосоми з популяції.
 - Схрещування: створити нащадків.
 - Мутація: застосувати випадкові зміни до нащадків.
 - Оцінювання: для кожної нової хромосоми (нащадку) викликати модуль розміщення:
 - Застосувати модуль розміщення
 - Повторити T ітерацій:
 - Обчислити значення функціонала, субградієнта у точках сітки.
 - Обчислити субградієнт.

- Зробити крок оптимізаційного алгоритму.
- Декодувати хромосому і обчислити план транспортування.
- Застосувати стратегію заміщення для підтримки розміру популяції

Був проведений аналіз кожної з процедур на обчислювальну складність. Відповідна оцінки подані у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Розміри модельних задач для експериментів

Процедура	Оцінка складності	Коментар
<u>Модуль генетичного алгоритму</u>		
Ініціалізація	$O(P \cdot E(c))$	$E(c)$ – вартість оцінювання модулем розміщення
Відбір	$O(P)$	
Кросовер	$O(P \cdot n)$	$n \sim$ розмір хромосоми
Мутація		
Оцінювання нащадків	$O(P \cdot E(c))$	$E(c)$ – вартість оцінювання модулем розміщення
Стратегія відбору нащадків	$O(P \cdot \log(P))$	Сортування за фітнесом превалює інші складності
<u>Модуль розміщення</u>		
Обчислення найближчого центра до кожної точки сітки	$O(hx \cdot hy \cdot k)$	
Обчислення субградієнта, значення функціоналу	$O(hx \cdot hy \cdot k)$	
Декодування і обчислення плану перевезень	$O(k^2)$	
Крок оптимізаційного алгоритму	$O(k)$	

Як бачимо, домінуючим для модуля генетичного алгоритму є крок оцінювання. Для модуля розміщення процедурами, які потребують найбільших обчислень, є розрахунок значень по сітці точок. Тоді можна отримати загальну асимптотичну часову складність:

$O(T \cdot G \cdot P \cdot n \cdot hx \cdot hy + G \cdot P \cdot n^2)$, де G – кількість поколінь; P – розмір популяції; T – максимальна кількість ітерацій модуля розміщення; n – розмір проблеми; hx , hy – розмір сітки.

Результати стосовно часу розв’язання, що отримані емпіричним шляхом, були порівняні із результатами, отриманими аналітичною оцінкою складності виконання. Для параметрів генетичного алгоритму використано результати розділу 5.4, а саме: розмір популяції – 100; кількість поколінь (ітерацій) – 50. Для модуля розміщення: максимальна кількість ітерацій – 100; розмір сітки 31x31. Побудовано графік (рис. 5.27), де:

- по осі абсцис моделі у форматі РЦхСРЦхЦД;
- нормалізований час виконання показано синім кольором;
- кількість операцій нормалізовано та зображено помаранчевим кольором.

Як бачимо, поведінка графіків є схожою одна до одної, що підтверджує емпіричну та теоретичну оцінки.

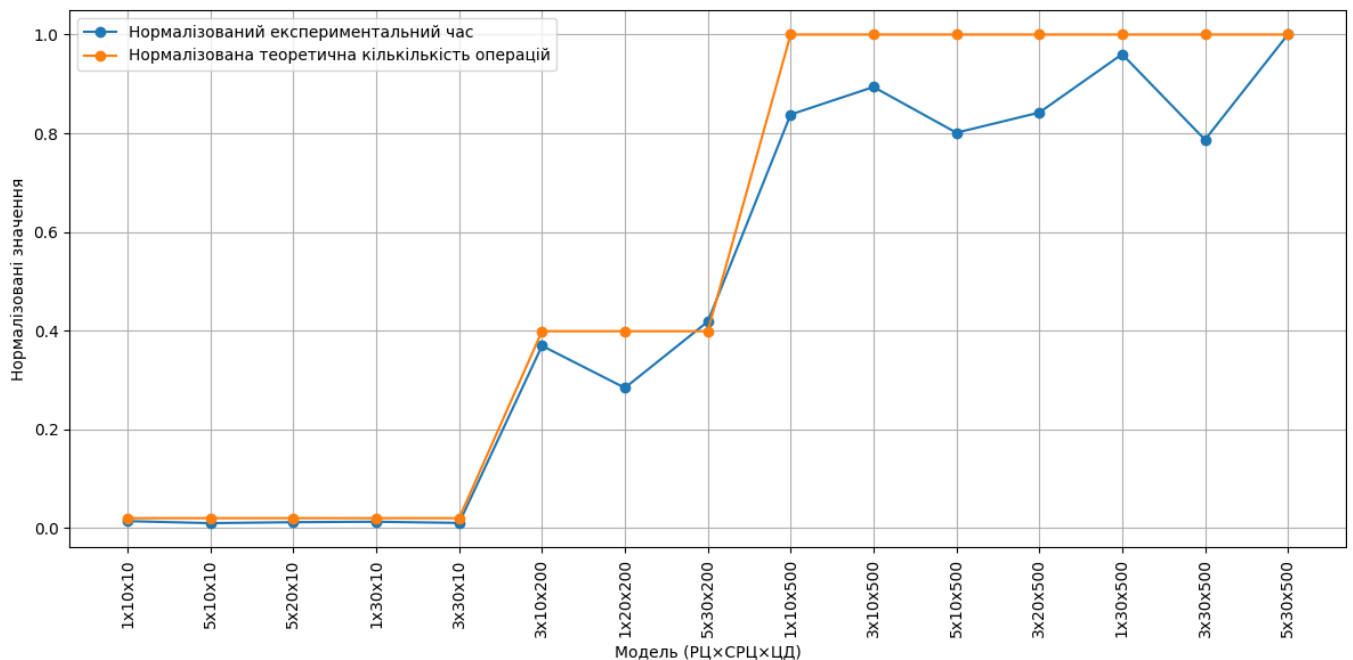


Рис. 5.27. Порівняння нормалізованих значень часу виконання та кількості операцій з оцінки обчислювальної складності

5.5. Розв'язання багатоетапної дискретної задачі активації із реальними даними

Алгоритм 4.1 було застосовано до розв'язання дискретної задачі активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції. Сформульовано постановку задачі конкретизовано з метою приведення її до реальних даних. В логістичному процесі чимале значення мають відстані між тими чи іншими центрами. При розв'язанні задачі використано відстані, отримані із сервісу (*OpenStreetMap*, 2010) (OSM), що надає всеосяжну і загальнодоступну базу географічної інформації, включаючи дорожню мережу. Використовуючи сервіс OSM, отримано точні дані про відстань між медичними закладами, що дозволяє включати реалістичний час і відстань у запропоновані алгоритми оптимізації логістики.

Були визначені чинники, що впливають на витрати на транспортування. Для цього наведено деталізацію транспортних витрат, відносно кожного кілометра відстані.

c_1 – витрати на паливо, які залежать від кількості палива, що споживається на кілометр, вартості палива за літр та загальної відстані;

c_2 – заробітна плата водія, яка розраховується як добуток годинної ставки водія на час, витрачений для перевезень;

c_3 – вартість амортизації автомобіля, яка розраховується як добуток вартості автомобіля, поділеної на очікуваний термін служби автомобіля в кілометрах, та загальну відстань;

c_4 – витрати на технічне обслуговування та ремонт, які розраховуються як добуток середньої вартості технічного обслуговування та ремонту на кілометр на загальну відстань;

c_5 – вартість страхування, що виражена як відомий коефіцієнт.

Тоді загальні витрати на транспортування (c) можна розрахувати у такий спосіб:

$$c = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5.$$

Додатково враховано операційні витрати при активації того чи іншого регіонального чи субрегіонального центру. Вони можуть бути описані таким чином:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7,$$

де

- M_1 – вартість оренди розвантажувальної техніки;
- M_2 – заробітна плата всіх працівників, включаючи витрати на податки та соціальні внески;
- M_3 – вартість комунальних послуг, таких як електроенергія, вода та опалення;
- M_4 – витрати на регулярне технічне обслуговування та ремонт будівлі;
- M_5 – вартість придбання та обслуговування необхідного обладнання, для зберігання ліків та ВМП;
- M_6 – вартість страхування будівлі;
- M_7 – витрати на ІТ-інфраструктуру, включаючи витрати на комп'ютерні системи, програмне забезпечення, мережеву інфраструктуру та ІТ-підтримку;

Для представлення об'єму перевезень ліків та ВМП, використано об'ємну вагу.

Для перевезень з регіональних центрів до субрегіональних центрів використано грузові автомобілі DAF XF (XF105) вантажопід'ємністю до 20 т. Для перевезень зі субрегіональних складів використано автомобілі Geely MC. Результати розрахунків вартості використання транспортних засобів на 1 км показано у табл. 5.6 та 5.7.

Таблиця 5.6 – Розрахункові данні для DAF XF (XF105)

DAF XF (XF105)			
Параметр	Розрахунок	Приклад значень	Результат (грн/км)
Вартість палива (c_1)	Витрати палива на км помножені на вартість палива за літр	Витрати палива – 0,28 літра/км, Вартість палива – 43,27 грн/л	12,12
Зарплата водія (c_2)	(Місячна зарплата / Середня кількість годин на місяць) / Середня кількість км за годину	Місячна зарплата – 30,000 грн Робочих годин – 160 годин Середня швидкість – 60 км/годину	0,03
Амортизація (c_3)	(Вартість автомобіля / Середній термін служби в км)	1,500,000 грн / 1,000,000 км)	1,5

Продовження таблиці 5.6 – Розрахункові данні для DAF XF (XF105)

Вартість обслуговування та ремонту (c_4)	Середня вартість за км	0.20 /км	0,20
Вартість страхування (c_5)	Вартість за км	5000 гривень на рік Очікуваний пробіг – 124,800 км/рік	0,04
Загальна вартість за 1 км (c'):			13,89

Таблиця 5.7 – Розрахункові данні для Geely MC

Geely MC			
Параметр	Розрахунок	Приклад значень	Результат (грн/км)
Вартість палива (c_1)	Витрати палива на км помножені на вартість палива за літр	Витрати палива – 0,07 літра/км, Вартість палива – 44,49 грн/л	3,11
Зарплата водія (c_2)	(Місячна зарплата / Середня кількість годин на місяць) / Середня кількість км за годину	Місячна зарплата – 18,000 грн Робочих годин – 160 годин Середня швидкість – 60 км/годину	0,02
Амортизація (c_3)	(Вартість автомобіля / Середній термін служби в км)	300,000 грн / 200,000 км	1,5
Вартість обслуговування та ремонту (c_4)	Середня вартість за км	0.10 на км	0,1
Вартість страхування (c_5)	Вартість за км	Вартість – 2500 гривень на рік Очікуваний пробіг – 124,800 км/рік	0,02
Загальна вартість за 1 км (c''):			4,75

Отже, було отримано значення витрат для першого та другого етапів. Наступним кроком є визначення вартості активації регіональних та субрегіональних центрів. Відповідно до моделі, вартість активації центру залежить від можливого запасу ліків та ємності. Результати розрахунків вартості активації регіональних та субрегіональних центрів показано у табл. 5.8. Для кожного значення параметру наводяться мінімальні та максимально можливі значення. Ці значення були використані при генерації умови практичної задачі.

Для визначення розмірності задачі, використано статистичні дані системи МОЗ за 2021 рік наведені у (Статистичні дані системи МОЗ, 2021). Згідно з формою N-47 “Звіт

про мережу та діяльність медичних закладів”, розмір задачі визначено як 4x7x65.

Відповідно до математичної моделі, маємо:

- Кількість регіональних центрів: 4;
- кількість субрегіональних центрів: 7;
- кількість центрів дистрибуції: 65;
- максимальна кількість регіональних центрів, що можуть бути активовані: 3;
- максимальна кількість субрегіональних центрів, що можуть бути активовані: 6.

Таблиця 5.8 – Витрати на активацію регіональних та субрегіональних центрів

Витрати	Регіональний центр (грн/місяць)		Субрегіональний центр (грн/місяць)	
	Ємність: 180 – 225 м ³ об’ємної ваги		Ємність: 110 – 150 м ³ об’ємної ваги	
	Мін.	Макс.	Мін.	Макс.
Оренда вантажного обладнання (M_1)	30000	50000	15000	35000
Зарплати та податки та соціальні внески (M_2)	420000	660000	210000	460000
Комунальні послуги (M_3)	60000	80000	20000	38000
Технічне обслуговування та ремонт будівлі (M_4)	15000	25000	7500	17500
Купівля та обслуговування обладнання (M_5)	100000	200000	50000	140000
Страхування будівлі (M_6)	10000	20000	5000	14000
ІТ-інфраструктура (M_7)	8350	8350	4200	4200
Всього (M)	643350	1043350	311700	708700

Початкові дані для роботи алгоритму наведено у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Вхідні данні для задачі

Вхідні данні	
Розмір	4x7x65
Обмеження на кількість регіональних центрів	3
Обмеження на кількість субрегіональних центрів	6
Вектор запасів ліків та ВМП на регіональних центрах	[213, 212, 215, 212]
Вектор ємностей на субрегіональних центрах	[102, 102, 100, 101, 101, 102, 101]
Сумарна потреба центрів дистрибуції	586
Вектор вартостей активації регіональних центрів	[846475, 906049, 937198, 669541]
Вектор вартостей активації субрегіональних центрів	[322878, 517037, 425303, 422976, 528656, 610396, 384027]

Локації регіональних, субрегіональних центрів та центрів дистрибуції наведено на рис. 5.28, де червоними маркерами позначені регіональні центри, синіми – субрегіональні, зелені точки – центри дистрибуції.

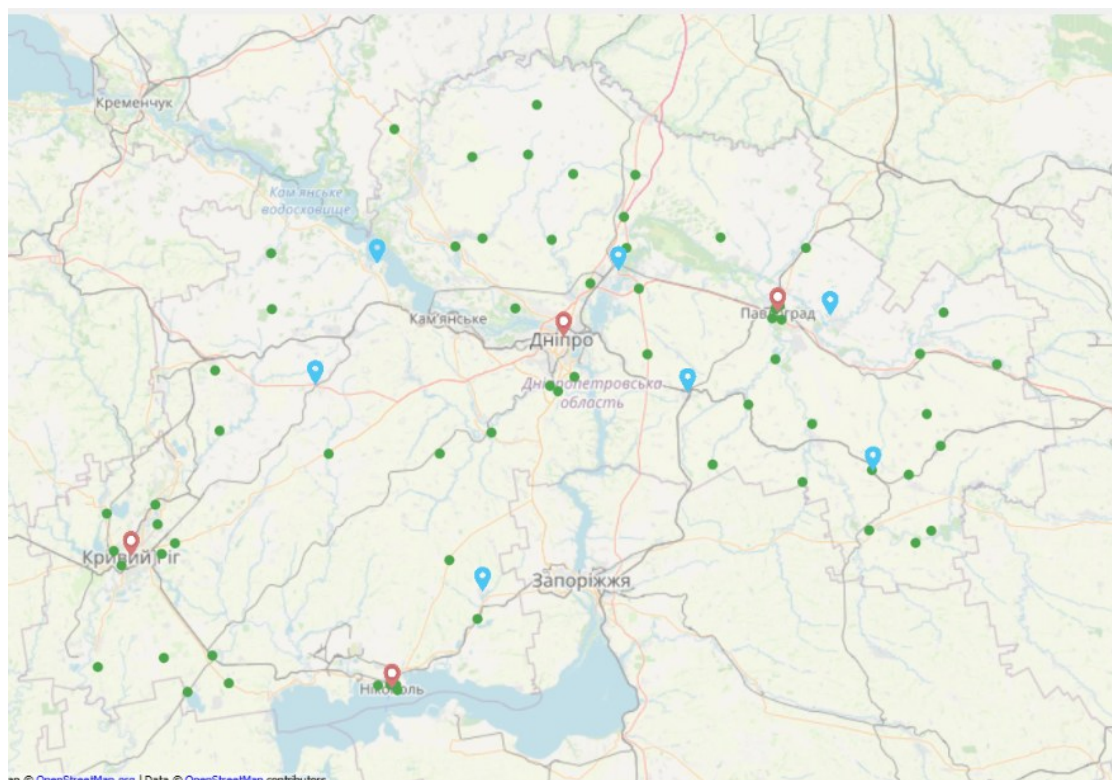


Рис. 5.28. Географічне розташування центрів

Для розв'язання задачі застосований алгоритм 4.1 із такими параметрами:

- Максимальний розмір популяції – 100;
- максимальна кількість поколінь – 50;
- ймовірність застосування процедури мутації – 0.3.

Загальний результат розв'язання наведено на рис. 5.29. Де зеленим кольором нанесено маршрути першого етапу; синім – другого етапу. Центри, які не були активовані позначено сірими маркерами. В результаті отримано такий результат:

- Значення цільової функції ефективного розв'язку задачі – 5060175,46;
- активовано 3 регіональних центра, окрім центра у м. Павлоград;
- активовано 6 субрегіональних центрів, окрім центру у Томаківці;
- час розв'язання задачі (з візуалізацією) – 47 с.

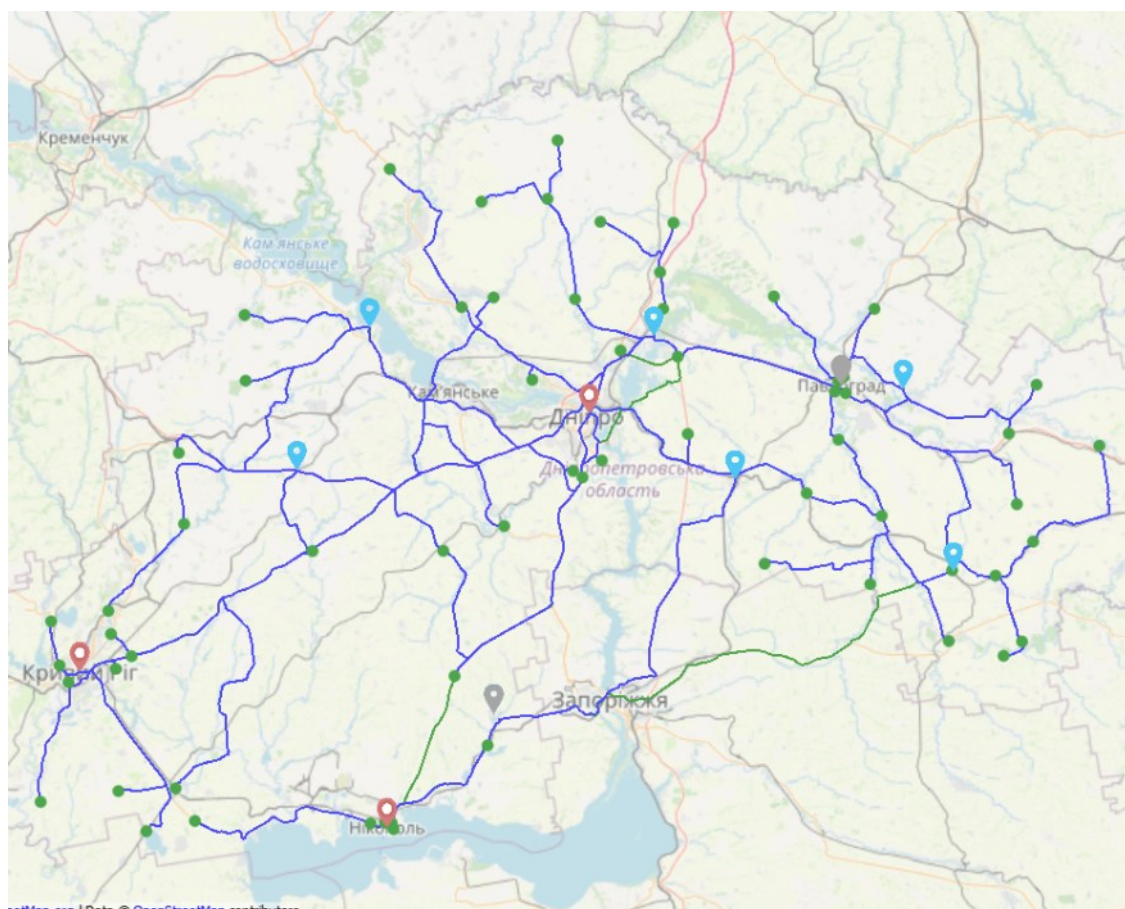


Рис. 5.29. Результат роботи еволюційного алгоритму для задачі медичної логістики у Дніпропетровській області

Мапи для кожного з етапів задачі медичної логістики наведено на рис. 5.30 (тільки перший етап) та рис. 5.31 (тільки другий етап).

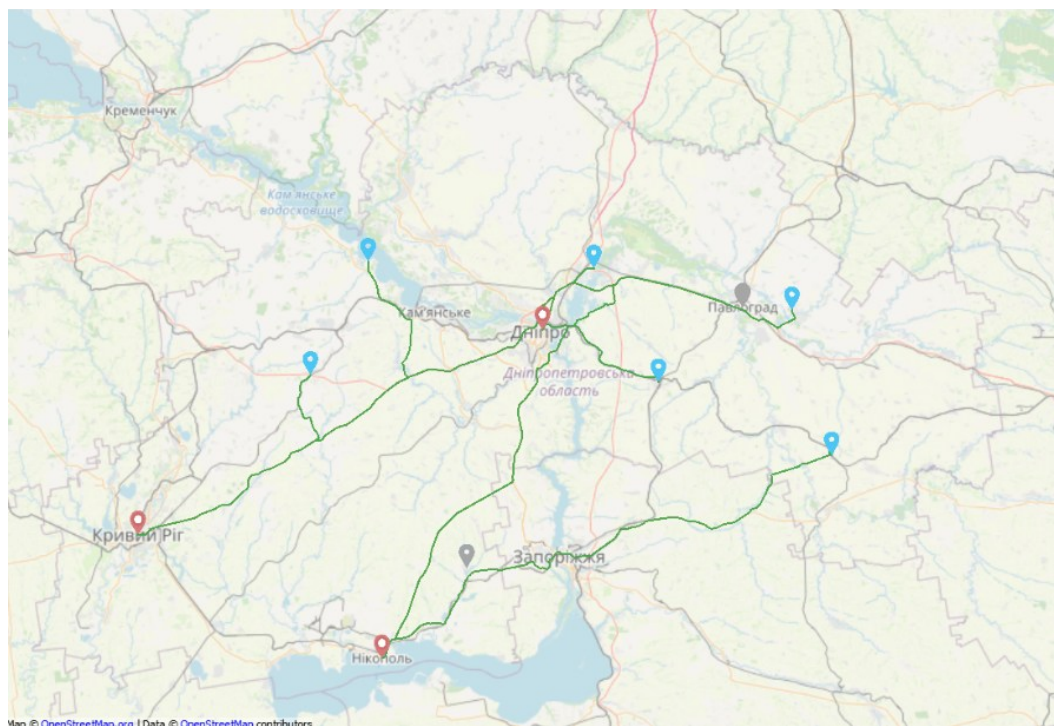


Рис. 5.30. Візуалізація першого етапу розв'язку задачі

Можна побачити, що не активовані центри не мають вхідних та вихідних маршрутів.

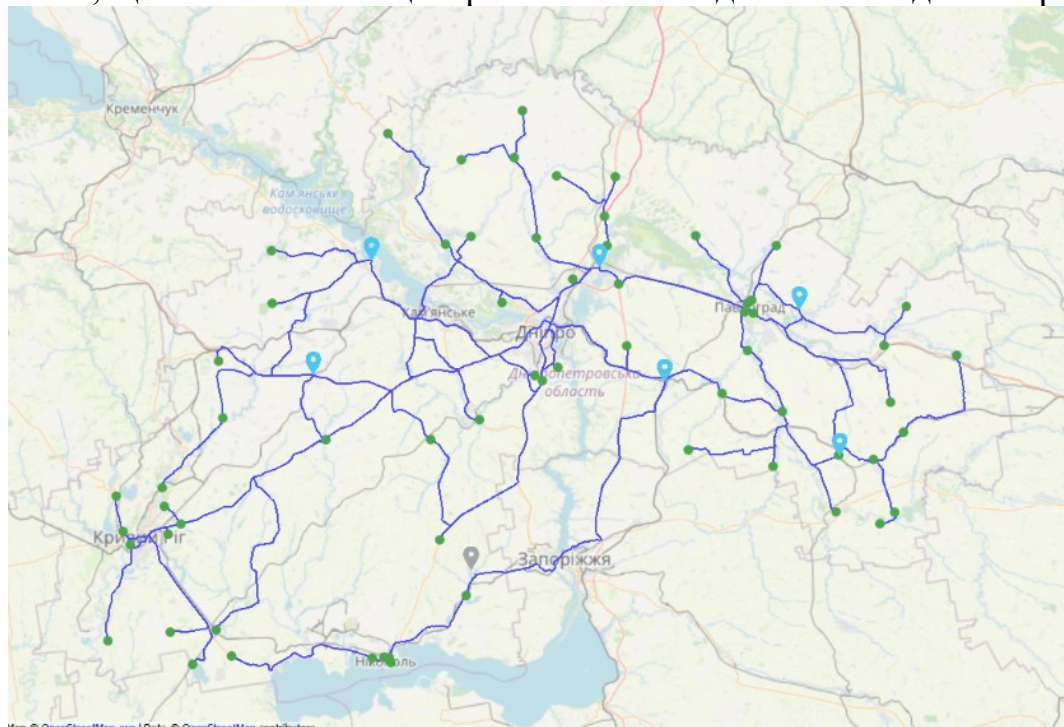


Рис. 5.31. Візуалізація другого етапу розв'язку задачі

5.6. Розв’язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення субрегіональних центрів та активації центрів дистрибуції із реальними даними

Підхід I з розділу 4.2 до розв’язання було застосовано до зазначеної задачі з метою оптимізації медичної логістики Дніпропетровської області. Вхідними даними задачі виступають:

- Кількість субрегіональних центрів: 7.
- Кількість центрів дистрибуції, що треба розмістити: 25.
- Максимальна кількість субрегіональних центрів: 6.
- Вектор, що обмежує ємності субрегіональних центрів: [40, 40, 39, 40, 41, 39, 40].
- Загальний попит у центрах дистрибуції: 230.
- Вектор витрат на активацію субрегіональних центрів: [46, 50, 41, 48, 49, 42, 50].

Координати субрегіональних центрів зображено на рисунку 5.32 синіми маркерами і відповідають таким локаціям: Верхньодніпровськ, Божедарівка, Томаківка, Новомосковськ (Самар), Синельникове, Просяна, Тернівка.

На першому етапі розв’язано задачу розміщення центрів дистрибуції із застосуванням теорії оптимального розбиття множин. Прямокутник, що обмежує географічне розташування, визначається наступними координатами:

- Лівий нижній кут: (47.51611, 33.37109).
- Правий верхній кут: (48.95391, 36.93066).

Евклідову метрику було використано як функцію відстані для розміщення центрів. Описаний прямокутник зображено сірими межами на рисунку у 5.32. В результаті розв’язання отримано розташування центрів дистрибуції у вигляді зелених маркерів на рисунку 5.32. Разом із координатами кожного центру дистрибуції, також отримано зони обслуговування, позначену багатокутниками із сірими межами.

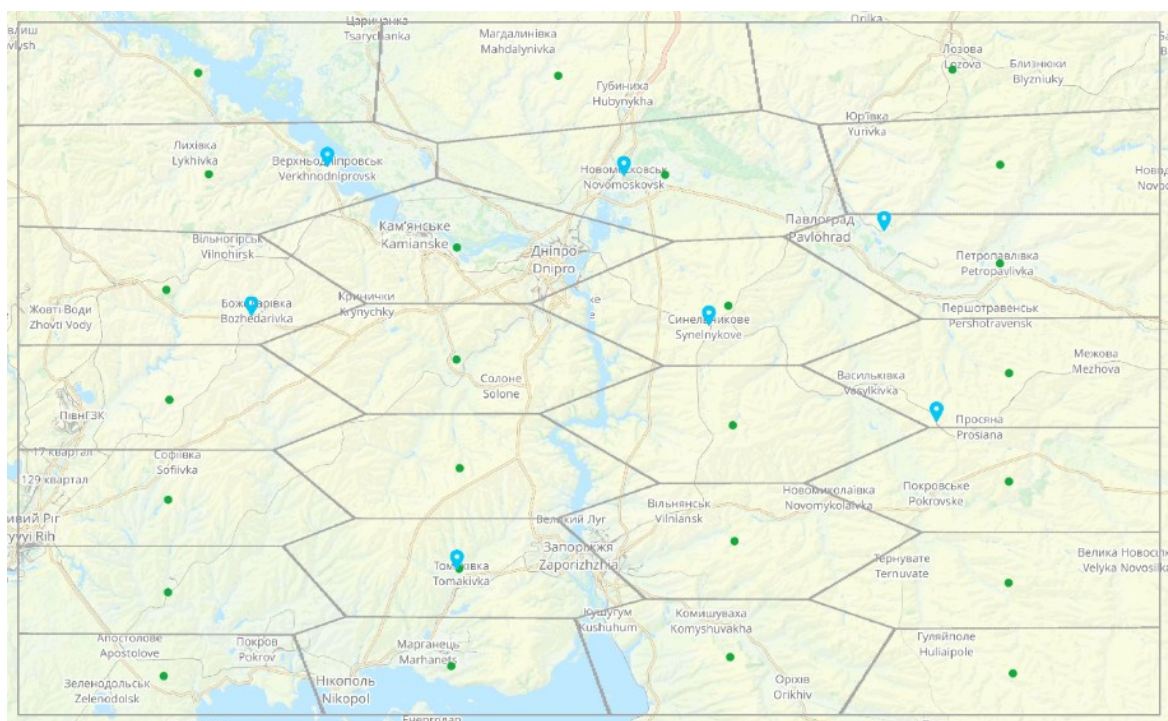


Рис. 5.32. Початкові позиції субрегіональних центрів та розміщених дистрибуційних центрів

На другому етапі розв'язання застосовано еволюційний підхід з підрозділу 4.1 для розв'язання дискретної задачі активації. Для відстані використано реальну географічну відстань між точками. Еволюційний алгоритм виконується з наступними параметрами:

- Розмір популяції: 100.
- Імовірність схрещування: 0,8.
- Імовірність мутації: 0,3.
- Початкове покоління популяції: випадково згенероване.
- Критерії зупинки: завершується після перевищення кількості 100 поколінь.

Загальний результат розв'язання показано на рис. 5.33 з наступними результатами:

- Значення цільового функціоналу для найефективнішого рішення проблеми становить 1298,65.
- Було активовано 6 субрегіональних центрів, за винятком центру в Новомосковську (Самар).
- Загальний час виконання алгоритму (з візуалізацією) зайняв 13 секунд.

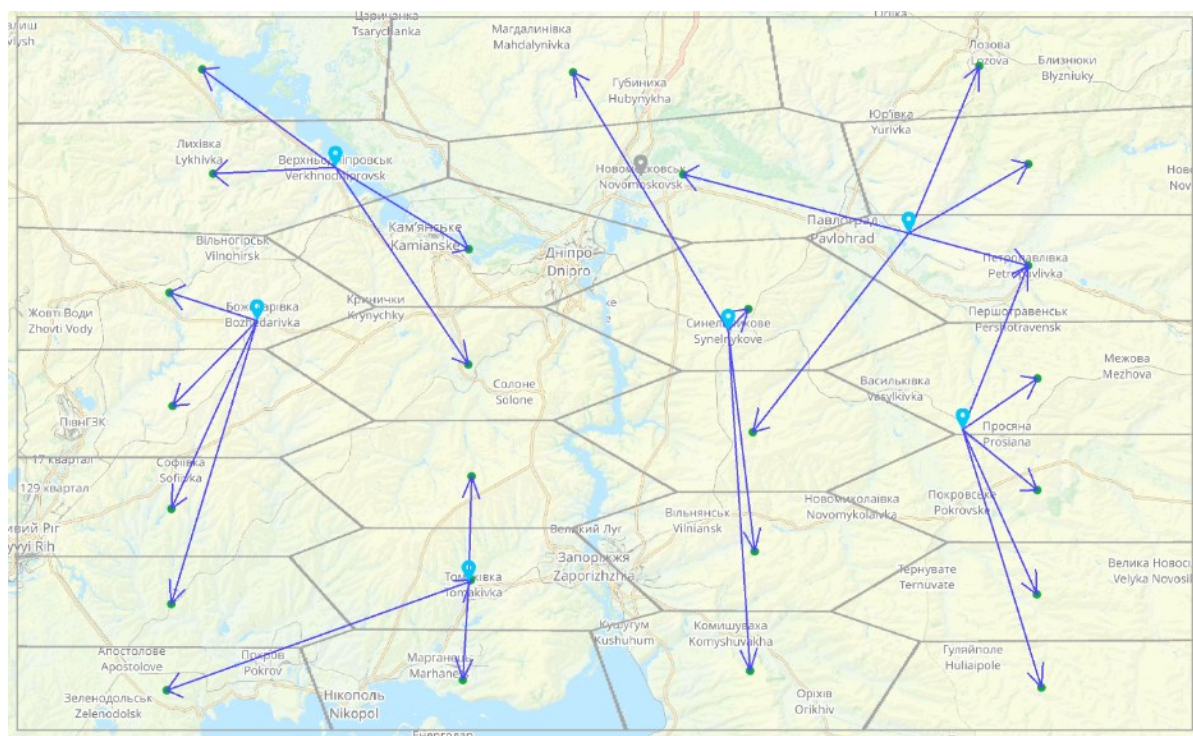


Рис. 5.33. Результат розв'язання задачі

Кожен активований СРЦ візуально представлений синім маркером. На відміну від цього, неактивований СРЦ позначено сірим маркером, що вказує на його недоступність для обробки запитів на обслуговування. Стрілки виходять з кожного центру дистрибуції який буде обслуговувати субрегіональний центр.

Висновки до розділу 5

У розділі удосконалено еволюційні підходи до розв'язання багатоетапних дискретних задач розміщення-активації шляхом надання рекомендацій щодо вибору параметрів і процедур алгоритму: проведено однофакторний експериментальний аналіз ключових параметрів генетичного алгоритму для багатоетапної задачі розміщення-активації. Моделі охоплювали 15 комбінацій розмірів (РЦ $\in [1;5]$, СРЦ $\in [10;30]$, ЦД $\in [10;200]$) й були сформовані ортогональним масивом L9 із трьома сценаріями, що можуть бути потенційно вузьким місцем.

За результатами експериментів, було визначено рекомендовані параметри/процедури алгоритму: ймовірність застосування кросоверу – 0.8; ймовірність застосування мутації

– 0.3; максимальна кількість поколінь – 50; розмір популяції – 100; стратегія відбору батьків – методом рулетки; стратегія виживання (відбору нащадків) – заміна за віком.

Було досліджено залежність часу розв’язання багатоетапної задачі розміщення-активації від збільшення розміру моделі. Для п’ятнадцяти тестових прикладів, сформованих ортогональним масивом L9 і декількома граничними сценаріями (РЦ $\in [1; 5]$, СРЦ $\in [10; 30]$, ЦД $\in [10; 500]$), алгоритм працював із фіксованими налаштуваннями GA (50 поколінь, 100 особин). Поряд із фактичним часом була оцінена очікувана обчислювальна складність.

Експеримент показав, що кількість центрів дистрибуції є головним чинником: збільшення кількості ЦД із 10 до 200 підвищує час майже в 30 разів, а подальший ріст до 500 – ще приблизно в 2,6 рази. Водночас вплив кількості РЦ і СРЦ за фіксованого кількості ЦД залишається близьким до лінійного: варіації кількості РЦ у межах $[1; 5]$ змінюють час не більше ніж на 20 %, а зміна кількості СРЦ вдвічі дає до 50 % приросту. Загалом, емпірична часова складність найкраще описується поліномом $O(N^\alpha)$ з показником $\alpha \approx 1,1$. Теоретична оцінка відтворює емпіричні дані: середнє відхилення між кривими не перевищує 7 %. Для кількості центрів ≤ 200 домінує лінійний за кількістю центрів доданок, тоді як при більшій кількості центрів вплив квадратичного члена помітний, але компенсується великим коефіцієнтом при лінійному доданку.

Було розв’язано багатоетапну дискретну задачу активації регіональних та субрегіональних центрів з фіксованими центрами дистрибуції. Процес розв’язання базується на розглянутій математичній моделі, запропонованому підході до вирішення та розробленій програмній реалізації, при цьому були використані реальні дані для представлення складових математичної моделі. Також розв’язана багатоетапна неперервно-дискретна задача активації субрегіональних центрів та розміщення центрів дистрибуції з визначенням їх зон обслуговування із застосуванням реальний відстаней для дискретного етапу.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема побудови нових моделей і методів прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики з метою підвищення ефективності розподілу ресурсів, стійкості системи охорони здоров'я та забезпечення її здатності швидко адаптуватися до викликів сучасності. За результатами дослідження отримані такі основні результати.

1. У роботі проведено аналітичний огляд літератури з аналізом сучасних методів для розв'язання задач розміщення та активації. Проаналізовані моделі, методи та інформаційні технології, які використовуються для вирішення транспортно-логістичних завдань, а також сучасні підходи до розв'язання оптимізаційних задач. Проведений огляд наукових публікацій щодо багатоетапних задач розміщення об'єктів показав наявність численних моделей, які враховують багаторівневу організацію логістичних процесів. Водночас робіт, у яких розглядаються задачі із великою кількістю користувачів, небагато. Визначено, що, з точки зору підходів до розв'язання, попри ефективність відомих методів, перспективним є дослідження інтеграції неперервних і метаевристичних підходів, які забезпечують можливість розв'язання складних комбінованих задач розміщення/активації з великою кількістю користувачів і визначенням зон обслуговування.

2. Проаналізовано систему медичної логістики в кризових ситуаціях. Було ідентифіковано ключові компоненти системи та розглянуто детальний алгоритм організації системи медичної логістики у кризових ситуаціях, що включає етапи затвердження бюджетних програм, розподіл ресурсів, визначення центрів дистрибуції, планування транспортування та моніторинг ефективності роботи системи. При аналізі наявного процесу відкриття регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів з організацією перевезень ліків та виробів медичного призначення було виявлено низку слабких сторін. Зокрема, масштабування інфраструктури відбувається на основі разових

адміністративних рішень без урахування просторових і логістичних факторів, що призводить до неузгодженості управлінських рішень на різних рівнях. Прийняття рішень про розміщення центрів, планування маршрутів і розподілу ресурсів здійснюється без використання математичних і комп'ютерних методів, що підвищує ризики зростання транспортно-логістичних витрат і знижує оперативність надання медичних послуг. Крім того, відсутні механізми швидкого реагування на руйнування об'єктів медичної інфраструктури та зміни структури попиту на медичні послуги. Наявні підсистеми не забезпечують комплексного вирішення цих завдань, що підкреслює необхідність розробки інтегрованої системи для планування мережі регіональних, субрегіональних і дистрибуційних центрів та побудови плану перевезень на основі формалізованих математичних моделей та методів.

Відповідно до існуючого алгоритму відкриття регіональних, субрегіональних та дистрибуційних центрів і організації перевезень було сформульовано актуальну проблему масштабування, що підлягає вирішенню.

3. Розширено клас багатоетапних задач розміщення-розподілу за рахунок доповнення багатоетапними неперервно-дискретними задачами розміщення-активації.

4. Запропоновано нові математичні моделі багатоетапних процесів розподілу ліків та виробів медичного призначення у вигляді неперервно-дискретних задач розміщення-активації, реалізація яких забезпечує підвищення ефективності функціонування системи медичної логістики шляхом визначення місць раціонального розташування центрів дистрибуції, їх зон обслуговування та плану перевезень.

5. Розроблено комбінований підхід до розв'язання сформульованих задач розміщення-активації, заснований на еволюційних алгоритмах і використанні методів оптимального розбиття множин. Для дискретної задачі активації використано еволюційний підхід для активації регіональних і субрегіональних центрів за фіксованих центрів дистрибуції з такими послідовними процедурами: пріоритетне кодування, алгоритми ініціалізації, декодування та оцінювання, відбір методом рулетки, зважений

кросовер і адаптивна комбінована мутація. Для неперервно-дискретних задач розміщення-активації запропоновано два підходи:

- у першому – поєднується еволюційний алгоритм та методи з теорії оптимального розбиття множин і розв’язання задачі зводиться до двох етапів. При цьому на першому етапі розміщуються центри дистрибуції та визначаються їх зони обслуговування і потреби шляхом розв’язування задачі оптимального розбиття множин, на другому етапі розв’язується дискретна задача активації з відомими координатами центрів дистрибуції і зонами обслуговування;
- у другому підході загальний процес розв’язання здійснюється із застосуванням еволюційного алгоритму, у якому при оцінюванні кожної хромосоми розв’язується задача оптимального розбиття множин із додатковими зв’язками для визначення координат центрів дистрибуції та їхніх зон обслуговування з урахуванням активованих субрегіональних центрів.

6. Набули подальшого розвитку засоби комп’ютерного моделювання шляхом інтеграції сучасних ГІС з програмною реалізацією алгоритму розв’язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення-активації з визначенням зон обслуговування. Розроблені алгоритми програмно реалізовано з використанням Python3 для еволюційного підходу, бібліотеки PyQt6 для інтерфейсу користувача, C++ для розв’язання частин, пов’язаних з модулем розміщення. Інтегровано сервіс OpenStreetMap для візуалізації карти та отримання реальних відстаней.

7. Удосконалено еволюційні підходи до розв’язання багатоетапних дискретних задач розміщення-активації шляхом надання рекомендацій щодо вибору параметрів і процедур алгоритму: проведено однофакторний експериментальний аналіз ключових параметрів (розмір популяції; максимальна кількість поколінь; ймовірності застосування кросоверу та мутації) та процедур (стратегія відбору батьків; стратегія відбору нащадків) генетичного алгоритму для багатоетапної задачі розміщення-активації. Проведена експериментальна оцінка складності алгоритму. Наведена теоретична оцінка часової складності алгоритму з порівнянням результатів з

емпіричними. Розроблене програмне забезпечення було впроваджено для підвищення ефективності функціонування системи медичної логістики.

Результати дисертаційного дослідження можуть бути застосовані: для підвищення ефективності функціонування та масштабування інфраструктури системи медичної логістики під час кризових ситуацій; для розв'язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з визначенням зон обслуговування розміщуваних центрів, що виникають у різних сферах людської діяльності, зокрема у сільському господарстві, видобувній промисловості, гірничо-металургійному комплексі; у вигляді розробленого програмного забезпечення для розв'язання багатоетапних неперервно-дискретних задач розміщення-активації з інтерфейсом користувача для візуалізації отриманих результатів на географічній мапі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гадіяк, Л. В., & Писаренко, В. П. (2021). Логістичний підхід в управлінні закладом охорони здоров'я. *Інвестиції: Практика та досвід*, (7), 113–120. <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2021.7.113>
2. Головна — Med Data. (2025, липень). Головна — Med Data. <https://meddata.com.ua/>
3. Державне підприємство «Медичні закупівлі України». (2018, 25 жовтня). *Медичні закупівлі України*. <https://mpu.gov.ua/>
4. Державне підприємство «Укрвакцина» МОЗ України. (2016). *Укрвакцина*. <https://www.ukrvac.com.ua/>
5. Деякі питання забезпечення функціонування ефективної системи закупівель лікарських засобів, медичних виробів, допоміжних засобів до них та державної компенсації шкоди, Постанова Кабінету Міністрів України № 137 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/137-2022-п#Text>
6. Деякі питання перерозподілу та цільового використання гуманітарної допомоги, Постанова Кабінету Міністрів України № 321 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/321-2025-п#Text>
7. *Електронна система охорони здоров'я в Україні*. (2025, 19 липня). <https://ehealth.gov.ua/>
8. Конституція України (стаття 49), № 254к/96-ВР (2020) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text>
9. Основи законодавства України про охорону здоров'я, Закон України № 2801-XII (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text>
10. Про затвердження Порядку використання коштів, передбачених у державному бюджеті для виконання програм та здійснення централізованих заходів з охорони здоров'я, Постанова Кабінету Міністрів України № 298 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/298-2011-п#Text>
11. Про організацію контролю за цільовим та раціональним використанням матеріальних цінностей, отриманих централізовано за бюджетними програмами та заходами, Наказ № 232 (2013) (Україна).

12. Про порядок відображення в обліку операцій з централізованого постачання матеріальних цінностей, Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 136 (2003).
13. Система електронної взаємодії органів виконавчої влади (СЕВ). (2012, 18 липня). Система електронної взаємодії органів виконавчої влади (СЕВ. <https://sev.ukrpatent.org/>
14. Система e-Stock. (2023). Система e-Stock. <https://moz.gov.ua/uk/e-stock>
15. Станіна, О., Ус, С., & Коряшкіна, Л. (2021). *Моделі та методи розв'язання задач оптимального розміщення двоетапного виробництва з неперервно розподіленим ресурсом*. Свідлер А.Л.
16. Статистичні дані системи МОЗ. (2023). <http://medstat.gov.ua/ukr/statdanMMXIX.html>
17. Ус, С. А., & Станіна, О. Д. (2017). Алгоритм розв'язання однієї задачі оптимального розбиття множин з додатковими зв'язками. *Комп'ютерне моделювання: Аналіз, управління, оптимізація*, 2(2), 83–88. <https://doi.org/10.32434/2521-6406-2017-2-2>
18. Abdullahi, H., Reyes-Rubiano, L., Ouelhadj, D., Faulin, J., & Juan, A. A. (2025). A reliability-extended simheuristic for the sustainable vehicle routing problem with stochastic travel times and demands. *Journal of Heuristics*, 31(2). <https://doi.org/10.1007/s10732-025-09555-4>
19. Abualigah, L., Hanandeh, E. S., Zitar, R. A., Thanh, C.-L., Khatir, S., & Gandomi, A. H. (2023). Revolutionizing sustainable supply chain management: A review of metaheuristics. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106839. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106839>
20. Ai, T. J., & Kachitvichyanukul, V. (2009). Particle swarm optimization and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.06.012>
21. Al-Haidary, M., Ajlouni, M. A., Talib, M. A., Abbas, S., Nasir, Q., & Basaeed, E. (2021). Metaheuristic approaches to facility location problems: A systematic review. *У 2021 4th international conference on signal processing and information security (ICSPIS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icspis53734.2021.9652430>
22. Andaryan, A. Z., Mousighichi, K., & Ghaffarinasab, N. (2023). A heuristic approach to the stochastic capacitated single allocation hub location problem with Bernoulli demands. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.015>

23. Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C., & Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and ‘grey zone’ customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 940–958. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
24. Ansari, S., Başdere, M., Li, X., Ouyang, Y., & Smilowitz, K. (2018). Advancements in continuous approximation models for logistics and transportation systems: 1996–2016. *Transportation Research Part B: Methodological*, 107, 229–252. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.019>
25. Asadi Delivand, A., Shafiee Moghadam, S., Jolai, S., Aghsami, A., & Jolai, F. (2022). A meta heuristic approach for Reliable capacitated facility joint inventory-location problem with round-trip transportation under imperfect information of disruption in a Fuzzy environment. *RAIRO – Operations Research*. <https://doi.org/10.1051/ro/2022110>
26. Basso, R., Kulcsár, B., & Sanchez-Diaz, I. (2021). Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction. *Transportation Research Part B: Methodological*, 145, 24–55. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.12.007>
27. Behnke, M., Kirschstein, T., & Bierwirth, C. (2021). A column generation approach for an emission-oriented vehicle routing problem on a multigraph. *European Journal of Operational Research*, 288(3), 794–809. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.06.035>
28. Bent, R. W., & Van Hentenryck, P. (2004a). Scenario-Based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations Research*, 52(6), 977–987. <https://doi.org/10.1287/opre.1040.0124>
29. Bent, R. W., & Van Hentenryck, P. (2004b). Scenario-Based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations Research*, 52(6), 977–987. <https://doi.org/10.1287/opre.1040.0124>
30. Bieniek, M. (2015). A note on the facility location problem with stochastic demands. *Omega*, 55, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.02.006>
31. Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (2020). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120842>

32. Blum, C. (2024). Ant colony optimization: A bibliometric review. *Physics of Life Reviews*, 51, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2024.09.014>
33. Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
34. Bueno-Ferrer, Á., De Pablo Valenciano, J., & De Burgos Jiménez, J. (2024). Unveiling the potential of metaheuristics in transportation: A path towards efficiency, optimization, and intelligent management. *Infrastructures*, 10(1), 4. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10010004>
35. Buson, E., Roberti, R., & Toth, P. (2014). A reduced-cost iterated local search heuristic for the fixed-charge transportation problem. *Operations Research*, 62(5), 1095–1106. <https://doi.org/10.1287/opre.2014.1288>
36. Calvete, H. I., Galé, C., & Iranzo, J. A. (2018). A matheuristic for the two-stage fixed-charge transportation problem. *Computers & Operations Research*, 95, 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.03.007>
37. Chen, A., & Li, T. (2024). Modeling and solving the multi-objective vehicle routing problem with soft and fuzzy time windows. *Systems*, 12(12), 560. <https://doi.org/10.3390/systems12120560>
38. Chen, Y.-T., & Cao, Z.-C. (2020). An investigation on a closed-loop supply chain of product recycling using a multi-agent and priority based genetic algorithm approach. *Mathematics*, 8(6), 888. <https://doi.org/10.3390/math8060888>
39. Christensen, T. R. L., & Klose, A. (2020). A fast exact method for the capacitated facility location problem with differentiable convex production costs. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.048>
40. Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. <https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568>
41. C. Martins, L., Hirsch, P., & Juan, A. A. (2020). Agile optimization of a two-echelon vehicle routing problem with pickup and delivery. *International Transactions in Operational Research*, 28(1), 201–221. <https://doi.org/10.1111/itor.12796>
42. Cooper, L. (1963). Location-Allocation problems. *Operations Research*, 11(3), 331–343. <https://doi.org/10.1287/opre.11.3.331>

43. Cordeau, J.-F., Laporte, G., & Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *The Journal of the Operational Research Society*, 52(8), 928–936. <http://www.jstor.org/stable/822953>
44. Cosma, O., Pop, P., & Sabo, C. (2019). An efficient solution approach for solving the two-stage supply chain problem with fixed costs associated to the routes. *Procedia Computer Science*, 162, 900–907. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.066>
45. Cosma, O., Pop, P., & Sabo, C. (2022). On the two-stage supply chain network design problem with risk-pooling and lead times. *Cybernetics and Systems*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/01969722.2022.2030008>
46. Cosma, O., Pop, P. C., & Dănciulescu, D. (2020). A parallel algorithm for solving a two-stage fixed-charge transportation problem. *Informatica*, 1–26. <https://doi.org/10.15388/20-infor432>
47. Daganzo, C. F. (1984). The distance traveled to visit N points with a maximum of C stops per vehicle: An analytic model and an application. *Transportation Science*, 18(4), 331–350. <http://www.jstor.org/stable/25768146>
48. Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), 80–91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>
49. Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). The bi-objective Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 232(3), 464–478. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.002>
50. Dewi, S. K., & Utama, D. M. (2020). A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem. *Systems Science & Control Engineering*, 9(1), 61–72. <https://doi.org/10.1080/21642583.2020.1863276>
51. Eigen. (2021, сепень). Eigen. https://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page
52. Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106242. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106242>
53. Fathollahi-Fard, A. M., Amoozad Khalili, H., & Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2025). An efficient metaheuristic algorithm for the organ transplant logistics network considering urban

- traffic and cold ischemia constraints. *Flexibility and Service Manufacturing Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10696-025-09625-6>
54. Felix-Saul, J. C., García-Valdez, M., Merelo Guervós, J. J., & Castillo, O. (2024). Extending genetic algorithms with biological life-cycle dynamics. *Biomimetics*, 9(8), 476. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9080476>
55. Florio, A. M., Hartl, R. F., & Minner, S. (2020). New exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands. *Transportation Science*, 54(4), 1073–1090. <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.0976>
56. Friendly, M., & Denis, D. (2005). The early origins and development of the scatterplot. *Journal of the History of the Behavioral Sciences*, 41(2), 103–130. <https://doi.org/10.1002/jhbs.20078>
57. Gambardella, L. M., Taillard, E., & Agazzi, G. (1999). *MACS-VRPTW: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows*. Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale.
58. Geiger, A. (2024). A sample average approximation-based heuristic for the stochastic production routing problem. *Central European Journal of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10100-024-00913-4>
59. Gen, M., Altiparmak, F., & Lin, L. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *Or Spectrum*, 28(3), 337–354. <https://doi.org/10.1007/s00291-005-0029-9>
60. Gen, M., Lin, L., Yun, Y., & Inoue, H. (2018). Recent advances in hybrid priority-based genetic algorithms for logistics and SCM network design. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 394–412. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.025>
61. Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science*, 40(10), 1276–1290. <https://doi.org/10.1287/mnsc.40.10.1276>
62. Gmira, M., Gendreau, M., Lodi, A., & Potvin, J.-Y. (2021). Tabu search for the time-dependent vehicle routing problem with time windows on a road network. *European Journal of Operational Research*, 288(1), 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.041>
63. Hajibabaie, M., & Lotfi, M. M. (2021). Fuzzy bi-objective inventory-routing problem for blood products in a hospital network during disasters: Two multi-objective meta-heuristic

- approaches. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 39(1), 22. <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2021.115067>
64. Hamami, M. G. M., & Ismail, Z. H. (2022). A systematic review on particle swarm optimization towards target search in the swarm robotics domain. *Archives of Computational Methods in Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09819-3>
65. Han, Y.-q., Li, J.-q., Liu, Z., Liu, C., & Tian, J. (2020). Metaheuristic algorithm for solving the multi-objective vehicle routing problem with time window and drones. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(2), 172988142092003. <https://doi.org/10.1177/1729881420920031>
66. Hashemkhani Zolfani, S., Arabzad, S. M., & Ghorbani, M. (2015). A multi-objective robust optimization model for a facility location-allocation problem in a supply chain under uncertainty. *Engineering Economics*, 26(3). <https://doi.org/10.5755/j01.ee.26.3.4287>
67. He, L., & Xie, Z. (2022). Optimization of urban shelter locations using bi-level multi-objective location-allocation model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 4401. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074401>
68. Heidari, R., Ghazanfari, M., & Rasouli, M. R. (2025). A bi-objective two-stage stochastic programming model for the resilient and consistent vehicle routing problem: A hybrid learning-based metaheuristic algorithm. *Engineering Optimization*, 1–23. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2025.2464856>
69. Holmberg, K., Rönnqvist, M., & Yuan, D. (1999). An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing. *European Journal of Operational Research*, 113(3), 544–559. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(98\)00008-3](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(98)00008-3)
70. Hsiao, Y.-H., Chen, M.-C., & Chin, C.-L. (2017). Distribution planning for perishable foods in cold chains with quality concerns: Formulation and solution procedure. *Trends in Food Science & Technology*, 61, 80–93. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.016>
71. Hussain, A., Riaz, S., Amjad, M. S., & Haq, E. U. (2022). Genetic algorithm with a new round-robin based tournament selection: Statistical properties analysis. *Plos One*, 17(9), Стаття e0274456. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274456>
72. *IDEF0 diagram*. (2025, травень). Innoslate Help Center. <https://help.specinnovations.com/idef0-diagram>

73. Iqbal, M. W., Kang, Y., & Jeon, H. W. (2020). Zero waste strategy for green supply chain management with minimization of energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118827. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118827>
74. ISPro. (1990). ISPro. <https://ispro.ua/>
75. Jannoud, I., Jaradat, Y., Masoud, M. Z., Manasrah, A., & Alia, M. (2021). The role of genetic algorithm selection operators in extending WSN stability period: A comparative study. *Electronics*, 11(1), 28. <https://doi.org/10.3390/electronics11010028>
76. Jozefowicz, N., Semet, F., & Talbi, E.-G. (2008). Multi-objective vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 189(2), 293–309. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.055>
77. Juan, A., Faulin, J., Grasman, S., Riera, D., Marull, J., & Mendez, C. (2011). Using safety stocks and simulation to solve the vehicle routing problem with stochastic demands. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 751–765. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.09.007>
78. Keek, J., Loh, S., Wong, Y., Woo, X., & Lee, W. (2021). Genetic algorithms and particle swarm optimization for interference minimization in mobile network channel assignment problem. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 14(4), 276–288. <https://doi.org/10.22266/ijies2021.0831.25>
79. Keskin, M., Çatay, B., & Laporte, G. (2021). A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research*, 125, 105060. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105060>
80. Khalili Nasr, A., Tavana, M., Alavi, B., & Mina, H. (2020). A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 124994. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124994>
81. Khan, I., Pal, S., & Maiti, M. K. (2019). A hybrid PSO-GA algorithm for traveling salesman problems in different environments. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 27(05), 693–717. <https://doi.org/10.1142/s0218488519500314>

82. Kiseleva, E. M. (2018). The emergence and formation of the theory of optimal set partitioning for sets of the n dimensional euclidean space. theory and application. *Journal of Automation and Information Sciences*, 50(9), 1–24. <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v50.i9.10>
83. Kiseleva, O., Prytomanova, O., & Serhieiev, O. (2020). An algorithm for solving the optimal set partitioning problem with constraints on the centers location. *Y 2020 IEEE 2nd international conference on system analysis & intelligent computing (SAIC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/saic51296.2020.9239209>
84. Kiseleva, O., Prytomanova, O., & Us, S. (2020). Solving a two-stage continuous-discrete problem of optimal partition–allocation with a given position of the centers of subsets. *Cybernetics and Systems Analysis*, 56(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00215-y>
85. Koca, E. (2023). Two-stage stochastic facility location problem with disruptions and restricted shortages. *Computers & Industrial Engineering*, 109484. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109484>
86. Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P., & Kechagias, E. P. (2020). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification. *Operational Research*. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>
87. Kuo, R. J., Edbert, E., Zulvia, F. E., & Lu, S.-H. (2023). Applying NSGA-II to vehicle routing problem with drones considering makespan and carbon emission. *Expert Systems With Applications*, 221, 119777. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119777>
88. Lee, J.-E., Gen, M., & Rhee, K.-G. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 951–964. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.021>
89. Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems With Applications*, 41(4), 1118–1138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.107>
90. Lotfi, M. M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A genetic algorithm using priority-based encoding with new operators for fixed charge transportation problems. *Applied Soft Computing*, 13(5), 2711–2726. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.11.016>

91. Magas, O. S., & Sergeev, O. S. (2018). Investigation of the robustness of solutions of the problem of transport routing. *Problems of Applied Mathematics and Mathematic Modeling*. <https://doi.org/10.15421/321813>
92. Mahjoub, N., Sahebi, H., Mazdeh, M., & Teymouri, A. (2020). Optimal design of the second and third generation biofuel supply network by a multi-objective model. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120355>
93. Mardan, E., Govindan, K., Mina, H., & Gholami-Zanjani, S. M. (2019). An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1499–1514. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.187>
94. Mestre, A. M., Oliveira, M. D., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2015). Location–allocation approaches for hospital network planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 791–806. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.024>
95. Mishra, R., & Bajpai, M. K. (2024). A priority-based self-guided serial-parallel genetic algorithm for low-dose computed tomography. *Applied Soft Computing*, 111520. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111520>
96. Moghdani, R., Salimifard, K., Demir, E., & Benyettou, A. (2021). The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123691>
97. Mohammed, A., Harris, I., Soroka, A., & Nujoom, R. (2019). A hybrid MCDM-fuzzy multi-objective programming approach for a G-resilient supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 297–312. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.052>
98. Mykhalchuk, V. M., Kolomoyets, A. V., Tolstanov, O. K., & Hbur, Z. V. (2020). Концептуальні засади логістики нового часу в сучасній українській медицині. *Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*, (3), 67–73. <https://doi.org/10.11603/1681-2786.2020.3.11625>
99. Nurjanni, K. P., Carvalho, M. S., & Costa, L. (2017). Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, 183, 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.028>

100. *OpenStreetMap*. (2010). OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/>
101. Patel, P. S., & Singh, A. (2023). A diversity preserving genetic algorithm with tailor-made variation operators for the quadratic bottleneck knapsack problem. *Evolutionary Intelligence*. <https://doi.org/10.1007/s12065-023-00875-7>
102. Paul, S. K., Chowdhury, P., & Ahsan, K. (2022). An advanced decision-making model for evaluating manufacturing plant locations using fuzzy inference system. *Expert Systems With Applications*, 191, 116378. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116378>
103. Polo, G., Acosta, C., & Ferreira, F. (2015). Location-Allocation and accessibility models for improving the spatial planning of public health services. *Plos One*, 10(3), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119190>
104. Pourvaziri, H., Taghavi, M., Sarhadi, H., Afshari, H., & Azad, N. (2023). Multi-Objective optimization for electric vehicles charging station planning: Integrating drivers' preferences and fairness considerations.
105. Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 31(12), 1985–2002. [https://doi.org/10.1016/s0305-0548\(03\)00158-8](https://doi.org/10.1016/s0305-0548(03)00158-8)
106. Pytel, K. (2025). Fuzzy guiding of roulette selection in evolutionary algorithms. *Technologies*, 13(2), 78. <https://doi.org/10.3390/technologies13020078>
107. Qazvini, Z. E., Amalnick, M. S., & Mina, H. (2016). A green multi-depot location routing model with split-delivery and time window. *International Journal of Management Concepts and Philosophy*, 9(4), 271. <https://doi.org/10.1504/ijmcp.2016.079837>
108. *Qt 6 – The latest version of Qt*. (2020, 8 грудня). Qt | Tools for Each Stage of Software Development Lifecycle. <https://www.qt.io/product/qt6>
109. Rabbani, M., Heidari, R., Farrokhi-Asl, H., & Rahimi, N. (2018). Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types. *Journal of Cleaner Production*, 170, 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.029>

110. Rahimi, M., Ghezavati, V., & Asadi, F. (2019). A stochastic risk-averse sustainable supply chain network design problem with quantity discount considering multiple sources of uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 430–449. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.037>
111. Rahmanifar, G., Mohammadi, M., Golabian, M., Sherafat, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2024). An integrated location and routing formulation for cold chain logistics network with heterogeneous customer demand. *Journal of Industrial Information Integration*, 100573. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100573>
112. Raj, A. A. D., & Rajendran, C. (2012). A genetic algorithm for solving the fixed-charge transportation model: Two-stage problem. *Computers & Operations Research*, 39(9), 2016–2032. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.020>
113. Rastegar, M., Tavana, M., Meraj, A., & Mina, H. (2021). An inventory-location optimization model for equitable influenza vaccine distribution in developing countries during the COVID-19 pandemic. *Vaccine*, 39(3), 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.12.022>
114. Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). A unified heuristic for a large class of Vehicle Routing Problems with Backhauls. *European Journal of Operational Research*, 171(3), 750–775. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.004>
115. Safaeian, M., Fathollahi-Fard, A. M., Tian, G., Li, Z., & Ke, H. (2019). A multi-objective supplier selection and order allocation through incremental discount in a fuzzy environment. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 37(1), 1435–1455. <https://doi.org/10.3233/jifs-182843>
116. Sahebjamnia, N., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). Sustainable tire closed-loop supply chain network design: Hybrid metaheuristic algorithms for large-scale networks. *Journal of Cleaner Production*, 196, 273–296. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.245>
117. Saif-Eddine, A. S., El-Beheiry, M. M., & El-Kharbotly, A. K. (2019). An improved genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(1), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.09.002>
118. Salman, M. (2018). Using tabu search algorithm for solving two-stage transportation problem based on decoding procedure. *Sci.Int.*, 30(4), 643–651.

119. Saragih, N. I., Bahagia, S. N., Suprayogi & Syabri, I. (2019). A heuristic method for location-inventory-routing problem in a three-echelon supply chain system. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 875–886. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.026>
120. Savadkoochi, E., Mousazadeh, M., & Torabi, S. A. (2018). A possibilistic location-inventory model for multi-period perishable pharmaceutical supply chain network design. *Chemical Engineering Research and Design*, 138, 490–505. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.008>
121. Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48(4), 500–520. <http://www.jstor.org/stable/43666939>
122. Schrimpf, G., Schneider, J., Stamm-Wilbrandt, H., & Dueck, G. (2000). Record breaking optimization results using the ruin and recreate principle. *Journal of Computational Physics*, 159(2), 139–171. <https://doi.org/10.1006/jcph.1999.6413>
123. Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2), 254–265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
124. Sulaman, M., Golabi, M., Essaid, M., Lepagnot, J., Brévilhiers, M., & Idoumghar, L. (2024). Surrogate-assisted metaheuristics for the facility location problem with distributed demands on network edges. *Computers & Industrial Engineering*, 188, 109931. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109931>
125. Sun, J., & Wang, R. (2023). Multi-objective optimization of a sustainable two echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery in construction projects. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.033>
126. Tadaros, M., & Migdalas, A. (2022). Bi- and multi-objective location routing problems: Classification and literature review. *Operational Research*. <https://doi.org/10.1007/s12351-022-00734-w>
127. Tavana, M., Abtahi, A.-R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R. (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 64, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.12.004>

128. Us, S., & Stanyna, O. (2017). Location-allocation problems. *Komputerne Modeluvanna: Analiz, Upravlinna, Optimizacia*, 73–79.
129. Us, S. A., Koriashkina, L. S., & Stanina, O. D. (2019). An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (1). <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24>
130. Vahdani, B., Veysmoradi, D., Noori, F., & Mansour, F. (2018). Two-stage multi-objective location-routing-inventory model for humanitarian logistics network design under uncertainty. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.10.015>
131. Veenstra, M., Roodbergen, K. J., Coelho, L. C., & Zhu, S. X. (2018). A simultaneous facility location and vehicle routing problem arising in health care logistics in the Netherlands. *European Journal of Operational Research*, 268(2), 703–715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.043>
132. Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., Lahrichi, N., & Rei, W. (2012). A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. *Operations Research*, 60(3), 611–624. <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1048>
133. Vidal, T., Laporte, G., & Matl, P. (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 401–416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.010>
134. Villiers, K., Voss-Fels, K. P., Dinglasan, E., Jacobs, B., Hickey, L., & Hayes, B. J. (2024). Evolutionary computing to assemble standing genetic diversity and achieve long-term genetic gain. *The Plant Genome*. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20467>
135. Wang, Y., Li, Q., Guan, X., Xu, M., Liu, Y., & Wang, H. (2020). Two-echelon collaborative multi-depot multi-period vehicle routing problem. *Expert Systems With Applications*, 114201. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114201>
136. Wu, W., Zhou, W., Lin, Y., Xie, Y., & Jin, W. (2021). A hybrid metaheuristic algorithm for location inventory routing problem with time windows and fuel consumption. *Expert Systems With Applications*, 166, 114034. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114034>

137. Yadav, V., Bhurjee, A., & Karmakar, S. (2017). A facility location model for municipal solid waste management system under uncertain environment. *Science of the Total Environment*, 603--604, 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.207>
138. Yaspal, B., Jauhar, S. K., Kamble, S., Belhadi, A., & Tiwari, S. (2023). A data-driven digital transformation approach for reverse logistics optimization in a medical waste management system. *Journal of Cleaner Production*, 139703. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139703>
139. Yavari, M., Enjavi, H., & Geraeli, M. (2020). Demand management to cope with routes disruptions in location-inventory-routing problem for perishable products. *Research in Transportation Business & Management*, 37, 100552. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100552>
140. You, F., & Grossmann, I. E. (2008). Mixed-Integer nonlinear programming models and algorithms for large-scale supply chain design with stochastic inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(20), 7802–7817. <https://doi.org/10.1021/ie800257x>
141. You, M., Xiao, Y., & Zhang, S. (2019). Optimal mathematical programming for the warehouse location problem with Euclidean distance linearization. *Computers & Industrial Engineering*, 136, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.020>
142. Yu, X., & Shen, S. (2024). On the value of risk-averse multistage stochastic programming in capacity planning. *INFORMS Journal on Computing*. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2023.0396>
143. Yuchi, Q., Wang, N., He, Z., & Chen, H. (2018). Hybrid heuristic for the location-inventory-routing problem in closed-loop supply chain. *International Transactions in Operational Research*, 28(3), 1265–1295. <https://doi.org/10.1111/itor.12621>
144. Zandkarimkhani, S., Mina, H., Biuki, M., & Govindan, K. (2020). A chance constrained fuzzy goal programming approach for perishable pharmaceutical supply chain network design. *Annals of Operations Research*, 295(1), 425–452. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03677-7>
145. Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182–214. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>

146. Zhao, Z., Lee, C. K. M., Tsang, Y. P., & Xu, X. (2025). A heuristic-attention method for location-routing problems with shared pick-up stations in green last-mile delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 172, 105031. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105031>
147. Zheng, M., Li, W., Liu, Y., & Liu, X. (2020). A Lagrangian heuristic algorithm for sustainable supply chain network considering CO2 emission. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122409>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Публікації у фахових виданнях України:

1. Сергєєв, О., & Ус, С. (2023). Аналіз сучасних підходів до розв'язання дискретних та неперервних багатоетапних задач розміщення. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 50–58. <https://doi.org/10.32782/it/2023-2-7> **(Фаховий (категорія Б))**
(особистий внесок автора – проведення аналітичного огляду літератури, порівняння методів)
2. Us, S., & Serhieiev, O. (2023). An algorithm for solving a two-stage continuous-discrete location problem for medical logistics optimization. *System Technologies*, 5(148), 71–85. **(Фаховий (категорія Б))**
(особистий внесок автора – алгоритм і програмна реалізація)
3. Serhieiev, O., & Us, S. (2024). Exploring two solution methods for the two-stage location-activation problem. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series of Mathematics and Informatics*, 45(2), 249–258. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45\(2\).249-258](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2024.45(2).249-258) **(Фаховий (категорія Б))**
(особистий внесок автора – модель, алгоритм і програмна реалізація; експерименти для порівняння ефективності підходів)
4. Serhieiev, O. (2024). Applying the systems approach to the analysis of regional-level medical logistics. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (4), 187–196. <https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-22> **(Фаховий (категорія Б))**
5. Дзюба, С., & Сергєєв, О. (2025). Експериментальне дослідження алгоритму розв'язання багатоетапної задачі розміщення-активації. *Information Technology:*

Computer Science, Software Engineering and Cybersecurity, 3, 152–160.

<https://doi.org/10.32782/IT/2025-3-19> (**Фаховий (категорія Б)**).

(особистий внесок автора – планування та проведення експериментів; аналіз результатів)

*Публікації у виданнях, які проіндексовані у міжнародних наукометричних
базах*

6. Serhieiev, O. S., & Us, S. A. (2023). Modified genetic algorithm approach for solving the two-stage location problem. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 159–170. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-3-16> (**Web of Science**)

(особистий внесок автора – математична модель, алгоритм, програмна реалізація; застосування реальних даних)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Авторське свідоцтво:

1. Сергєєв, О. С. (2024). *Комп'ютерна програма «Multi-stage location-activation problem solver» («MLAPS»)* (Авторське свідоцтво України № 130414). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій.

Матеріали конференцій та тези доповідей:

1. Сергєєв О., Ус С. Дослідження застосування генетичного алгоритму в багатостадійних задачах розміщення-активації : Матеріали ІХ міжнар. науково-техн. конф., м. Дніпро, 5–7 листоп. 2025 р. 2025. С. 93–94.
2. Serhieiev O., Us S. Impact investigation of the crossover application coefficient on the location-activation problem solution. *Intelligent Solutions-S: Proceedings of the International Symposium : VIII-th International Conference & XII-th International School-Seminar proceedings*, Kyiv-Uzhorod, 2 May 2025. Kyiv, 2025. P. 102–103. URL: https://intsol.knu.ua/wp-content/uploads/2025/05/Збірник-IntSol-2025_2.pdf.

3. Сергєєв О. Застосування генетичного алгоритма до розв'язання задачі розміщення-активації. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM'2025 : матеріали міжнар. науково-техн. конф. ITMM'2025, м. Дніпро, 23–24 квіт. 2025 р. 2025. С. 79–84.
4. Сергєєв О. Про класифікацію багатоетапних задач розміщення-активації. Інформаційні технології: теорія і практика : Тези VIII (II) Міжнар. Інтернет-конф. здобувачів вищ. освіти і молодих уч., м. Запоріжжя, 2–4 квіт. 2025 р. Запоріжжя, 2025. С. 89–92.
5. Сергєєв О. Аспекти програмної реалізації двоетапної задачі активації-розміщення для покращення медичної логістики. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування* : Матеріали XXVI Міжнар. науково-практ. семінару, м. Кропивницький, 13–15 черв. 2024 р. 2024. С. 157–163. URL: https://zp.edu.ua/uploads/dept_s&r/2024/conf/6.3/CCTA-2024-proc.pdf.
6. Serhieiev O., Us S. Evaluating evolutionary approaches for the two-stage location-activation problem. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій* : Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції, Запоріжжя, 10–12 December 2024. Запоріжжя, 2024. P. 464–468.
7. Serhieiev O., Us S. About methodology for enhancing medical logistics system. *Digital economy and IT: trends and perspectives 2024* : international conference proceedings, Poltava, 28–29 November 2024. Poltava, 2024. P. 165–168.
8. Serhieiev O. Developing a hybrid continuous-discrete approach for optimizing medical logistics through two-stage location problem solving. *Information technologies: theory and practice* : I (VII) international scientific and practical conference of students and young scientists, Dnipro, 20–22 March 2024. Dnipro, 2024. P. 25–28. URL: <https://sau.nmu.org.ua/ua/science/conference/ITTP/international/ittp2024.php>.
9. Сергєєв О. Порівняльний аналіз сервісів розрахунку реальних відстаней у двоетапних задачах розміщення. *Молодь: наука та інновації* : Зб. матеріалів XI

- Міжнар. науково-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчен., м. Дніпро, 24 листоп. 2023 р. Дніпро, 2023. С. 29–30. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166087>.
- 10.Сергеев О., Ус С. Оптимізація медичної логістики як практичне застосування багатоетапної задачі розміщення. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем* : Матеріали VIII міжнар. науково-техн. конф., м. Дніпро, 1–3 листоп. 2023 р. 2023. С. 71–72. URL: <https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/zbirnyk-tez-kmoss-2023.pdf>.
 - 11.Сергеев О., Ус С. Про розв'язання задачі медичної логістики як двоетапної задачі розміщення з обмеженнями на максимальну кількість об'єктів. *Комбінаторні конфігурації та їхні застосування* : матеріали XXV Міжнар. науково-практ. семінару, м. Запоріжжя, 14 черв. 2023 р. С. 173–178.
 - 12.Сергеев О., Ус С. Про застосування процедури змішаної мутації при розв'язанні двоетапної транспортної задачі за допомогою генетичного алгоритму. *Інформаційні технології: теорія і практика* : Тези доп. VI-ї Всеукр. науково-практ. Інтернет-конф. здобувачів вищ. освіти і молодих уч., м. Харків, 23 берез. 2023 р. С. 68–72. URL: [https://sau.nmu.org.ua/ua/science/conference/ITTP/TEZY_ITTP2023\(Kharkyv\).pdf](https://sau.nmu.org.ua/ua/science/conference/ITTP/TEZY_ITTP2023(Kharkyv).pdf).
 - 13.Serhieiev O., Us S. Advancing sustainability in medical supply chains through two-stage continuous-discrete location problem. *Characteristics of green technological transformation in accordance with EGD vision*: proceedings of the International Workshop, Uzhhorod, 6–7 May 2024. Uzhhorod, 2024. P. 22–23. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/68857>

ДОДАТОК Б. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ



КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ МЕДИЧНИЙ
ЦЕНТР СОЦІАЛЬНО ЗНАЧУЩИХ ХВОРОБ»
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСНОЇ РАДИ»
(КП «ДОМЦСЗХ» ДОР»)

вул. Старочумацька, 9а, м. Дніпро, 49074, тел. (050) 587 94 34,
e-mail: dneproblids@gmail.com, код ЄДРПОУ 26509095

16.08.2024 № 1286/24

Щодо впровадження результатів
дисертаційного дослідження

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії**

Сергєєва Олексія Сергійовича

Комісія у складі: виконуючого обов'язки генерального директора Івана Васильовича Кулешова, медичного директора зі стаціонарної допомоги Євгена Вікторовича Липка, завідуючого відділення фізіотерапевтичної діагностики Віктора Васильовича Єлісєєва, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 124 Системний аналіз аспіранта НТУ «Дніпровська політехніка» Сергєєва Олексія Сергійовича, присвяченої дослідженню системи медичної логістики із застосуванням багатоетапних задач розміщення-активації, були використані при ухваленні рішень з розвитку інфраструктури медичної логістики.

Застосування результатів дисертаційної роботи, зокрема впровадження розробленої методики та програмного забезпечення, дозволяє: покращити процес ухвалення рішень про розміщення логістичної інфраструктури, визначити оптимальні місця розташування проміжних центрів зберігання ліків та виробів медичного призначення, а також організувати процес перевезень до пунктів обслуговування кінцевих споживачів.

Акт впровадження результатів дисертаційних досліджень видано для представлення у спеціалізовану вчену раду.

Комісія:

Виконуючий обов'язки
генерального директора

Медичний директор

Завідувач відділення



Іван КУЛЕШОВ

Євген ЛИПКО

Віктор ЄЛІСЄЄВ

ДОДАТОК В. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР

49005, м. Дніпро, а/с 484

Тел.: +38 (067) 257-50-44
e-mail: office.psc@nas.gov.ua; <http://www.nas.gov.ua/pnc>

код ОКПО 01209713

вих. № 25 / 43 від 23 . 10. 2025 р.на № _____ від _____
Щодо впровадження результатів
дисертаційного дослідження

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Сергєєва Олексія Сергійовича

Результати досліджень, які представлені в дисертаційній роботі Сергєєва Олексія Сергійовича «Моделі і методи прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики» можуть бути використані для покращення процесу прийняття рішень при побудові логістичної інфраструктури шляхом визначення оптимальних локацій проміжних центрів зберігання ліків та виробів медичного призначення, а також організації транспортних потоків до пунктів забезпечення кінцевих споживачів.

Розроблені моделі, методи та програмне забезпечення надають можливість проводити обчислювальні експерименти з модельними та реальними даними і дозволяють адаптувати їх до практичних сценаріїв розподілу медичних ресурсів з урахуванням умов регіональних мереж. Запропоновані підходи можуть бути використані у діяльності закладів охорони здоров'я, місцевих та обласних адміністрацій для оптимізації функціонування системи медичної логістики, скорочення часу доставки ліків та виробів медичного призначення, а також підвищення стійкості системи у кризових умовах.

Серед науково-прикладних результатів, які отримані особисто здобувачем, корисними для використання у практичній діяльності Придніпровського наукового центру НАН України і МОН України, щодо досліджень в напрямку удосконалення систем прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах кризової логістики відзначити наступні:

- новітні засоби комп'ютерного моделювання шляхом інтеграцією сучасних ГІС і програмною реалізацією алгоритму розв'язання багатоетапної неперервно-дискретної задачі розміщення-активації з визначенням зон обслуговування;

- розширення існуючої класифікації багатоетапних задач розміщення-розподілу за рахунок доповнення багатоетапними неперервно-дискретними задачами розміщення-активації.

Акт впровадження результатів дисертаційних досліджень видано для представлення у спеціалізовану вчену раду у зв'язку з захистом дисертації **Сергєєва Олексія Сергійовича** за темою «Моделі і методи прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики» на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Т.в.о. директора Придніпровського наукового
центру НАН України і МОН України
д-р техн. наук



Сергій ДЗЮБА

ДОДАТОК Г. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖЕНО»



Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного технічного
університету «Дніпровська політехніка»

Артем ПАВЛИЧЕНКО

2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового
ступеня доктора філософії в навчальний процес Національного технічного
університету «Дніпровська політехніка»

Результати дисертаційної роботи Сергєєва Олексія Сергійовича «Моделі і методи прийняття рішень для аналізу і планування матеріальних потоків у системах медичної логістики» використовуються у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» в навчальному процесі підготовки здобувачів за спеціальністю 124 «Системний аналіз» за освітньою програмою першого (бакалаврського) рівня вищої освіти «Системний аналіз» при викладанні таких дисциплін:

- «Моделювання економічних, екологічних та соціальних процесів». Теми: «Моделі і моделювання», «Задачі розміщення, практичні приклади та застосування», «Застосування еволюційних підходів до розв'язання задач розміщення-активації».
- «Методи оптимізації та дослідження операцій». Тема: «Евристичні алгоритми оптимізації».

При підготовці здобувачів спеціальності 124 «Системний аналіз» за освітньо-науковою програмою третього (доктор філософії) рівня вищої освіти «Системний аналіз» при викладанні дисципліни:

- «Оптимізаційні багатетапні задачі розміщення-розподілу». Теми: «Дискретні задачі розміщення-розподілу» та «Неперервно-дискретні задачі розміщення-розподілу».

На основі дисертаційних досліджень підготовлено лекційні матеріали та розроблено завдання до індивідуальних завдань і практичних робіт.

Декан факультету інформаційних
технологій, к.т.н., доцент

Ірина УДОВИК

Завідувач кафедрою системного аналізу та
управління, к.т.н., доцент

Тімур ЖЕЛДАК

ДОДАТОК Д. АВТОРСЬКЕ СВДОЦТВО

УКРАЇНА



СВДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 130414

Комп'ютерна програма «Multi-stage location-activation problem solver»
(«MLAPS»)

(ацц, назва твору)

Автор (співавтори) **Сергєєв Олексій Сергїєвич**

(прїзвище, ім'я, по батьковї (за наявностї), псевдонїм (за наявностї))

Авторські майновї права належать повністю **Сергєєв Олексій Сергїєвич, пр-т Науки,
119/33, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., 49107**

(прїзвище, ім'я, по батьковї (за наявностї) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 8 жовтня 2024 р.

Виконувач обов'язків
Директора Державної
організації «Український
національний офіс
інтелектуальної власності та
інновацій»

 **Ігор ПАРЕНЧУК**

