

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЕКОНОМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ**

Кваліфікаційна робота магістра
на тему

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ
ПРИ КОРОТКОСТРОКОВІЙ ОРЕНДІ ОБЛАДНАННЯ**

Виконав: студент 2 м курсу, групи 8.0519-ек
спеціальності 051 Економіка, освітньо-професійної
програми «Економічна кібернетика»
Землянський Олександр Олександрович
Керівник д. ф-м. н., проф. Козін І. В.
Рецензент к.е.н., доц. Макаренко О.І.

Запоріжжя – 2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет _____

Кафедра _____

Рівень вищої освіти _____

Освітня програма _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

Макшишко Н. К.

« ____ » _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Землянському Олександрю Олександровичу

1. Тема роботи «Математична модель логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання»

керівник роботи д. ф-м. н., проф. Козін Ігор Вікторович.

затверджені наказом ЗНУ від « ____ » _____ 20__ року № _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить три розділи, 69 с., 17 рис., 12 табл., 2 додатка, 30 джерел.

Об'єкт дослідження – логістичні ланцюги при короткостроковій оренді обладнання.

Предмет дослідження – математична модель логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання.

Мета роботи – побудова математичної моделі логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання з використанням методів дискретної оптимізації.

Методи дослідження – математичне моделювання, методи транспортної логістики, методи дискретної оптимізації, декомпозиції, абстрагування, аналіз, експеримент.

У роботі розглядаються побудова математичної моделі логістичного ланцюгу короткострокової оренди обладнання і прикладні оптимізаційні задачі пошуку розкладу та маршрутизації, що не мають ефективних алгоритмів знаходження точного розв'язку. Розглядаються поняття, історія, складові логістичного ланцюгу, доводиться актуальність досліджень у цьому напрямку. Вказується на перспективу ринку короткострокової оренди обладнання. Аналізуються поточні дослідження та способи розв'язання оптимізаційних задач, що використовуються на даний момент. Пропонується еволюційний алгоритм на фрагментарних структурах як спосіб їх розв'язання. Описується принцип роботи та обґрунтовується його ефективність. Проводиться обчислювальний експеримент за допомогою програмного забезпечення, що використовує створену математичну модель логістичних ланцюгів для побудови субоптимального ланцюгу.

ОРЕНДА ОБЛАДНАННЯ, МАРШРУТИЗАЦІЯ, РОЗКЛАД,
ФРАГМЕНТАРНА СТРУКТУРА, ЕВОЛЮЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ

SUMMARY

Master's qualification work consists of three sections, 69 p., 17 figures, 12 tables, 2 annexes, 30 sources.

The object of research are the logistics chains for short-term equipment rental.

The subject of research is mathematical model of logistics chains for short-term equipment rental.

The purpose of research is construction of a mathematical model of logistics chains for short-term equipment rental using discrete optimization methods.

Theoretical and methodological basis of the research of the mathematical modelling of logistics chains for short-term rent are mathematical modeling, methods of transport logistics, methods of discrete optimization, decomposition, abstraction, analysis, experiment.

The paper considers the construction of a mathematical model of the logistics chain of short-term equipment rent and applied optimization problems of scheduling and routing, which do not have effective algorithms for finding the exact solution. The concepts, history, components of the logistics chain are considered, the relevance of research in this direction is proved. Indicates the prospects of the market for short-term equipment rental. The current research and methods of solving optimization problems used at the moment are analyzed. An evolutionary algorithm on fragmentary structures is proposed as a way to solve them. The principle evolutionary algorithm on fragmentary structures is described and its efficiency is substantiated. A computational experiment is performed using software that uses the created mathematical model of logistics chains to build a suboptimal chain.

EQUIPMENT RENT, ROUTING, SCHEDULE, FRAGMENTARY
STRUCTURE, EVOLUTIONARY ALGORITHM

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ.....	9
1.1 Логістичний ланцюг: поняття, транспортна логістика, історія.....	9
1.2 Класифікація задач транспортної та складської логістики.....	16
1.3 Аналіз існуючих наукових досліджень в галузі логістики поставок.....	21
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ	24
2.1 Еволюційний алгоритм: поняття, властивості, складові, алгоритмічна складність задач.....	24
2.2. Узагальнений еволюційний алгоритм на фрагментарних структурах	32
2.3 Постановка задачі короткострокової оренди обладнання	44
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ КОРОТКОСТРОКОВОЇ ОРЕНДИ ОБЛАДНАННЯ.....	49
3.1 Математична модель логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання	49
3.2 Обчислювальний експеримент з пошуку субоптимального логістичного ланцюгу	54
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	67
ДОДАТОК А.....	70
ДОДАТОК Б	81

ВСТУП

Актуальність: Ринок короткострокової оренди в економічно розвинених країнах є стрімко зростаючим. Україна не є винятком у цій тенденції. Короткострокова оренда дедалі стає популярним засобом економічних відносин у сфері малого, середнього бізнесу та серед фізичних осіб. Одним із об'єктів короткострокової оренди є обладнання – машини, верстати, агрегати та інше, що використовуються в господарській діяльності. Його придбання у власність часто не є доцільним, оскільки вартість може бути дуже високою, а потреба використання виникає занадто рідко. У таких випадках доцільно скористатися послугою оренди обладнання. Короткострокова оренда фактично анулює для споживача велику кількість витрат, а саме на: придбання, виплату відсотків по кредиту за умови використання позикових коштів; зберігання; обслуговування; амортизацію; та інше. Що є значно вигіднішим.

У цьому дослідженні під короткостроковою орендою обладнання розуміємо послугу з передачі майна в строкове оплатне володіння та користування на основі спеціального договору, на визначений термін (від одного до кількох днів), за визначену орендну плату, із доставкою до споживачів на термін оренди та негайне вилучення майна від орендаторів після спливання цього терміну

У підприємств, що надають послуги з короткострокової оренди обладнання, виникає задача пошуку допустимого розкладу та оптимального маршруту перевезень між складом та споживачами. Оптимальним вважаємо такий маршрут, при якому загальні витрати на транспортування та використання обладнання є найменшими. Задачі пошуку допустимого розкладу та маршрутизації є NP-складними, для яких наразі невідомі шляхи знаходження оптимального розв'язку.

Для розв'язку задачі запропоновано поетапну процедуру моделювання та оптимізації логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді

обладнання, застосування якої в практичній діяльності підприємств, дозволить зменшити витрати завдяки оптимізації розкладу та маршруту перевезень; зменшенню кількості транспортних засобів, які потрібні для перевезень та кількості обладнання, яке потрібно мати для задоволення потреб споживачів.

Процедурі моделювання присвячено статтю у фаховому рецензованому науковому журналі «Нова економіка». За результатами участі у міжнародному конкурсі, присвяченому параметризованим алгоритмам та обчислювальним експериментам «РАСЕ-challenge 2020» процедуру оптимізації було випробувано та доведено її ефективність.

Для досягнення мети дослідження у роботі поставлено такі завдання:

- дослідити задачі, що виникають у орендодавців при наданні послуг короткострокової оренди обладнання;
- проаналізувати алгоритми пошуку оптимальних рішень задачі оптимізації логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання;
- побудувати математичну модель логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання;
- провести обчислювальний експеримент на основі математичної моделі логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання та визначити ефективність застосованих алгоритмів.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ

1.1 Логістичний ланцюг: поняття, транспортна логістика, історія

Підприємства, що надають послуги короткострокової оренди обладнання на основі наявних замовлень, формують ланцюг поставок, або логістичний ланцюг.

Логістичний ланцюг – це термін, що відноситься до транспортної логістики. Іноді його використовують як синонім терміну «ланцюг поставок». Це лінійно-впорядкована множина юридичних і фізичних осіб, які виконують логістичні функції і операції по проведенню матеріального та інформаційного потоків від постачальника до споживача (рис. 1.1) [1].

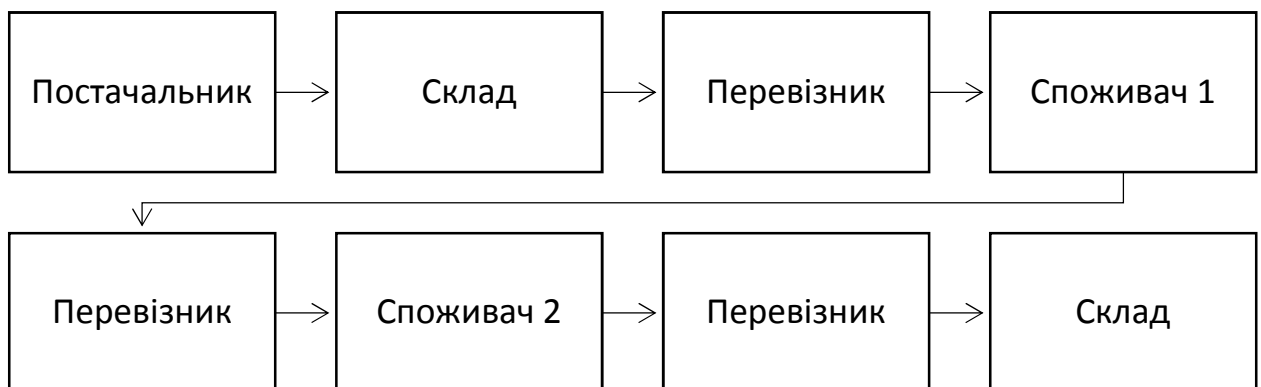


Рисунок 1.1 - Приклад логістичного ланцюга.

Джерело: побудовано автором.

Транспортна логістика визначається як планування, організація, управління, контроль та виконання вантажно-транспортних операцій у ланцюгу поставок [2]. Її можна розглядати як субактивність логістики та управління ланцюгами поставок [3].

Не існує єдиного визначення як для терміну логістика, так і для терміну «управління ланцюгами поставок». На заході з цього приводу існують різні

точки зору, які представлені кількома «школами». Ми визначимо ці терміни наступним чином.

Логістика - теорія планування, управління і контролю процесів руху матеріальних, трудових, енергетичних та інформаційних потоків з використанням елементів кібернетики. В економіці логістика застосовується для управління і розрахунку матеріально-технічного забезпечення, руху товарно-матеріальних запасів, інформаційних потоків [4].

Основними видами діяльності для логістики є:

- управління закупівлею;
- управління складом (при його наявності);
- управління транспортом;
- управління зовнішньо економічною діяльністю (при її наявності);
- управління розподілом запасів.

Це напрямки діяльності компанії, що полягає в управлінні матеріальними та супутніми їм потоками (грошовими, інформаційними, тощо).

Керування ланцюгами поставок – це організація, планування, контроль і регулювання товарного потоку, починаючи з отримання замовлення і закупівлі сировини і матеріалів для забезпечення виробництва товарів, і далі, через виробництво і розподіл, доведення його з оптимальними витратами ресурсів до кінцевого споживача відповідно до вимог ринку [5].

На відміну від логістики, керування ланцюгами поставок полягає у виконанні тих же завдань, але в рамках ланцюга. Тобто оптимізація відбувається не в рамках компанії, а при роботі з контрагентами.

Мета управління ланцюгами поставок - домогтися максимальної конкурентоспроможності та рентабельності компанії, а також всієї мережевої структури ланцюгів поставок, включаючи кінцевого споживача. В зв'язку з цим, інтеграція і реінжиніринг процесів ланцюгів поставок повинні бути спрямовані на підвищення загальної ефективності і продуктивності учасників.

Управління ланцюгами поставок є досить новий напрямок в менеджменті. Зародження його можна віднести до другої половини 80-х років минулого століття. Масове поширення, як стратегічний напрям, на заході отримало набагато пізніше.

Управління ланцюгами поставок - це інтеграція восьми ключових бізнес-процесів:

- управління взаємовідносинами з споживачами;
- обслуговування споживачів;
- управління попитом;
- управління виконанням замовлень;
- підтримка виробничих процесів;
- управління постачанням;
- управління розробкою продукції і її доведенням до комерційного використання;
- управління поворотними матеріальними потоками [6].

Ефективність логістичних ланцюгів тісно пов'язана з економікою і комерційним успіхом підприємств. Ефективний логістичний ланцюг повинен задовольняти потреби підприємств при мінімальних затратах. Те, наскільки великими будуть затрати на зберігання та перевезення продукції часто є вирішальним фактором, що визначає, чи слід продовжувати комерційному підприємству свою діяльність, або вигідніше буде її взагалі припинити. Прикладом і підтвердженням цих слів може бути японський автовиробник Mazda Motor Corporation, що за допомогою спеціального інвестиційного контракту з Міністерством промисловості і торгівлі Російської Федерації створив спільне підприємство ТОВ "МАЗДА СОЛЛЕРС Мануфакчуриг Рус" з виробництва авто на Дальньому Сході з російським ПАТ "СОЛЛЕРС" [7]. Одним з вирішальних факторів, що послугував на користь відкриття цього підприємства, було субсидування перевезень продукції залізничним транспортом з малонаселеного Дальнього Сходу, на який припадає незначна частка реалізації авто, у більш розвинені Західні регіони країни.

Представники ТОВ "МАЗДА СОЛЛЕРС Мануфакчуринг Рус" заявляли, що без субсидування перевезень випуск автомобілів на даному підприємстві становиться не вигідним і його діяльність втрачає сенс для акціонерів. По причині неефективного функціонування логістичних ланцюгів, іноді виникають проблеми через нестачу вагонів для перевезень готової продукції, що завдає збитки внаслідок зменшення продажів – клієнти вчасно не отримують товар, і через збільшення витрат на зберігання готової продукції [8].

Іншим прикладом важливості ефективних логістичних ланцюгів для комерційного успіху та економічної безпеки країни можна навести українські підприємства важкої, хімічної промисловості, сільського господарства та торгівлю енергоносіями. Доля продукції на зовнішніх ринках залежить від вартості її транспортування, доступності того чи іншого виду транспорту.

Із проблемою з транспортуванням енергоносіїв, а саме вугілля, через неефективні логістичні ланцюги зіштовхнувся у середині двохтисячних років Китай. Частина родовищ вугілля, яке є джерелом близько 80% електроенергії Китаю та грає важливу роль в промисловому виробництві, наприклад, цементу, знаходяться на півночі країни у Внутрішній Монголії. У той час як споживачі вугілля – електростанції і промислові підприємства – на сході та півдні країни. Через неефективні логістичні ланцюги, перевезення вугілля спаралізувало рух на деяких транспортних магістралях країни, що призвело до значних фінансових втрат [9].

Проблема із логістикою та перевезенням енергоносіїв є актуальною і для України. Країна не має великих родовищ нафти, природного газу та імпортує їх з інших країн світу. Задля диверсифікації та поліпшення економічної та енергетичної безпеки країни, виникає потреба доставки енергоносіїв різними видами транспорту, з різних країн. Зокрема, окрім трубопровідного та залізничного транспорту, наразі актуальною темою є використання морського транспорту для прийому зрідженого природного газу [10].

Проблеми із логістикою є особливо актуальними і для сільського господарства країни. Тут виникають проблеми як із транспортуванням, так і зі зберіганням готової продукції, та її збутом. Регулярно поступають новини про нестачу елеваторів та спеціально обладнаних складів для зберігання готової продукції, що викликає її псування та значні матеріальні втрати [11]. Розповсюдженою проблемою транспортування продукції в Україні є те, що велику частку перевозять за допомогою автомобільного транспорту, який є найдорожчим. Оптимізація логістичних ланцюгів, використання інших видів транспорту (залізничного, річкового) та розвиток складів могли б значно покращити фінансовий стан українських виробників та допомогти збереженню інфраструктури країни. Математичні методи дослідження операцій у логістиці дозволяють знайти субоптимальний розв'язок для задач оптимізації великих масштабів.

У даній роботі розглянемо побудову логістичного ланцюга при короткостроковій оренді обладнання. У підприємців середнього та малого бізнесу іноді або періодично виникає потреба використання різноманітного обладнання без придбання його у власність.

Можна навести наступні сфери, у яких вищевказана тема є актуальною, наприклад:

- кейтеринг. Виїзне ресторанне обслуговування;
- обладнання для проведення масових заходів (наприклад, проведення концертів, презентацій і т.п., прикладами такого обладнання можуть слугувати акустичні системи, проектори, світлове обладнання, меблі та устаткування для сцени);
- робота по обслуговуванню домогосподарств (заміна газових балонів, асенізація, аварійна служба);
- оренда спеціального обладнання у сільському господарстві;
- обладнання зі сфери будівництва (бетонозмішувачі, ручні перфоратору і т.п.);
- обладнання для будівництва та ремонту доріг;

- військова техніка.

Першими відомими логістами стали військові командири часів Античності. Гордон Франк у своїй книзі «Логістика. Мистецтво керування ланцюгами поставок» стверджує, що першим логістом став Олександр Македонський, який широко використовував планування під час свого масштабного переходу довжиною чотири тисячі миль від Єгипту через Персію до Індії. У його армії були загони інтендантів та інженерів. Його досвідчені інтенданти використовували кращу на той час систему логістики, яка виявилася вельми до речі і в ХХ столітті. Олександр Македонський використовував планування та складування припасів, відправляючи своїх інтендантів поперед війська для закупівлі необхідних товарів. Також Олександр планував похід на нові землі під час збору врожаю. В кінці кінців, Олександр і його інженери зрозуміли, що для збереження боєздатності війська склади повинні розташовуватися один від одного на відстані не більше, ніж вісім днів ходу. Іншими відомими логістами тих часів, що використовували нові підходи у своїй діяльності стали Ганнібал та Юлій Цезар, які використовували планування і логістичний підхід при веденні своїх масштабних походів. Римляни мали хороші можливості для планування підготовки завдяки розвиненій мережі доріг і знаннях місцевості, в яку збиралися прибути. З падінням Риму розвиток логістики загальмувався аж до настання Нового часу, коли відомими логістами знову стали воєначальники, що забезпечували потреби армій. Поштовх розвитку логістики дав винахід нових способів переміщення вантажів, таких, як залізна дорога, двигуни внутрішнього згоряння та сучасні методи комунікації, а також, значне збільшення обсягів виробництва, споживання, різноманітності продукції, та чисельності населення [12]. Наступні значущі зміни відбулися з початком використання наукового підходу. Однак, до винаходу комп'ютерів, безліч проблем логістики залишалися нерозв'язними в принципі. У 60-70 роки ХХ століття, з розвитком обчислювальної техніки, логістика почала бурхливо розвиватися. Завдяки застосуванню комп'ютерів в обчисленнях, з'явилася

ілюзія, що всі завдання логістики будуть розв'язані в найближчі роки. Однак, незабаром вчені зіткнулися з проблемою експоненціального зростання часу, необхідного для розв'язання задач при невеликому збільшенні обсягу вхідних даних. Такі задачі назвали NP-складними. Наразі невідомі точні алгоритми пошуку оптимального розв'язку жодної з них. Зазвичай, для їх розв'язання використовують еволюційні метаевристичні алгоритми, жадні алгоритми, випадковий пошук, або спираються на власний досвід. Різновидів таких алгоритмів відомо багато сотень, проте постійно розробляються нові. Однією з причин цього є теорема «Про відсутність безкоштовних сніданків» («No free lunch theorem»), яка стосується задач пошуку та оптимізації. Вона була доведена Девідом Вольпертом (David Hilton Wolpert) та Уільямом Макреді (William G. Macready). Її сутність полягає у тому, що не існує універсального алгоритму, який був би доказово більш ефективним для всіх завдань, які він взагалі може вирішити, ніж інші універсальні алгоритми. Для будь-якого алгоритму пошуку та оптимізації будь-яка підвищена продуктивність над одним класом проблем точно оплачується продуктивністю над іншим класом [13].

У логістиці продовжували відкриватися нові задачі, для яких не було відомо алгоритмів розв'язку. Такі задачі намагалися зводити до існуючих NP-складних, щоб підтвердити, що наразі немає сенсу шукати точний алгоритм їх розв'язання і розумним вибором буде скористатися наявними алгоритмами пошуку субоптимальних розв'язків, за допомогою яких розв'язуються інші NP-складні задачі.

Субоптимальне рішення – це рішення, оптимальне по одній з часток цільової функції. Ми не можемо перевірити, або довести його якість.

Девід Келлі, засновник компанії з розробки дизайну товарів IDEO, стверджує, що неважливо, наскільки оригінальний твій товар, твій винахід. Перш ніж вийти з ним на ринок, потрібно вирішити найелементарніші питання, в тому числі, питання про доставку свого «дива» споживачам.

Клас прикладних задач, для яких невідомо точного алгоритму оптимізації, - це більшість задач прикладної економічної діяльності. Наприклад, задачі управління економічними об'єктами, задачі оптимізації, складання розкладів, управління запасами в реальних умовах з високим ступенем невизначеності. Математичні методи лише допомагають у розв'язанні подібних задач. Однак в більшості випадків остаточний вибір залишається за людиною. Такі задачі відрізняє порівняно низька динамічність, оскільки вирішуються вони, в основному таким «Повільним» обчислювальним пристроєм, як людина, і висока невизначеність вихідних даних. Крім того, при розв'язанні цих задач виставляються чисельні умови, які можуть виявитися суперечливими, системи пріоритетів, які неточно відображають справжні пріоритети, і багато інших подібних перешкод. Дуже часто опис умов задачі займає стільки часу і вимагає таких зусиль, що більш ефективним виявляється застосування не оптимізаційних методів, а просто експертний вибір рішення, або випадковий пошук. Такі задачі називають важко формалізованими. Спектр їх настільки великий і підходи до них настільки індивідуальні, що говорити про побудову якоїсь спільної моделі поки просто неможливо. Вважається, що в майбутньому розв'язання цих задач лежить в області застосування штучного інтелекту [14].

1.2 Класифікація задач транспортної та складської логістики

Значна частина логістичних операцій на шляху руху матеріального потоку від первинного джерела сировини до кінцевого споживача здійснюється за допомогою різноманітних транспортних засобів. Витрати на виконання цих операцій складають до 50 відсотків загальних витрат на логістику.

До задач транспортної логістики в першу чергу відносять задачі, розв'язання яких підсилює узгодженість дій безпосередніх учасників транспортного процесу. До таких задач відносяться:

- забезпечення технічної відповідності учасників транспортного процесу (технічна відповідність означає узгодженість як в середині окремих видів, так і у міжвидовому розрізі);

- технологічна спряженість передбачає застосування єдиної технології транспортування, прямі перевантаження, безперервне вантажне сполучення;

- спряженість – це загальна методологія дослідження кон'юнктури ринку і побудова тарифної системи, позначаючи узгодження економічних інтересів учасників транспортного процесу;

- використання єдиних систем планування (розробка і застосування різних планів, графіків для різноманітних видів транспорту).

До задач транспортної логістики також відносять:

- створення транспортних коридорів;
- вибір виду транспорту;
- вибір маршруту транспортування вантажів;
- складання розкладів.

Зупинимось детальніше на задачах вибору маршруту транспортування, тобто, пошуку оптимального шляху, та складання розкладу. Під оптимальним шляхом розуміється маршрут, що мінімізує витрати на транспортування.

Існує багато задач, які можна зобразити на графі. Наведемо деякі з них. Схематично зобразимо можливі шляхи у вигляді орієнтованого зваженого графу, ваги ребер якого вказують на вартість «проїзду» тим чи іншим шляхом (рис. 1.2).

Існують швидкі та точні алгоритми для пошуку шляху найменшої вартості між двома будь якими вершинами графу такі, як:

- алгоритм Дейкстри;
- алгоритм Флойда;
- алгоритм Форда-Фалкерсона.

У даному випадку це шлях, що складається з вершин 1, 2, 5, 7.

До даної задачі зводиться цілий ряд задач таких, як:

- задача про заміну обладнання;
- побудова критичного шляху у мережевих графах;
- побудова мереж максимальної надійності;
- раціональне розміщення пунктів обслуговування і т.п [15].

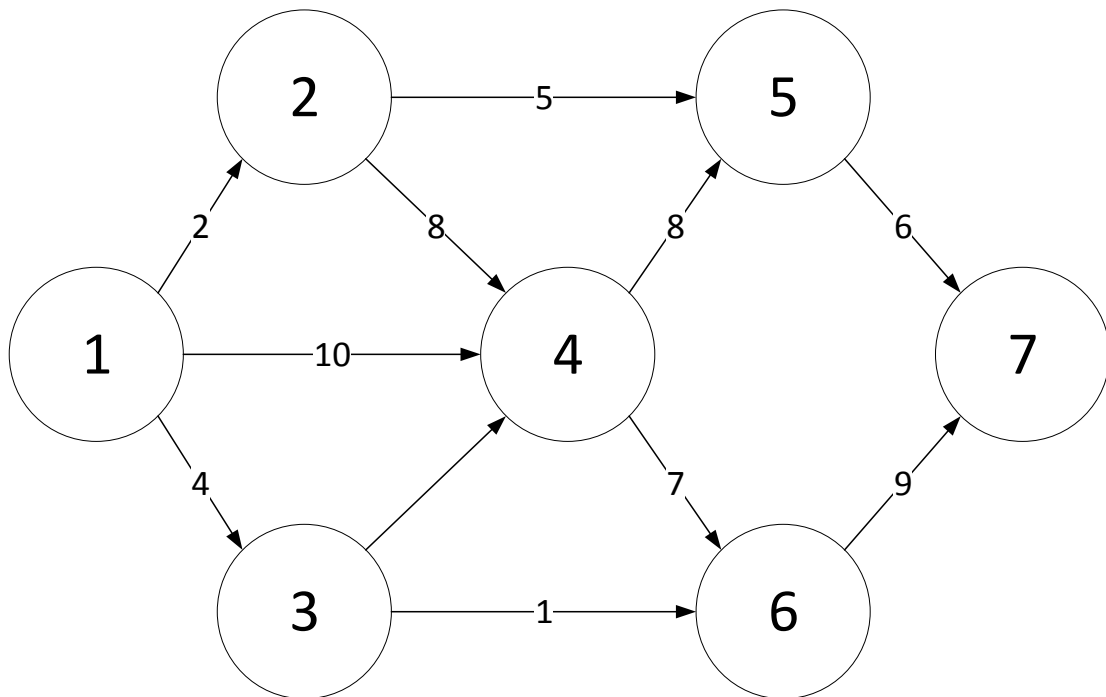


Рисунок 1.2 – Зображення транспортних шляхів між точками у вигляді орієнтованого зваженого графу

Джерело: [15]

Але є розповсюдженою ситуація, коли маршрут, повинен починатись і закінчуватись в одній і тій самій точці. Це є відомою задачею з комбінаторної оптимізації – задача комівояжера.

Задача комівояжера (англ. Travelling salesman problem), або задача пошуку гамільтонового ланцюгу найменшої ваги на графі – NP-складна задача, що відноситься до прикладної математики і наразі невідомий спосіб гарантовано отримати її точне рішення. Тим не менш, кожен день із нею зіштовхуються десятки мільйонів людей по всьому світі. Зокрема, компанії, що займаються короткостроковою орендою обладнання. У задачі, що

розглядається у даній роботі також піднімається задача, подібна до задачі комівояжера та спосіб її розв'язання.

Іншою, нерозв'язаною на даний момент задачею, що можна представити на графі, є задача пошуку оптимального розкладу. Розклад являє собою порядок руху між вершинами графу. Скласти його потрібно таким чином, щоб мінімізувати загальні витрати, тобто вартість часу роботи, сумарні транспортні витрати, кількість задіяних агентів та інше [16].

Важливою частиною на шляху ланцюгів поставок є склади. Ефективність логістичної системи залежить не тільки від вдосконалення та інтенсивності промислового і транспортного виробництва, а й від складського господарства та вибору оптимального місцезнаходження складу.

Основне призначення складу – концентрація запасів, їх зберігання та забезпечення безперебійного та ритмічного виконання заказів споживачів.

Склади – важлива частина більшості ланцюгів поставок та розглядаються як проміжні пункти, через які матеріали переміщуються якомога швидше. Складські операції являють собою наступну послідовність:

- розвантаження транспорту;
- прийомка товару;
- розміщення на зберігання;
- відбір товарів з міст зберігання;
- комплектація та упаковка;
- відвантаження;
- переміщення вантажів в середині складу.

Існує більше 200 типів складів за комбінацією різних видів транспорту, прибуття та відправлення продукції. Склади є зручним місцем для виконання ряду інших робіт, зокрема, сортування матеріалів, їх пакування та об'єднання [15].

В рамках власне логістики складування вирішуються такі основні завдання:

- раціональне планування складу при виділенні робочих зон, сприяє зниженню витрат і вдосконаленню процесу переробки вантажів;
- ефективне використання простору при розстановці обладнання дозволяє збільшити потужність складу;
- використання універсального обладнання, що виконує широкий спектр складських операцій;
- мінімізація маршрутів всередині складських перевезень з метою скорочення експлуатаційних витрат і збільшення пропускної спроможності складу;
- здійснення уніфікації партії відвантажень і застосування централізованої доставки;
- максимальне використання можливостей інформаційних Систем [17].
- забезпечення ритмічності, організованості та оперативної взаємодії виробничих і транспортних підрозділів;
- послаблення коливань всередині виробництва;
- згладжування нерівномірності зовнішніх поставок, їх одержання та використання;
- накопичення готової продукції та організація її розподілу;
- забезпечення зберігання і збереженості якості матеріальних цінностей;
- зменшення потреби в персоналі, звільнення його від виконання надлишкового обсягу робіт.

У цій роботі детально розглянуто схему «склад (С) – транспорт (Т) – виробництво (В)»

$$C \Leftrightarrow T \Leftrightarrow B$$

1.3 Аналіз існуючих наукових досліджень в галузі логістики поставок

Велика кількість задач, що зустрічаються у логістиці, є суто математичними. Для їх розв'язання використовують відповідні математичні моделі та методи, що відносяться до дискретної алгебри. Наприклад, методи динамічного та лінійного програмування, транспортна задача, оптимізація з використанням теорії графів та метаевристичних моделей.

Після винайдення електронно-обчислювальних машин, популярність логістики почала стрімко зростати. Багато дослідників підключились до розв'язання фундаментальних логістичних проблем таких, як:

- задача комівояжера;
- задача про декількох комівояжерів;
- множинна задача про доставку вантажів;
- задач розкрою;
- задачі про рюкзак;
- задачі зі складання допустимого розкладу;
- задача керування запасами;
- задача із оптимального розміщення складів;
- різні задачі з декількома умовами (такі, яка розглянута у цій кваліфікаційній роботі магістра) та інших.

Дослідниками задач логістики є велика кількість вчених-математиків, статистиків, дата-сайентистів. Відомими досліджувачами є американські вчені М. Гері та Д. Джонсон, найвідомішою роботою яких є монографія під назвою «Обчислювальні машини і складно вирішувані задачі», присвячена розв'язанню комбінаторних задач, що виникають в дискретній оптимізації, математичному програмуванні, алгебрі, теорії чисел, теорії автоматів, математичній логіці, теорії множин, теорії графів і т.п [18].

Актуальною є робота Ш. Люка, перше видання якої припадає на середину двотисячних років, яка постійно доповнюється і коригується. Останнє видання датується лютим місяцем 2016 року [19].

Актуальне третє видання книги «Алгоритми і аналіз» Т. Кормена, Ч. Лейзерсона, Р. Рівеста та К. Штайна є великим довідником для студентів, викладачів, вчених та дослідників. У книзі детально описується широке коло задач і проблем, із якими на даний момент зіштовхуються ті, хто працює із комп'ютерними алгоритмами, що застосовуються у задачах оптимізації та розпізнавання, без яких, зокрема, є неможливим і розв'язання задач логістики [20].

Книга-монографія вітчизняних вчених Ю. Скобцова та Є. Федорова, видана у 2013 році є детальним довідником саме про метаевристичні алгоритми, їх різновиди та їх реалізацію на комп'ютері, у програмному пакеті MatLab. Усі методи, представлені у книзі, можна застосувати при розв'язанні задач логістики, вибравши з них найефективніші [21].

Дослідження логістичних ланцюгів, задачі та способи їх розв'язання висвітлено, у книзі під авторством російської вченої В. Лубенцової «Математичні моделі і методи в логістиці» [15].

Популярними є міжнародні конкурси з дослідження операцій, у тому числі, оптимальних логістичних ланцюгів, які проходять щорічно. Завдання для них часто видають великі виробничі компанії такі, як Renault, Réseau de Transport d'Electricité, Міністерство енергетики Сполучених Штатів Америки та інші. Оптимізація логістичних операцій навіть на один відсоток може призвести до економії мільйонів доларів. Прикладами є PACE-challenge, VeRoLog-challenge, ROADEF challenge, GRID Optimization Competition та інші [22, 23, 24, 25]. На сайті університету Гельмута Шмідта, (Гамбург, Германія) є перелік триваючих і завершених конкурсів, присвячених питанням метаевристик та інструментам оптимізації, які застосовуються у логістиці [26].

Схожу задачу із побудови допустимого розкладу та маршрутизації розглядали Є. Панкратьев, О. Чеповський, Є. Черепанов та С. Чернишев у статті «Алгоритми і методи розв'язання завдань складання розкладів та інших екстремальних задач на графах великих розмірностей» [16].

Перелічені дослідження та конкурси з задачами та способами їх розв'язання належать до різних галузей логістики, але методи і алгоритми, що застосовуються для їх розв'язання, є актуальними і для наведеної задачі короткострокової оренди обладнання завдяки властивості зведення.

Настільки велика популярність питань логістики підтверджує важливість проведення подальших досліджень у цьому напрямку.

У даній роботі при розв'язанні задачі логістики застосовано модель, винайдену вітчизняним вченим, доктором фізико-математичних наук І. Козіним. Теоретичне обґрунтування та загальний опис моделі наявні у книзі-монографії «Еволюційні моделі у дискретній оптимізації» 2019 року видання [14].

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ

2.1 Еволюційний алгоритм: поняття, властивості, складові, алгоритмічна складність задач

Розглянемо класи P, NP та NPC (NP-складні), до яких найчастіше звертаються у теорії алгоритмів.

Клас P складається з задач, що можуть бути розв'язані за поліноміальний час. Точніше, це ті задачі, що можна розв'язати за час $O(n^k)$, де k – деяка константа, а n – розмір вхідних даних задачі.

Клас NP складається з задач, які піддаються перевірці за поліноміальний час. Назва «NP» означає «nondeterministic polynomial time» (недетермінований поліноміальний час). Мається на увазі, що якщо ми якимось чином отримуємо «сертифікат» розв'язку, то на протязі часу, поліноміальним чином залежного від розміру вхідних даних, можна перевірити коректність цього рішення.

Детермінованість означає, що для всіх станів є максимум і мінімум одне правило для будь-якого можливого вхідного символу, тобто наприклад, для стану 1 не може бути два переходи з одним і тим же вхідним символом.

Недетермінованість - нуль і більш переходів для одного символу в будь-яких станах [27].

Поліноміальним алгоритмом називається алгоритм, у якому часова складність є рівною $O(p(n))$, де $p(n)$ – деяка поліноміальна функція, а n – вхідна довжина. Алгоритми, часова складність яких не піддається подібній оцінці називаються «експоненційними» (це визначення включає і такі функції як $n^{\log n}$, - хоч вони і не є поліноміальними, але зазвичай не вважаються експоненційними) [18]. Експоненційні алгоритми вважаються «поганими» і найчастіше є тим, чи іншим варіантом повного перебору, а

поліноміальні «добрими». Д. Едмондс стверджував, що для багатьох задач цілочисельного програмування не існує поліноміальних алгоритмів.

Невідомо, чи виконується рівність $P = NP$, але більшість вчених схиляються, що це не одне і теж (рис. 2.1)

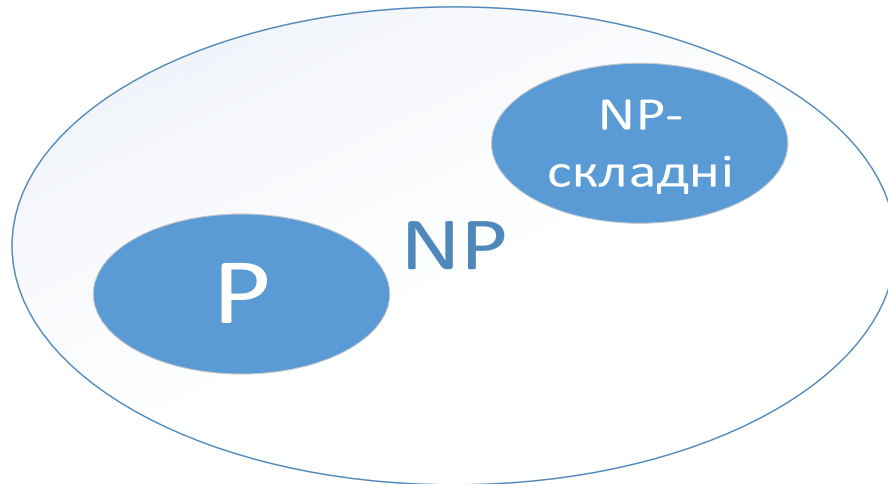


Рисунок 2.1 – Уявлення більшості дослідників про відношення між класами P , NP та NP -складні

Джерело: [20]

Інтуїтивно зрозуміло, що клас P складається з задач, що можна швидко вирішити, а клас NP – з задач, що можна швидко перевірити. Виходячи з досвіду, можна помітити, що розв'язати задачу з початку складніше, ніж перевірити знайдений розв'язок. Цю аналогію розповсюджують і на класи P та NP .

Існує і інше свідоцтво, хоча і не кінцеве, що $P \neq NP$, - це наявність « NP – складних» задач.

Поняття NP -складності безпосередньо не застосовується до задач оптимізації, а застосовується до задач прийняття рішення (decision problems), у яких відповідь може бути додатнім або від'ємним числом (кажучи більш формально, приймати значення «1» або «0»). Хоча, при доказі NP -складності задачі доводиться обмежуватись задачами прийняття рішення, між ними та задачами оптимізації існує зручний взаємозв'язок. Наклавши обмеження на

значення, що оптимізуємо, поставлену задачу можна звести до відповідної задачі прийняття рішення. Задачі пошуку найкоротшого шляху відповідає задача рішення про існування шляху, наприклад: чи існує для заданих вихідних даних, до числа яких входить орієнтований граф G , вершини u та v і ціле число k шлях з вершини u до вершини v , що складається з не більше ніж k ребер [20]?

Для побудови оптимального логістичного ланцюгу при короткостроковій оренді обладнання, необхідно вирішити наступні задачі, у тому числі:

- розробити допустимий розклад руху;
- вирішити множинну задачу про доставку вантажів;
- дотриматись додаткових обмежень.

Задача зі складання допустимого розкладу та множинна задача про доставку вантажів відносяться до NP-складних задач. Це означає, що наразі не відкрито та не доведено існування алгоритму, який дозволить їх розв'язати за поліноміальний час на недетермінованій машині Тюрингу і немає сенсу шукати точний алгоритм для їх розв'язання. Не доведено і те, що такий алгоритм неможливо знайти. Єдиним відомим шляхом гарантовано знайти точний розв'язок є повний перебір усіх можливих варіантів, але на практиці він є можливим лише для невеликої кількості задач малої розмірності, оскільки при повному переборі час, потрібний на розв'язання задачі зростає експоненційно, що продемонстровано на графіку (рис. 2.2), та у таблиці 2.1.

С. Кук довів, що одна конкретна задача з класу NP, що зветься задачею про виконуваність, має таку властивість, що будь-яка інша задача з класу NP може бути зведена до неї за поліноміальний час. Таким чином, якщо задача про виконуваність може бути розв'язана за поліноміальний час, то і будь-яка інша задача з класу NP поліноміально вирішувана, а якщо будь-яка задача з класу NP є складновирішуваною, то і інші задачі є також складновирішуваними.

Таблиця 2.1 - Час, необхідний на виконання обчислень в залежності від розміру вхідних даних та обчислювальної складності задачі при швидкості обчислень 10^6 операцій у секунду

Розмір / складність	10	20	30	40	50	60
n	0,00001 сек.	0,00002 сек.	0,00003 сек.	0,00004 сек.	0,00005 сек.	0,00005 сек.
n^2	0,0001 сек.	0,0004 сек.	0,0009 сек.	0,0016 сек.	0,0025 сек.	0,0036 сек.
n^3	0,001 сек.	0,008 сек.	0,027 сек.	0,064 сек.	0,125 сек.	0,216 сек.
n^5	0,1 сек.	3,2 сек.	24,3 сек.	1,7 хв.	5,2 хв.	13 хв.
2^n	0,0001 сек.	1 сек.	17,9 хв.	12,7 діб	35,7 століть	366 століть
3^n	0,059 сек.	58 хв.	6,5 років	3855 століть	$2 \cdot 10^8$ століть	$1,3 \cdot 10^{13}$ століть

Джерело: [28]

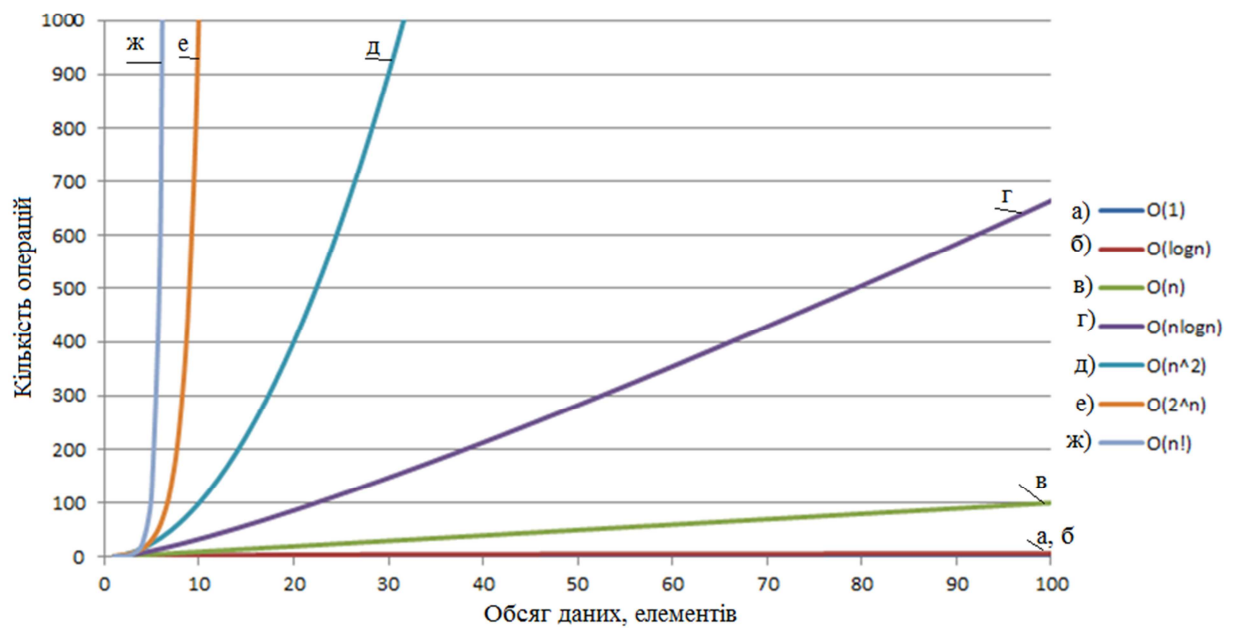


Рисунок 2.2 - Кількість операцій, необхідна в залежності від складності алгоритму

Джерело: [29]

Пізніше відносно широкого кола інших задач було доведено, що вони по складності є еквівалентними цим задачам, а сам клас, що складається з

«найбільш складних» задач з NP отримав назву «Клас NP-складних задач» [18].

Через велику алгоритмічну складність кожної NP-складних задач та їх комбінації, єдиним наразі відомим шляхом знаходження потенційно якісного розв'язку, є метаевристичні алгоритми.

Евристика є алгоритмом, який знаходить «досить хороші» (субоптимальні) розв'язки складної задачі за прийнятний час, теоретично не обґрунтовуючи їх правильність або оптимальність, тобто емпіричним шляхом. Термін «Метаевристика» введений Ф. Гловером в 1986 р. Метаевристика розширює можливості евристик, комбінуючи евристичні методи (Процедури) на основі високорівневої стратегії (приставка «Мета»).

С. Блюм та А. Ролі виділили дев'ять властивостей метаевристик:

- а) метаевристика є стратегією, яка управляє процесом пошуку;
- б) метою метаевристики є ефективне дослідження простору пошуку для знаходження (суб) оптимального розв'язку;
- в) методи, що використовуються метаевристичним алгоритмом, знаходяться в діапазоні від простого локального пошуку до складного процесу навчання;
- г) метаевристичний алгоритм є наближенням і зазвичай недетермінованим;
- д) метаевристика може використовувати механізм, що запобігає потраплянню в пастку (локальний оптимум) в обмеженій області простору пошуку;
- ж) основні положення метаевристики допускають абстрактний опис;
- з) метаевристика не є проблемно-орієнтованою;
- й) метаевристика може використовувати проблемно-орієнтоване знання в формі евристик, керованих високорівневою стратегією;
- к) передові метаевристики використовують досвід, накопичений в процесі пошуку і представлений у вигляді пам'яті, для управління пошуком

[21].

Ш. Люк у своїй книзі «Основи метаевристик» стверджував, що метаевристики – доволі невдала назва для опису великого підрозділу, у дійсності основного, в стохастичній оптимізації (stochastic optimization). Стохастична оптимізація є великим класом алгоритмів і методів, які у томі чи іншому ступені використовують випадковість для пошуку оптимального (або досяжного оптимального) розв'язку складних задач. Метаевристики – найбільш загальні алгоритми з даного класу і використовуються для розв'язку широкого спектра задач.

Метаевристики застосовуються для завдань типу «я впізнаю їх, коли побачу». Це алгоритми, що використовуються для пошуку рішення у задачах, у яких доступно дуже мало допоміжної інформації: ви не знаєте, на що схоже оптимальне рішення, невідомо, яким чином необхідно шукати це рішення, евристичної інформації, що є у наявності, явно недостатньо, а послідовний перебір не підходить через те, що простір для пошуку занадто великий. Але, якщо є потенційний розв'язок, його можна перевірити і встановити, наскільки він є добрим. Тобто можна дізнатись якість розв'язку, коли він є доступним [19].

Метаевристики знаходять широке застосування для розв'язання різних оптимізаційних задач, машинного навчання, розпізнавання образів та ін. Коли задачу не може бути розв'язано іншими, більш простими методами, метаевристики можуть знайти оптимальні або близькі до них розв'язки. При цьому обсяг обчислень може виявитися більшим, але швидкість, з якою він росте при збільшенні розмірності задачі зазвичай менше, ніж у інших відомих методів. Після того, як комп'ютерні системи стали досить швидкодіючими і недорогими, метаевристики перетворилися в один з основних інструментів пошуку (суб) оптимальних розв'язків задач, які до цього вважалися нерозв'язними.

Основи теорії генетичних алгоритмів (genetic algorithm) сформульовані Д. Холландом і в подальшому були розвинені іншими дослідниками. Найбільш відомою і цитованою в даний час є монографія Д. Голдберга, де

систематично викладені основні результати і області практичного застосування генетичних алгоритмів.

Генетичні алгоритми використовують принципи і термінологію, запозичені у біологічної науки - генетики. У генетичному алгоритмі кожна особина представляє потенційний розв'язок деякої проблеми. У класичному генетичному алгоритмі особина кодується рядком двійкових символів - хромосомою, кожен біт якої називається геном. Множини особин – потенційних рішень становлять популяцію. Пошук (суб) оптимального розв'язку задачі виконується в процесі еволюції популяції - послідовного перетворення однієї кінцевої множини рішень в іншу за допомогою генетичних операторів репродукції, кросинговеру і мутації.

Еволюційні обчислення використовують такі механізми природної еволюції:

Перший принцип заснований на концепції виживання найсильніших і природного відбору за Дарвіном, який був сформульований ним в 1859 році в книзі «Походження видів шляхом природного відбору». Згідно Дарвіну особини, які краще здатні вирішувати завдання в своєму середовищі, виживають і більше розмножуються (репродукують). У генетичних алгоритмах кожна особина є розв'язком деякої задачі. По аналогії з цим принципом особини з кращими значеннями цільової (фітнес) функції мають великі шанси вижити і репродукувати. Формалізація цього принципу, як ми побачимо далі, дає оператор репродукції.

Другий принцип обумовлений тим фактом, що хромосома нащадка складається з частин, отриманих з хромосом батьків. Цей принцип був відкритий в 1865 році Менделем. Його формалізація дає основу для оператора схрещування (кросинговеру).

Третій принцип заснований на концепції мутації, відкритій в 1900 році де Вре. Спочатку цей термін використовувався для опису істотних (різких) змін властивостей нащадків і придбання ними властивостей, відсутніх у батьків. По аналогії з цим принципом генетичні алгоритми використовують

подібний механізм для різкої зміни властивостей нащадків і, тим самим, підвищують різноманітність (мінливість) особин в популяції (множині рішень).

Ці три принципи складають ядро еволюційних обчислень. Використовуючи їх, популяція (множина варіантів розв'язків задачі) еволюціонує від покоління до покоління.

Еволюції штучної популяції - пошуку множини рішень деякої задачі формально можна описати алгоритмом, який представлено на рисунку (рис 2.3).



Рисунок 2.3 – Структура генетичного алгоритму

Джерело: [21]

Генетичний алгоритм бере множину параметрів оптимізаційної задачі і кодує її послідовностями кінцевої довжини в деякому кінцевому алфавіті (в найпростішому випадку двійковий алфавіт «0» і «1»).

Попередньо простий генетичний алгоритм випадковим чином генерує початкову популяцію строк (хромосом).

Потім алгоритм генерує наступне покоління (популяцію), з допомогою трьох основних генетичних операторів:

- репродукції;
- схрещування (кросинговеру);
- мутації.

Генетичний алгоритм працює до тих пір, поки не буде виконано задану кількість поколінь (ітерацій) процесу еволюції або доки на деякій генерації не буде отримано задану якість, або внаслідок передчасної збіжності при попаданні в деякий локальний оптимум. У кожному поколінні множина штучних особин створюється з використанням старих і додаванням нових з хорошими властивостями.

Генетичні оператори є математичною формалізацією наведених вище трьох основоположних принципів Дарвіна, Менделя і де Вре природної еволюції [21].

Ми випробуємо еволюційний алгоритм на фрагментарних структурах, що забезпечує спрямований перебір.

2.2. Узагальнений еволюційний алгоритм на фрагментарних структурах

За допомогою теорії фрагментарних структур, вдалося побудувати еволюційну модель, яка є універсальною для багатьох класів дискретних оптимізаційних задач. А саме: задач, що допускають фрагментарну структуру рішень.

У багатьох дискретних задачах оптимізації множина допустимих рішень може розглядатися як фрагментарна структура. У цей клас потрапляють численні задачі на графах з адитивним критерієм, зокрема, задачі покриття, задачі теорії розкладів, задачі маршрутизації, задачі багатоетапного управління запасами і практично всі задачі, для яких є застосованим метод динамічного програмування. Звернемо увагу на те, що оптимальний розв'язок в подібних задачах завжди є максимальним фрагментом фрагментарної структури. Таким чином, перебравши всі

максимальні фрагменти, можна з гарантією знайти оптимальний розв'язок задачі.

Будь-який максимальний фрагмент може бути побудований з елементарних фрагментів шляхом застосування фрагментарного алгоритму при деякій заданій початковій перестановці елементарних фрагментів. Отже, допустимі розв'язки оптимізаційних задач на фрагментарних структурах можуть кодуватися перестановками.

Фрагментарний алгоритм у відриві від метаевристичних алгоритмів не забезпечує оптимізацію заданої функції. Його завдання – дати хоч якийсь розв'язок, котрий на наступному кроці буде оптимізуватись за допомогою метаевристичних алгоритмів.

У загальному вигляді, схема оптимізації функції виглядає так (рис 2.4):

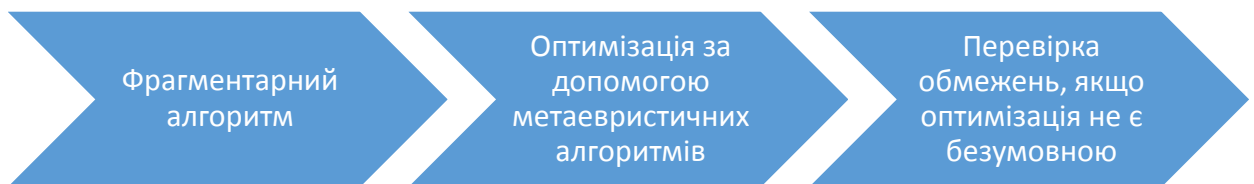


Рисунок 2.4 – Загальний принцип оптимізації за допомогою метаевристик

Джерело: побудовано автором.

Результат виконання фрагментарного алгоритму цілком залежить від порядку, у якому розташовані фрагменти, за якими відбувається побудова функції. Кожній перестановці відповідає числове значення функції.

Еволюційний алгоритм на фрагментарних структурах належить до метаевристичних алгоритмів.

Розглянемо класичну постановку однокритерійної задачі оптимізації. На множині V знайти точку v^* , в якій досягає максимального (мінімального) значення функція $\Phi: \rightarrow R^1$. Як правило, будуть розглядатися завдання на максимум функції.

Для пошуку наближеного розв'язку задачі оптимізації, переходять до математичної моделі задачі. У моделі вихідна множина V замінюється деякою множиною досить простої природи - базовою множиною рішень, а цільова функція, відповідно, замінюється функцією, заданою на базовій множині рішень.

Визначимо складові еволюційної модель оптимізаційної задачі наступним чином:

а) базова множина розв'язків X , на якій здійснюється пошук оптимального розв'язку. Кінцеві непусті підмножини множини X будемо називати популяціями;

б) критерій - функція $f: X \rightarrow R^1$, задана на базовій множині X зі значеннями в R^1 (можливі і багатокритеріальні моделі з цільовими функціями $f: X \rightarrow R^n$);

в) правило побудови початкової популяції: оператор, який виділяє на множині X її непорожню підмножину $Y_0 \subseteq X$;

г) правило селекції - правило вибору, яке дозволяє виділити для будь-якої популяції $Y \subseteq X$ множину пар елементів - батьків в цій популяції для подальшого виконання операції кросовера;

д) правило кросовера (схрещування) задається оператором кросовера $Kr: X \times X \rightarrow X$, який за двома рішеннями - батьками будує нове рішення - нащадка (або кілька таких рішень) з множини X ;

е) правило мутації задається оператором мутації $M: X \rightarrow X$ і числом $a_{mut} \in [0,1]$ - ймовірністю мутації. Для будь-якої популяції Y множина нащадків цієї популяції знаходиться шляхом послідовного застосування правил селекції, кросовера і мутації;

ж) правило відбору - правило, що дозволяє отримати нову популяцію з об'єднання множин батьків і нащадків. Зазвичай це правило задається за допомогою вказівки розміру (числа елементів) популяції і лінійного порядку, або функції - критерію відбору. Елементи об'єднання множин батьків і

нащадків упорядковуються і вибираються ті, у яких значення критерію найбільше для задач на максимум (або найменше для задач на мінімум);

з) правило зупинки - правило, визначена умова зупинки алгоритму.

Пошук наближеного оптимального розв'язку в рамках еволюційно-фрагментарної моделі здійснюється за допомогою еволюційного алгоритму, загальна схема якого наводиться нижче.

Наведемо опис еволюційного алгоритму для пошуку наближених розв'язків задачі оптимізації в рамках розглянутої еволюційної моделі. Крок еволюційного алгоритму, який будемо називати надалі кроком еволюції, полягає в наступному:

Нехай на k – му кроці визначена поточна популяція (k – е покоління) $Y_k \subseteq X$. На початковому кроці з номером 0 це початкова популяція Y_0 , яка знаходиться за правилом побудови початкової популяції.

За допомогою правила селекції обирається множина пар-батьків $P_k \subseteq Y_k \times Y_k$ у поточній популяції Y_k . До кожної батьківської пари застосовується оператор кросоверу та будується множина $C_k = Kr(P_k)$. До всіх елементів множини C_k застосовується правило мутації. А саме: кожен елемент $c = C_k$ з вірогідністю a_{mut} замінюється на елемент $c' = M(c)$, або з вірогідністю $1 - a_{mut}$ залишається без змін. Таким шляхом будується множина нащадків C'_k .

Далі застосовується правило відбору. Елементи об'єднання множин $Y_k \cup C'_k$ упорядковуються за зменшенням (або зростанням) значень критерію. Перші t з них (t розмір популяції) утворюють популяцію Y_{k+1} .

Перевіряється умова зупинки. Якщо умови не виконано, то здійснюється перехід до чергового кроку алгоритму з початковою популяцією Y_{k+1} . При виконанні умови зупинки алгоритм припиняє роботу. Наближеним розв'язком вважається «кращий» за значенням цільової функції розв'язок в останній популяції.

Часто в еволюційних моделях в якості базової множини розглядається кінцева множина слів фіксованої довжини над деяким алфавітом. Зокрема, в

класичній моделі Д. Холанда базова множина - множина бінарних послідовностей фіксованої довжини. У багатьох більш пізніх моделях базова множина - множина цілочисельних (а іноді і нецілочисельних) векторів заданої розмірності.

У еволюційно-фрагментарному алгоритмі застосовується геометричний кросовер.

Геометричність кросовера гарантує наявність спадкових властивостей і, відповідно, розбиття базового простору на класи множин з різними наборами властивостей. А далі в рамках моделі, відповідно до теореми про накопичення властивостей, буде відбуватися накопичення «корисних» властивостей в поточній популяції. Це дозволяє сподіватися на те, що наблизений розв'язок, знайдений еволюційним алгоритмом, буде досить близько до оптимального (за значенням цільової функції).

Сутність геометричного кросоверу полягає у наступному. Нехай базова множина X еволюційної моделі є метричним простором з метрикою $\rho: X \times X \rightarrow R_+^1$. Як і вище, позначимо оператор кросоверу $Kr: X \times X \rightarrow X$.

Оператор кросоверу на метричному просторі (X, ρ) називається геометричним, якщо для будь-яких $x, y \in X$ результат операції кросоверу $Kr(x, y)$ належить до відрізка $[x, y]$, що з'єднує точки x та y . Іншими словами, $\forall x, y \in X \rho(x, y) = \rho(x, Kr(x, y)) + \rho(Kr(x, y), y)$. Якщо представити множину рішень у вигляді опуклого багатокутника на евклідовому просторі, то геометричний кросовер – це такий кросовер, який обирає новий розв'язок, як точку, що знаходиться між двома іншими точками на ребрі цього багатокутника. Зрозуміло, що будь-який геометричний кросовер є опуклим.

Нагадаємо, що на метричному просторі визначена структура зі спадковістю, яка складається з множини всіх відрізків простору. Таким чином, для геометричного кросоверу має місце властивість успадкування. Успадковується приналежність елементів одному відрізку.

Доведено ряд необхідних умов геометричності кросоверу. Приведемо їх у вигляді теорем.

Теорема про властивість чистоти. Для того, щоб кросовер $Kr: X \times X \rightarrow X$ був геометричним необхідно, щоб $\forall x \in X \ Kr(x, x) = x$.

Теорема про властивість конвергенції. Для того, щоб кросовер $Kr: X \times X \rightarrow X$ був геометричним, необхідно, щоб $\forall x, y, z \in X$ та $z = Kr(Kr(x, y), y)$ з умови $z = x$ випливає, що $Kr(x, y) = x$.

Теорема про властивість ділимості. Для того, щоб кросовер $Kr: X \times X \rightarrow X$ був геометричним необхідно, щоб з умови $z \in [x, y]$ та $w \in [x, z] \cap [z, y]$ випливало, що $z = x$ або $z = y$.

Порядок побудови еволюційної моделі.

Першим етапом побудови еволюційної моделі є, безумовно, вибір базового простору моделі. Базовий простір по можливості найбільш повно повинен відповідати природному опису моделі. Зокрема, повинні бути визначені функції кодування і декодування, які переводять елементи модельованих структур в елементи базового простору і, навпаки, дозволяють побудувати по елементу базового простору розв'язок вихідної задачі.

Другим етапом є вибір критерію відбору. На цільову функцію (критерій відбору) не накладалися ніяких обмежень, крім принципової обчислюваності. Тобто за кодом розв'язку може бути легко знайдено значення цільової функції. Однак іноді цільова функція може бути змінена. В завданнях умовної максимізації цільова функція довизначається на всьому базовому просторі наступним чином. Якщо для розглянутого розв'язку не виконуються умови задачі, то значення цільової функції - велике по модулю негативне число ($-M$ для задач на максимум). Ще один випадок, коли потрібно видозмінити критерій - це випадок наявності багатьох екстремумів з однаковим значенням цільової функції. В цьому випадку еволюційний алгоритм починає працювати нестабільно, перестрибуючи від околиці одного локального оптимуму до іншого. Рекомендується доповнити задачу ще одним критерієм або групою критеріїв, для того щоб виключити

багатоекстремумність. Потім ведеться пошук лексикографічного оптимуму. У зміненому завданні головним критерієм залишається вихідна цільова функція, а всі інші критерії відносяться до другорядних.

Третім етапом є вибір оператора кросовера. На наступному кроці необхідно вибрати метрику в базовому просторі. Наявність метрики дозволить запустити механізм спадковості. Метрика визначає спадкову структуру в базовому просторі, що в подальшому забезпечить ефект накопичення «корисних» властивостей при роботі еволюційного алгоритму.

Вибір метрики на базовому просторі і умова опуклості накладає певні вимоги на оператор кросовера. Оператор кросовера повинен бути геометричним в цій метриці. Саме ця властивість кросовера забезпечує спадкоємність і дозволяє у якійсь мірі обґрунтувати роботу еволюційного алгоритму. Підхід, заснований на геометричних властивостях кросовера, часто застосовується в гібридних алгоритмах пошуку оптимальних розв'язків.

Четвертим етапом є генерація початкової популяції. Від вибору початкової популяції істотно залежить результат, який буде отримано в рамках еволюційної моделі. Будемо називати досяжним елементом в еволюційній моделі той елемент, який може з'явитися на будь-якому етапі еволюції. Нехай кросовер в розглянутій моделі геометричний і, отже, опуклий. Тоді, в силу визначення опуклого оператора кросовера, справедливе наступне твердження:

В рамках еволюційної моделі без оператора мутації будь який досяжний елемент належить опуклій оболонці початкової популяції. Більш того, покоління, яке буде отримано на кроці з номером $k + 1$, є підмножиною опуклою оболонки покоління, отриманого на попередньому k -му кроці еволюційного алгоритму.

Вище вказане твердження показує обмеженість еволюційних моделей без оператора мутації. Зокрема, всі розв'язки, отримані шляхом застосування

еволюційного алгоритму без оператора мутації, завжди належать опуклій оболонці початкової популяції.

П'ятим етапом є вибір оператора мутації. Тепер зрозуміло призначення мутації в еволюційних моделях. Завдання операції мутації отримати розв'язок, який виходить за кордони опуклої оболонки поточної популяції і, тим самим, забезпечити можливість збільшення простору пошуку та, зокрема, можливість досягнення саме глобального оптимуму або близьких до нього розв'язків. Без операції мутації еволюційний алгоритм стає локальним. Відповідним має бути і вибір мутації. Хороші результати слід очікувати від гібридних алгоритмів, в яких оптимальний розв'язок, отриманий на поточному кроці еволюційного алгоритму, поліпшується шляхом застосування локального алгоритму оптимізації. Причому вибір бази околиць для локального пошуку повинен бути таким, щоб забезпечити вихід пошуку за кордону опуклої оболонки поточної популяції.

Шостим етапом є вибір оператору селекції. Оператор селекції дозволяє вибрати окремі розв'язки для подальшого схрещування. При цьому бажано, щоб властивості, що відповідають за близькість до оптимуму, перейшли в наступне покоління. Тому розумно вибирати для схрещування розв'язок з «Найкращим» значенням цільової функції $F(x)$. Такою властивістю володіє, наприклад, пропорційний оператор селекції, коли ймовірність вибору пари для схрещування пропорційна значенням цільової функції цього рішення (для задач на максимум при позитивних значеннях цільової функції (рис. 2.5 а).

Іноді, для ослаблення ефекту гіперсходимості можна змістити центр розподілу (рис. 2.5 б)

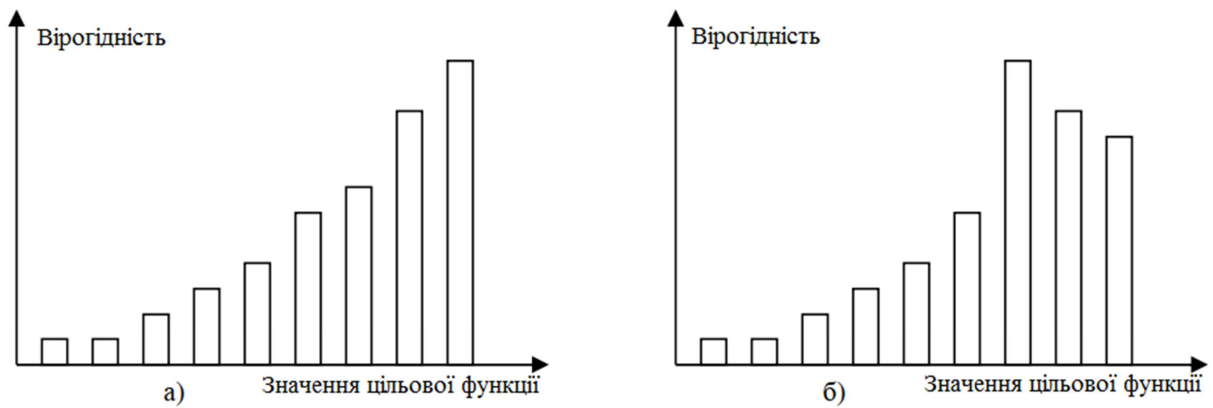


Рисунок 2.5 - Можливі варіанти розподілів для роботи оператора

Джерело: [14]

При пропорційному виборі вірогідність вибору розв'язку x_i для виконання операції схрещування є рівною $p_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)}$ будь яких двох точок. Другий варіант селекції полягає у порядковому виборі. У цьому випадку усі елементи популяції упорядковуються за зменшенням значення цільової функції $F(x_1) \geq F(x_2) \dots \geq F(x_N) > 0$ (для задачі на максимум функції) і вірогідність вибору визначається позицією елементу у цьому ряді:

$$p_i = \frac{1}{N} (a - (2a - 2) \frac{i-1}{N-1}), \text{ де число обирається з діапазону } 1 \leq a \leq 2.$$

Можливі і інші методи селекції.

Сьомий етап – вибір оператора відбору. Оператор відбору вибирає розв'язки з проміжної популяції, які перейдуть в наступне покоління. Найбільш простий спосіб вибору це відсів розв'язків з «поганим» значенням цільової функції. Однак для подолання ефекту гіперсходимості можна застосовувати і інші методи відбору. Наприклад, можна ввести параметр «час життя» для окремих розв'язків - число поколінь де присутній розв'язок. Розв'язки, які досягли граничного рівня часу життя видаляються з популяції. Для відсіву можна використовувати параметр «граничне число схрещувань». В цьому випадку з популяції видаляються елементи, для яких досягло межі число їх часток в операції кросоверу.

Восьмий етап – вибір умови зупинки. Найбільш типовими умовами зупинки є:

- а) перевищення граничного числа поколінь в еволюції;
- б) перевищення граничного часу роботи алгоритму;
- в) стабілізація популяції за значенням цільової функції (всі розв'язки мають однакове значення цільової функції);
- г) досягнення необхідного рівня значень цільової функції на «кращих» розв'язках популяції.

В задачі оптимізації логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання, яка розглядається в даній роботі, використовуються *багатокритеріальна оптимізація*.

При побудові еволюційної моделі для багатокритеріальної оптимізаційної задачі трохи змінюються механізми селекції та відбору. Це пов'язано з тим, що для застосування оператора селекції і оператора відбору елементи популяції необхідно впорядкувати. В випадку одного критерію елементи популяції упорядковуються по значенням критерію. У разі декількох критеріїв такий метод упорядкування вже не годиться.

Нехай в базовому просторі $X = \{x\}$ задано векторну цільову функцію $F: X \rightarrow R^k$, при чому задача оптимізації ставиться наступним чином

$$F(x) = (F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)) \rightarrow \max.$$

Для простоти будемо вважати множину X кінцевою. Парето-оптимальним елементом для цієї задачі називається такий елемент $x^* \in X$, для якого не існує такого елемента $x \in X$, що $F_1(x^*) \leq F_1(x), F_2(x^*) \leq F_2(x), \dots, F_k(x^*) \leq F_k(x)$ та $F(x^*) \neq F(x)$. Множина всіх Парето оптимальних елементів називається множиною Парето задачі, що розглядається. Відношення $<$ повного лінійного порядку на X називається ефективним, якщо $\forall x, y \in X$ з умови $F_1(x) \leq F_1(y), F_2(x) \leq F_2(y), \dots, F_k(x) \leq F_k(y)$

впливає, що $x \prec y$. Поряд з векторним критерієм, розглянемо будь-який ефективний лінійний порядок в базовому просторі.

Для виконання оператора селекції (вибору пар для схрещування) елементи поточної популяції будемо впорядковувати за зменшенням відповідно до відношення порядку \prec .

Введемо допоміжну функцію $F_0^k(x)$ на об'єднанні множин елементів популяції Y_k та множини нащадків C_k' . Значення функції $F_0^k(x)$ на елементі x будемо вважати рівним 1, якщо x є максимальним елементом для функції $F(x)$ на множині $Y_k \cup C_k'$ та нулю у протилежному випадку. Для виконання оператора відбору поступимо наступним чином: упорядкуємо елементи множини $Y_k \cup C_k'$ лексикографічно, за зменшенням значення $F_0^k(x)$ і за зменшенням відносно обраного порядку \prec . Нехай розмір популяції є рівним N . У чергове покоління Y_{k+1} переходять перші N елементів проміжної популяції. На останньому кроці перші елементи такого впорядкування проміжної популяції із значення функції $F_0^k(x) = 1$ можна розглядати як наближення множини Парето вихідної задачі (точніше, як коди елементів множини Парето). Схему вибору розв'язку у задачі багатокритеріальної оптимізації можна розглянути на рисунку (рис. 2.6).

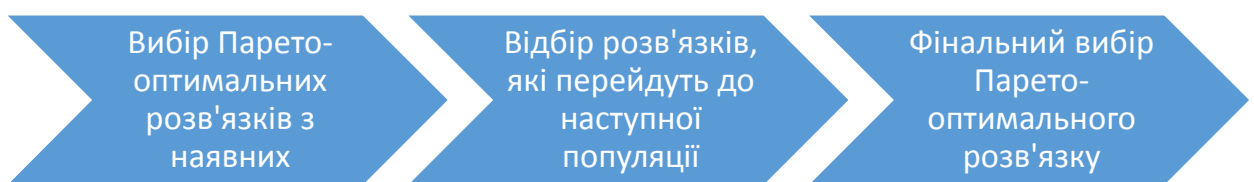


Рисунок 2.6 – Схема вибору розв'язку у задачі багатокритеріальної оптимізації

Джерело: побудовано автором.

Оцінка складності фрагментарного алгоритму.

Нехай загальне число фрагментів, які використовуються при знаходженні розв'язку задачі є N . Позначимо верхню оцінку трудомісткості

перевірки умови приєднання на кожному кроці як m , n - верхня оцінка числа фрагментів, що становлять розв'язок завдання. Трудомісткість сортування фрагментів становить $N * \ln N$. Отже, трудомісткість фрагментарного алгоритму може бути оцінена числом $N * \ln N * m * n$. Якщо трудомісткість m перевірки умови приєднання на кожному кроці поліноміально залежить від N , то фрагментарний алгоритм також є поліноміальним [14].

Зазначимо, що мова йде саме про фрагментарний алгоритм, який, як вже писалось вище, не є алгоритмом оптимізації і не підходить для пошуку оптимального розв'язку без застосування еволюційного, або іншого ефективного евристичного алгоритму. Блок-схему оптимізації за допомогою еволюційного алгоритму на фрагментарних структурах представлено на рисунку (рис. 2.7).

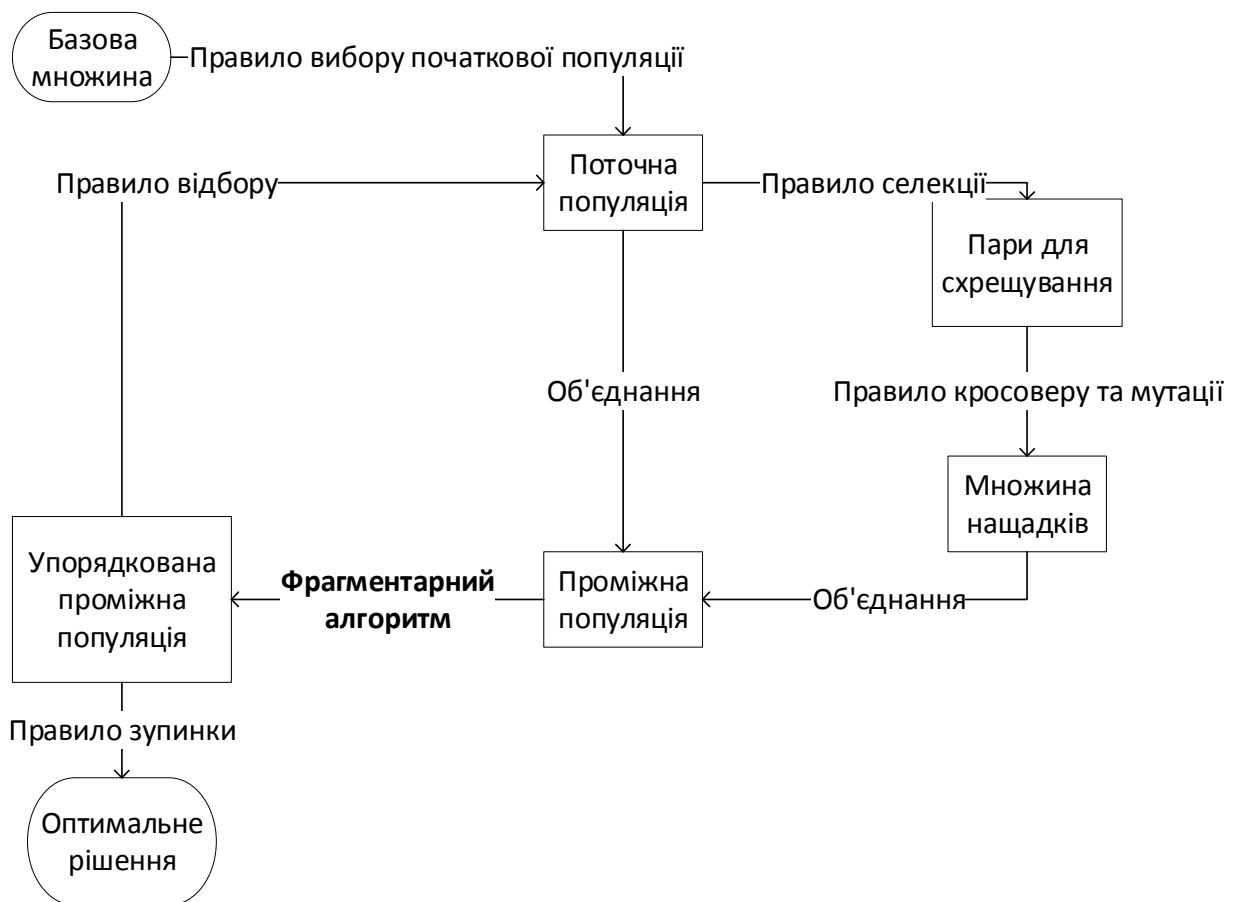


Рисунок 2.7 – Блок-схема еволюційно-фрагментарного алгоритму

Джерело: [14]

Алгоритм, дозволяє знайти лише субоптимальний розв'язок, тобто неможливо точно довести, або оцінити його якість.

2.3 Постановка задачі короткострокової оренди обладнання

Під час надання послуг з короткострокової оренди обладнання, з метою розв'язання задачі пошуку субоптимального розкладу та маршруту перевезення, запропоновано поетапну процедуру моделювання логістичних ланцюгів, яку представлено на рисунку (рис. 2.8).

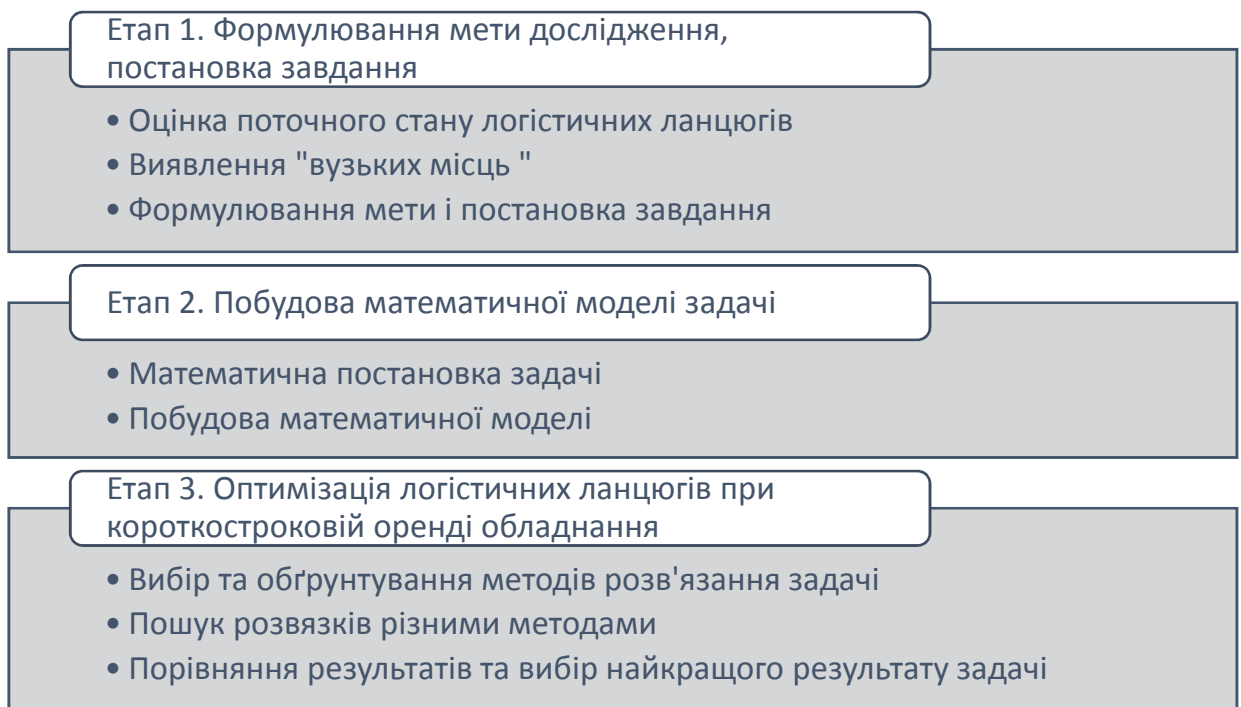


Рисунок 2.8 - Етапи моделювання логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання

Джерело: побудовано автором.

На *першому етапі* моделювання логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання здійснюється оцінювання поточного стану логістичних ланцюгів на підприємстві, виявляються «вузькі місця», а саме: визначаються суми витрат на перевезення, ефективність перевезення,

втрати, збитки тощо. На основі проведених попередніх досліджень формулюється мета та постановка завдання.

Другим етапом моделювання логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання є математична постановка задачі та побудова її математичної моделі.

Третім етапом моделювання логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання є оптимізація логістичних ланцюгів.

Нижче наведемо витрати, які необхідно мінімізувати при побудові логістичного ланцюга:

- кількість використаного обладнання для задоволення усіх потреб споживачів;
- кількість залучених транспортних засобів;
- пройденої відстані.

Заздалегідь відомо:

- координати складу;
- координати споживачів;
- тип та кількість наявного обладнання кожного типу;
- тип та кількість обладнання, замовленого кожним споживачем;
- вартість залучення обладнання кожного типу;
- вагу обладнання кожного типу;
- вантажопідйомність транспортних засобів (вона однакова для усіх ТЗ);
- вартість одиниці пройденої відстані кожним транспортним засобом;
- вартість залучення додаткового транспортного засобу;
- дату початку оренди та термін використання обладнання споживачем;
- розмір вікна у рамках якого є можливим планування.

На початку періоду планування усе обладнання знаходиться на складі, а наприкінці повинно бути доставлене на склад. По завершенню строку оренди, орендодавець повинен вилучити обладнання одним транспортним засобом наступного дня після того, як спливе строк оренди та доставити його на склад, або до іншого споживача. Обладнання, доставлене на склад, залишається

недоступним для інших транспортних засобів до наступного дня, але цей же транспортний засіб може доставити його іншому споживачу того ж дня. Обмін обладнанням між різними транспортними засобами не є допустимим. Обладнання різних типів, оформлюється різними заявами. Приклад заяви наведено у таблиці 2.2.

Заява від споживача №1 у таблиці 2.2 означає, що споживач робить запит на оренду обладнання у кількості двох (2) одиниць, типу «б», на чотири доби, із доставкою до нього на 1-3 добу та вилученням у 5-7 добу відповідно. Тобто, якщо обладнання було доставлене у другу (2) добу, то завершити його використання споживач повинен на у шосту (6) добу. На сьому добу орендодавець повинен вилучити обладнання у кількості двох (2) одиниць та доставити на склад, або іншому споживачу, за його заявою.

Таблиця 2.2 - Приклад заяви

Споживач, №	Часовий проміжок доставки, доба	Строк оренди, доба	Часовий проміжок вилучення, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
1	1-3	4	5-7	Тип 6	2
2	2-4	6	8-10	Тип 3	5
3	5-7	2	7-9	Тип 7	3

Джерело: побудовано автором.

Кількість обладнання кожного типу, яке залучає орендодавець є обмеженою, а також, мінімальною, але достатньою для задоволення потреб усіх споживачів. Залучення кожної одиниці потребує витрат для орендодавця. Загальний шлях транспортних засобів, що доставляють обладнання, повинен бути як найменшим, а їх маршрут кожної доби - починатись і закінчуватись в одній і тій самій точці – на складі. Кількість транспортних засобів для виконання завдання є необмеженою. Кількість залучених одиниць транспорту на кожен день роботи визначається заздалегідь. Залучення кожної нової одиниці транспорту несе додаткові витрати для орендодавця. Оплата за «заброньовану» одиницю транспорту

береться з першого дня, навіть якщо він не був у цей день у використанні. Окрім того, тарифікується кожен кілометр пробігу. Витрати на транспорт повинні бути якомога меншими. Додаткове обмеження є в тому, що необхідно дотримуватись умов із вантажопідйомності транспортного засобу та відстані, яку дозволено подолати за добу. Якщо у процесі виконання заяв транспортним засобом порушуються умови з максимальної вантажопідйомності, то він повертається на склад, обладнання вивантажується та завантажується нове. У разі вичерпання ліміту добової пройденої відстані, роботу продовжує новий транспортний засіб за розкладом, якому слідував попередній.

Отже, підприємства, що надають послуги короткострокової оренди обладнання, стикаються з комбінацією одразу двох складних задач, доповнених цілою низкою додаткових обмежень.

Цільова функція задачі з мінімізації витрат виглядає таким чином:

$$c_m \max_t [(s_t)] + \sum_{t=1}^T [c_a m(s_t) + c_L L(s_t)] + \sum_{j=1}^g D_j \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

де D_j – витрати на оренду обладнання різних типів, які визначаються максимальним числом використовованого щодня обладнання;

c_a – вартість щоденної оренди одиниці транспорту;

c_L – вартість одиниці пройденого шляху;

c_m – вартість оренди одиниці транспорту на весь період T виконання замовлень;

$m(s_t)$ – кількість транспортних засобів на маршруті;

$L(s_t)$ – загальний пробіг усіх транспортних засобів.

$$D_j = T c_j \max_t [d_j(s_t)], \quad (2.2)$$

де $d_j(s_t)$ – кількість обладнання j -го типу, використовуваних у t -ий день;

c_j – денна вартість оренди обладнання j -го типу [30].

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ КОРОТКОСТРОКОВОЇ ОРЕНДИ ОБЛАДНАННЯ

3.1 Математична модель логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання

Для побудови математичної моделі задачі, необхідно визначитись із рівнем структурування системи (рівнем деталізації моделі), тобто зафіксувати рівень, на якому відбувається моделювання, аналіз і дослідження системи. Досліджуючи складні задачі, необхідно, перш за все, виділити певну структуру для подальшого дослідження. Зокрема, такий підхід до складних задач призводить до принципу декомпозиції.

У переважній більшості випадків математичне моделювання прикладних задач будується на основі структурного підходу. Виділяється певна структура, формалізуються об'єкти цієї структури, відносини між об'єктами, а потім досліджується вже математична задача, яка є формальним поданням відповідної структури. Зокрема, за цим принципом побудовані більшість з оптимізаційних моделей. Ці моделі є формальним поданням лише однієї зі структур прикладної задачі, що розглядається. Відповідно, потрібно з обережністю застосовувати і результати оптимізації, отримані на цих моделях. По-перше, будь-яка модель носить наближений характер. Тобто, оптимальний розв'язок, отриманий на основі моделі, є лише наближенням істинного оптимального розв'язку. По-друге, вихідні дані прикладної задачі, як правило, визначені з деякою мірою невизначеності. При дослідженні моделі ця невизначеність знімається. Наприклад, при дослідженні імовірнісних моделей передбачається заданим розподіл вихідних даних. Реальний же розподіл може виявитися зовсім іншим. По-третє, при розв'язку оптимізаційної задачі повинна бути чітко визначена цільова функція (або хоча б клас функцій). В реальних задачах цільова функція може бути

настільки складною, що будь-яка її формалізація буде вельми далека від істини.

Якщо задача описана у якості завдання на фрагментарній структурі, цей опис будемо називати фрагментарною моделлю.

До фрагментарних структур на графах належить, наприклад, множина шляхів в графі, в якій фрагментами є шляхи в графі. Елементарні фрагменти - ребра графа.

Іншим прикладом є модель розкладу робіт. Детально ознайомитись із поняттям фрагментарної структури можна у книзі І. Козіна «Еволюційні моделі в дискретній оптимізації» [14].

На основі наявної математичної моделі, субоптимальний логістичний ланцюг розглянутої задачі будується за таким алгоритмом (рис. 3.1).

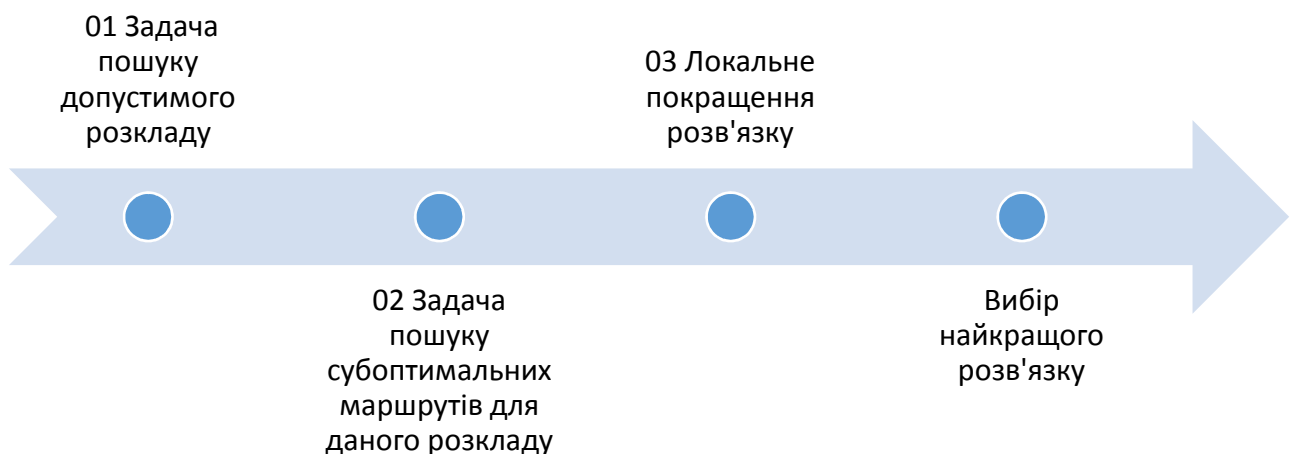


Рисунок 3.1 - Алгоритм пошуку субоптимального логістичного ланцюгу при короткостроковій оренді обладнання

Джерело: побудовано автором.

Першою задачею є розв'язання питання із розробки допустимого розкладу. Розклад у межах цієї роботі означає порядок руху транспортного засобу між клієнтами та складом. Допустимим розкладом вважатимемо той, що забезпечить дотримання обмежень у строках поставок та кількості обладнання.

Другою задачею є розробка оптимального маршруту, тобто такого, що мінімізує загальну пройдену відстань усіма транспортними засобами та їх кількість. Вона відома як множина задача про доставку вантажів, і є схожою із множинною задачею комівояжера, але з обмеженням на вантажопідйомність.

При побудові розв'язку обох задач потрібно дотримуватись встановлених обмежень.

Опишемо математичну модель задачі, та спосіб оптимізації логістичного ланцюгу.

z_i – заява споживача на оренду обладнання;

p_i – споживач;

З кожною заявою z_i пов'язано споживача p_i , що задається своїми координатами, тип приладу, що доставляється та кількість одиниць обладнання.

$[a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, N$ – вікно виконання заяви z_i ;

N – число заяв;

$\forall i a_i \in [1, T], b_i \in [1, T]$.

τ_i – тривалість виконання i -ої заяви;

g - кількість типів обладнання;

$q = (t_1, t_2, \dots, t_N)$, де $t_i \in [a_i, b_i]$ – цілочисельний N -вимірний вектор, що визначає допустимий варіант розкладу.

B_t – множина заяв, що починаються у день з номером $t \in [1, T]$, згідно допустимому розкладу q ;

E_t – множина заяв, які закінчуються у день з номером $t \in [1, T]$, згідно допустимому розкладу q .

Опишемо алгоритм виконання щоденного набору заяв. Впорядкуємо елементи множини $B_t \cup E_t$. Далі складемо маршрут, який забезпечить виконання заяв у заданій послідовності із дотриманням усіх необхідних умов, пов'язаних із вантажопідйомністю транспортного засобу та максимальною відстанню, що він може подолати за добу. Послідовність заяв визначає допустимий маршрут із урахування повернень на склад через

порушення обмежень і необхідну кількість транспортних засобів для виконання усіх заяв за цю добу. Якщо кількість добових заяв є рівною $k_t = |B_t \cup E_t|$, то допустимий маршрут визначається перестановкою S_t з множини перестановок розмірності k_t . При чому кожній перестановці відповідає один єдиний маршрут.

Модель можна представити у вигляді неорієнтованого зваженого графу, вершинами якого є склад та споживачі, що задані своїми координатами (x, y) , зважені ребра – шляхи між ними, вагу яких можна визначити за формулою як відстань евклідового простору, тобто $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$.

Розглянемо гібридний алгоритм пошуку субоптимального розв'язку задачі короткострокової оренди обладнання.

Перший крок: Пошук допустимого розкладу за допомогою еволюційного алгоритму на множині цілочисельних векторів. Для цього будується оціночна функція $Q(t)$, що описує витрати на маршрут, побудований у вигляді зірки зі складом у центральній точці та споживачами на вершинах. При такому маршруті транспортний засіб після виконання кожної заяви повертається на склад перед виконанням наступної. Метою є отримання розкладу, що відповідає строкам розвезення та вилучення обладнання. Якість розкладу визначається за цільовою функцією (3.1), що надана нижче:

$$\sum_{t=1}^T Q(t) + \sum_{j=1}^g D_j \rightarrow \min, \quad (3.1),$$

$$\text{де } Q(t) = c_a \frac{L}{L_0} + \sum_{p_i \in B_t \cup E_t} 2c_L L(p_i),$$

$L = \sum_{p_i \in B_t \cup E_t} L(p_i)$ – загальна відстань пройдена транспортним засобом;

L_0 – максимальна відстань, що може подолати транспортний засіб за добу;

D_j – загальні витрати на оренду обладнання j -го типу при такому способі організації маршруту.

Для пошуку субоптимального розв'язку наведеної задачі пошуку кращого розкладу, використовується еволюційний алгоритм на множині цілочисельних векторів $\{q = (t_1, t_2, \dots, t_N)\}_{t_i \in [a_i, b_i]}$.

Початкова популяція обирається випадковим чином.

У якості оператора кросовера використовується геометричний кросовер, який з двох рішень-батьків утворює нове рішення-нащадка:

$q^1 = (t_1^1, t_2^1, \dots, t_N^1)$ - рішення-батько 1;

$q^2 = (t_1^2, t_2^2, \dots, t_N^2)$ - рішення-батько 2;

$q^3 = (t_1^3, t_2^3, \dots, t_N^3)$ - рішення-нащадок,

де $t_i^3 \in [\min(t_i^1, t_i^2), \max(t_i^1, t_i^2)]$.

Мутація – випадковий вибір однієї з точок $t_i^3 \in [a_i, b_i]$.

Другий крок: пошук субоптимальних маршрутів руху транспортних засобів для розкладу, знайденого на попередньому кроці за допомогою еволюційного алгоритму на фрагментарних структурах із геометричним кросовером у метриці Кендалла.

Кожен допустимий маршрут описується перестановкою. Отже, метою є пошук оптимальної перестановки s_t елементарних фрагментів (заяв) з наступним критерієм:

$$c_a m(s_t) + c_L L(s_t) \rightarrow \min. \quad (3.2)$$

Для розв'язання використовується еволюційно-фрагментарний алгоритм з геометричним кросовером у метриці Кендалла.

Мутація – випадкова транспозиція фрагментів.

Третій крок: Локальне покращення знайденого розв'язку за допомогою випадкової зміни розкладу деяких заяв у рамках дозволеного вікна. А саме, зсув на один день у рамках вікна, у яке потрібно доставити вантаж споживачу. Після цього відбувається перерахування оптимальних щоденних маршрутів. Критерієм оптимальності є головний критерій задачі (2.1).

Четвертый шаг: Выбор наилучшего решения. Под наилучшим решением понимаем оптимальный за критерием головной целевой функции задачи (2.1) [30].

3.2 Обчислювальний експеримент з пошуку субоптимального логістичного ланцюгу

Задачу побудови математичної моделі субоптимального логістичного ланцюгу при короткостроковій оренді обладнання розв'яжемо за допомогою спеціального програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, написаним на VBA, що виконується у Microsoft Access (рис. 3.2).

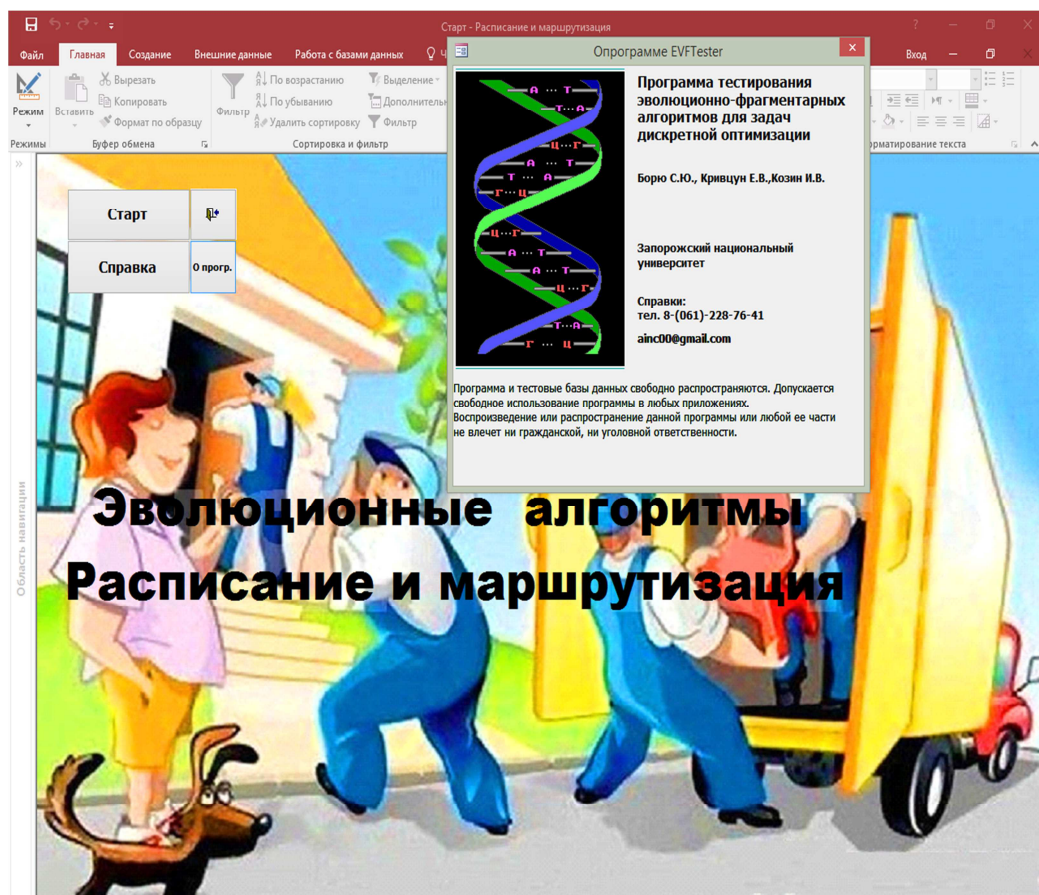


Рис. 3.2 - Головне вікно програми побудови математичної моделі субоптимального логістичного ланцюга.

Джерело: побудовано автором.

Головне вікно управління програмою виглядає наступним чином (рис 3.3).

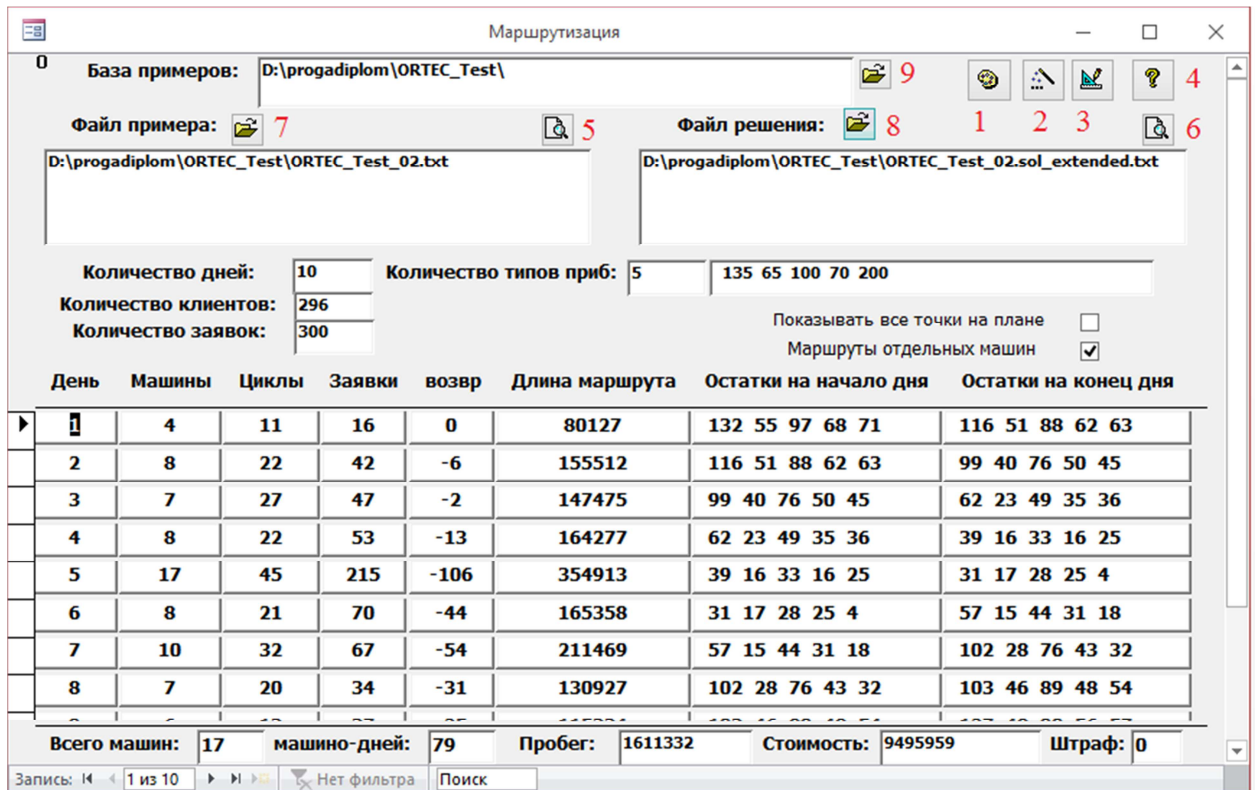


Рисунок 3.3 - Головне вікно управління програмою

Джерело: побудовано автором.

У головному вікні відображається:

- місцезнаходження бази прикладів, файлу із завданням та файлу з розв'язком;

- інформація, отримана із файлу із завданням, а саме: кількість днів, у рамках яких відбувається планування, кількість споживачів, кількість заяв на обладнання, кількість типів обладнання, і кількість одиниць обладнання кожного типу;

- інформація, отримана у результаті розв'язання задачі, а саме, наступні характеристики кожного дня роботи: номер дня, кількість задіяних транспортних засобів у цей день, кількість циклів, заяв, кількість одиниць обладнання, вилученого у споживачів (возвр), довжина пройденого шляху,

залишки обладнання кожного типу на складі станом на початок та кінець доби.

- кількість задіяних транспортних засобів, машиноднів роботи, загальний пройдений шлях, штраф;

- значення головної цільової функції (2.1) (вартість), що було отримано у результаті розв'язання задачі.

Керування програмою відбувається за допомогою відповідних кнопок, які підписано цифрами.

Таблиця 3.1 - Функції кнопок управління програмою

1	Візуалізація маршруту транспортних засобів, що були задіяні при виконанні завдання. Можна створити зображення маршруту всіх транспортних засобів одночасно, або кожного окремо.
2	Старт розрахунку рішення.
3	Налаштування параметрів еволюційного алгоритму.
4	Довідка.
5, 6	Перегляд вмісту вхідного та вихідного файлів.
7, 8, 9	Місцезнаходження вхідного, вихідного файлів та файлу бази прикладів.

Джерело: побудовано автором.

Для налаштування з головного вікна програми доступні такі параметри еволюційного алгоритму (рис. 3.4).

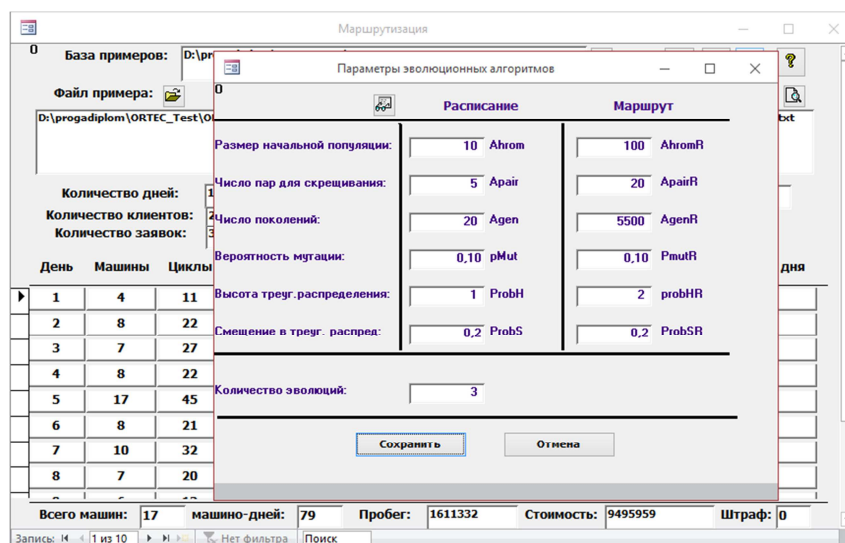


Рисунок 3.4 - Налаштування параметрів еволюційного алгоритму

Джерело: побудовано автором.

Доступні параметри налаштування еволюційного алгоритму для розкладу та маршруту, такі, як:

- розмір початкової популяції;
- кількість пар для схрещування;
- кількість поколінь;
- вірогідність мутації;
- висота трикутника розподілу;
- зміщення у трикутнику розподілу;
- кількість еволюцій.

У вхідному файлі програми містяться наступні параметри:

- DATASET – категорія, до якої відноситься набір даних файлу;
- NAME – ім'я набору даних;
- DAYS – кількість днів, у рамках яких відбувається планування;
- CAPACITY – вантажопідйомність одиниці транспорту;
- MAX_TRIP_DISTANCE – максимальна дистанція, яку може подолати один транспортний засіб за добу;
- DEPOT_COORDINATE – номер відправної точки, що є складом;
- VEHICLE_COST – вартість резерву додаткової одиниці транспорту;
- VEHICLE_DAY_COST – вартість доби користування транспортним засобом;
- DISTANCE_COST – вартість одиниці пробігу транспортного засобу;
- TOOLS – кількість наявних видів обладнання;
- COORDINATES – координати складу та споживачів;
- REQUESTS – запити на обладнання.

Після параметрів TOOLS, COORDINATES та REQUESTS слідує перелік із параметрами обладнання (таблиця 3.2), координатами споживачів (таблиця 3.3) та списком заяв (таблиця 3.4).

Таблиця 3.2 – Характеристики параметру TOOLS із прикладом даних

№ типу обладнання	Вага обладнання	Кількість обладнання, одиниці	Ціна за використання одиниці обладнання
1	2	280	10000
2	14	135	10000

Джерело: побудовано автором.

Таблиця 3.3 - Характеристики параметру COORDINATES із прикладом даних

№ споживача	Координата споживача X	Координата споживача Y
0	5445	2890
1	4275	6176
2	7543	6232

Джерело: побудовано автором.

Таблиця 3.4 - Характеристики параметру REQUESTS із прикладом даних.

№ заяви	№ споживача*	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
0	45	2	3	1	1	2
1	113	3	4	1	2	3
2	61	1	2	3	1	2
3	36	1	4	1	1	8

Джерело: побудовано автором.

*Номер споживача, відповідає його номеру у переліку координат.

На виході генерується файли, що містить наступні дані:

- DATASET – категорія, до якої відноситься набір даних файлу;
- NAME – ім'я набору даних, що відповідає імені у вхідному файлі;
- MAX_NUMBER_OF_VEHICLES – максимальна кількість транспортних засобів, що було задіяно за весь період роботи;
- NUMBER_OF_VEHICLE_DAYS – кількість машиноднів, на які були задіяні транспортні засоби;

- TOOL_USE – кількість одиниць обладнання кожного типу, що було задіяно для задоволення усіх потреб споживачів;
- DISTANCE – загальна пройдена відстань усіма транспортними засобами;
- COST – отримане значення головної цільової функції (2.1);
- DAY – номер доби, для якої перелічуються характеристики NUMBER_OF_VEHICLES, START_DEPOT, FINISH_DEPOT, а також таблиці, зразки яких наведено нижче;
- NUMBER_OF_VEHICLES – кількість транспортних засобів, задіяних в обрану добу;
- START_DEPOT – кількість обладнання на складі у кінці доби за винятком обладнання, що буде вивезене зі складу у наступну добу;
- FINISH_DEPOT – теж саме, що START_DEPOT, але з додаванням обладнання, що ми повернемо на склад у наступну добу.

Інформація для кожного дня (DAY) складається з трьох типів даних, що знаходяться у єдиній таблиці файлу *.txt*. Зміст кожного рядку таблиці визначається за буквою, що знаходиться у другому стовпці (рис. 3.4).

Файл Правка Формат Вид Справка												
DATASET = ORTEC Test Set												
NAME = Instance 02												
MAX_NUMBER_OF_VEHICLES = 22												
NUMBER_OF_VEHICLE_DAYS = 136												
TOOL_USE = 105 58 95 72 85												
DISTANCE = 2368212												
COST = 2369594												
DAY = 1												
NUMBER_OF_VEHICLES = 5												
START_DEPOT = -12 -10 -5 -6 -7												
FINISH_DEPOT = -12 -10 -5 -6 -7												
1	R	0	147	0	252	0	51	0	159	0	25	0
1	V	1	0	0	-4	0	0					
1	V	2	0	0	-1	0	0					
1	D	18668										
2	R	0	64	0	6	0						
2	V	3	0	0	0	0	0					
2	D	15238										

Рисунок 3.4 – Приклад вхідних даних для обчислення

Джерело: побудовано автором.

R – Рядок із маршрутом, що визначається номерами заяв. 0 – повернення на склад.

V – Рядок із даними про повернення на склад для завантаження або вивантаження обладнання того, чи іншого типу. Кількість строк залежить від кількості «0» у строці R і означає кількість повернень на склад. Кількість стовпців відповідає кількості типів обладнання.

D – Рядок із пройденою транспортним засобом відстанню.

Сформуємо дані за типами (R, V, D) у таблицях.

Розглянемо приклад таблиці із даними типу «R», із маршрутом транспортного засобу, представленому у таблиці 3.5. Якщо перед номером заявки стоїть знак «-», це означає, що відбувається завантаження обладнання у транспортний засіб. Якщо не стоїть жодного знаку, це означає вивантаження обладнання з транспорту до клієнта за номером заявки.

Таблиця 3.5 – Маршрут транспортного засобу

№ Транспортного засобу	Тип даних	№ заяв, що виконуються транспортним засобом, у відповідному порядку.					
		0	143	163	0	150	0
3	R	0	143	163	0	150	0
4	R	0	162	0	174	0	

Джерело: побудовано автором.

У таблиці 3.5 вказуються номери транспортних засобів, що виконують заявки у відповідному порядку. Кожній заяві відповідає номер споживача із координатами доставки, що вказані у відповідній таблиці. Кількість нулів відповідає кількості повернень на склад.

Розглянемо приклад з даними типу «V», вказаними у таблиці 3.6, у якій визначається кількість обладнання кожного типу, що вивантажується зі складу (знак «-» перед числом) до транспортного засобу, або завантажується на склад.

Таблиця 3.6 – кількість обладнання кожного типу, що вивантажується зі складу, або завантажується на склад

№ Транспортного засобу	Тип даних	№ повернення на склад	Кількість одиниць обладнання, що вивантажується, або завантажується				
			Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
2	V	1	0	0	0	-4	0
2	V	2	0	-1	-2	0	0
2	V	3	-6	0	0	0	0
2	V	4	0	0	0	0	0
6	V	1	0	0	0	-3	0
6	V	2	0	0	0	0	0

Джерело: побудовано автором.

Розглянемо приклад у таблиці 3.7 із даними типу «D», у якій наводиться відстань, пройдена транспортним засобом за відповідну добу.

Таблиця 3.7 – Пройдена відстань транспортним засобом

№ Транспортного засобу	Тип даних	Пройдена транспортним засобом відстань у відповідну добу
3	D	20770
4	D	17642

Джерело: побудовано автором.

Проведемо обчислювальний експеримент на основі математичної моделі логістичних ланцюгів при короткостроковій оренді обладнання. Ключові дані обчислювального експерименту наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Ключові дані обчислювального експерименту

Горизонт планування, днів	10
Кількість видів обладнання	5
Кількість споживачів	295
Кількість заяв, одиниць	300

Джерело: побудовано автором.

Детальні вхідні дані для експерименту, а саме, координати складу та споживачів, параметри вантажопідйомності транспортних засобів та вартість

одиниці пробігу, параметри обладнання та список заяв містяться у Додатку А. Налаштуємо параметри еволюційного алгоритму. При налаштуванні параметрів еволюційного алгоритму, особливо для великих обсягів даних, зіштовхуєшся із задачею вибору між швидкістю розрахунку, обсягом споживання пам'яті та бажаним результатом. У результаті проведення експериментів, були визначені параметри еволюційного алгоритму, що містяться у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 - Параметри еволюційного алгоритму для розкладу та маршруту.

Параметр	Розклад	Маршрут
Розмір початкової популяції	3000	60000
Кількість пар для схрещування	500	10000
Кількість поколінь	80	5500
Вірогідність мутації, %	10	10
Висота трикутника розподілу	1	2
Зміщення у трикутнику розподілу	0,2	0,2
Кількість еволюцій	5	

Джерело: побудовано автором.

Завантажимо дані у програму для обчислення та почнемо розрахунок (рис. 3.5). Розрахунок можна у будь який момент перервати, це не призведе до збою. Відповіддю у такому випадку стане кращий з маршрутів, що розраховувався. Результатом розрахунків є математична модель субоптимального логістичного ланцюгу, яка містить допустимий розклад, субоптимальний маршрут, визначену кількість транспортних засобів та використаного обладнання, що мінімізує витрати орендодавця та задовольняє потреби споживачів.

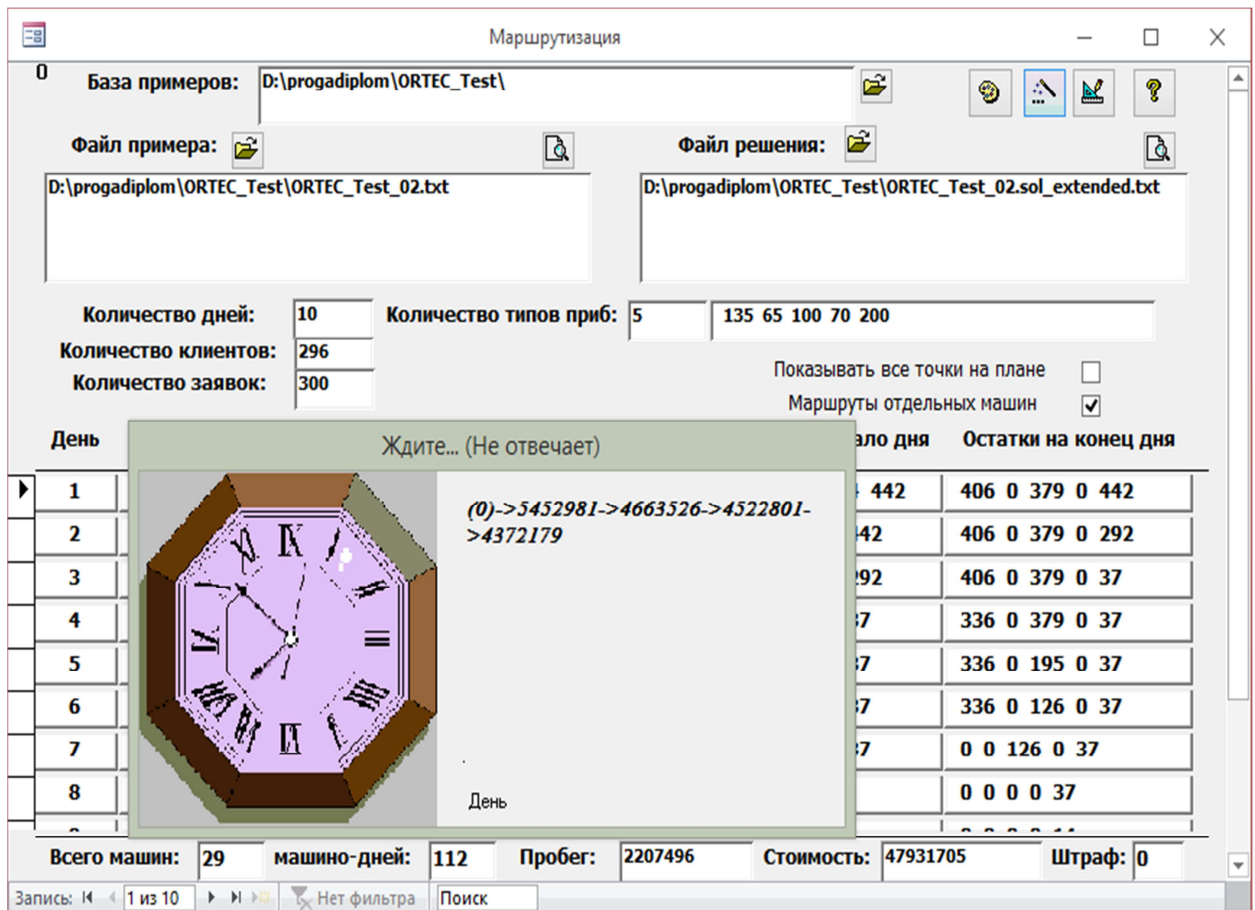


Рис. 3.5: вікно програми під час обчислення

Джерело: побудовано автором.

Результати проведення обчислювального експерименту на основі розробленої математичної моделі логістичних ланцюгів наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 - Результати обчислювального експерименту

Значення головної цільової функції (2.1)	11691444
Пройдена транспортними засобами відстань	2368212
Кількість задіяних транспортних засобів	22
Кількість машиноднів	136

Джерело: побудовано автором.

Наведемо приклад маршруту усіх транспортних засобів у четверту добу за допомогою інструменту візуалізації (рис. 3.6).

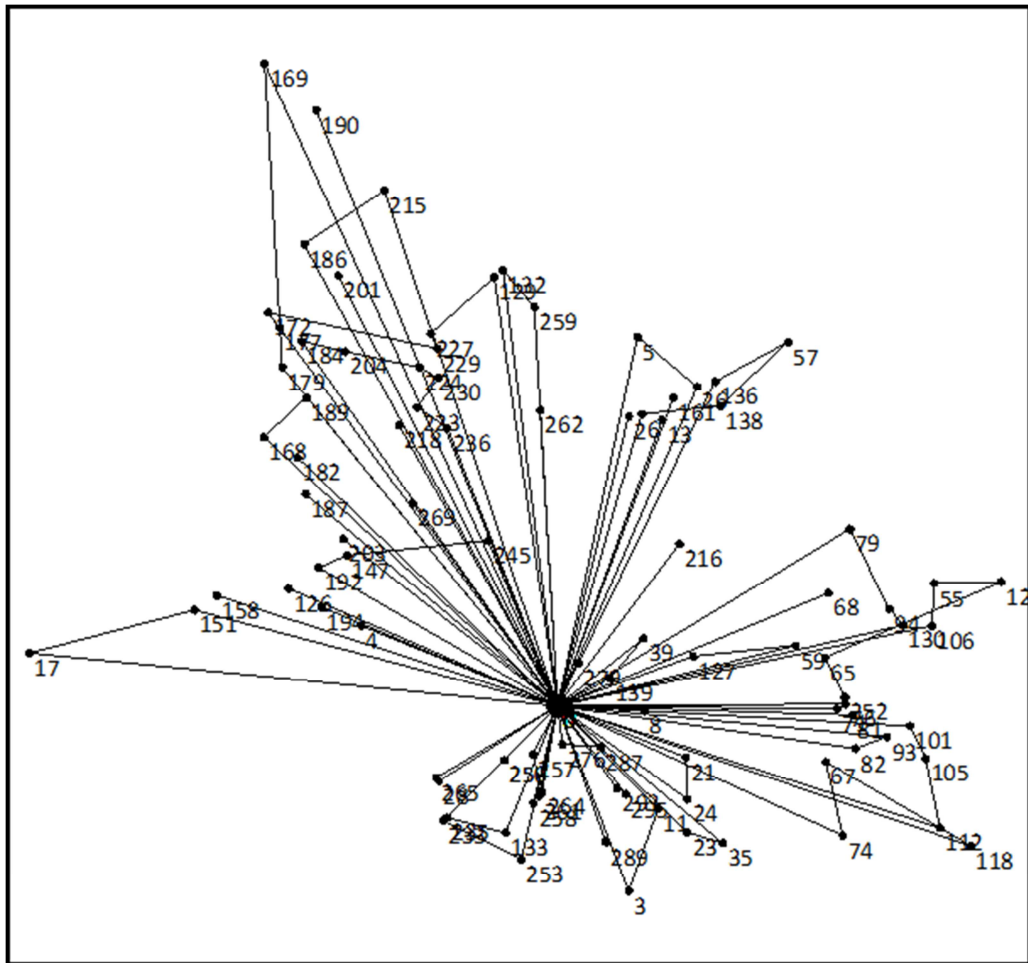


Рисунок 3.6 – візуалізація маршруту руху транспортного засобу у четверту добу

Джерело: побудовано автором.

Для зручності, складемо дані усіх трьох типів (R, V, D) із результатами розрахунку логістичного ланцюгу у зведену таблицю, що наведена у Додатку Б, у якому міститься детальний звіт із маршрутом руху кожного транспортного засобу, порядком виконання заяв, операціями з переміщенням обладнання між споживачами та складом, кількістю використаного обладнання, транспортних засобів, пройденою дистанцією за увесь період планування та отриманим значенням головної цільової функції (2.1).

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто задачу побудови математичної моделі логістичного ланцюга при короткостроковій оренді обладнання. Визначено поняття логістичного ланцюгу. Проаналізовано актуальність теми короткострокової оренди у народному господарстві, сфери використання та задачі, із якими зіштовхуються компанії.

Стисло розглянуто історію та задачі транспортної логістики. Розглянуто існуючі наукові дослідження, що висвітлюють задачі, способи моделювання та оптимізації логістичних ланцюгів, їх переваги та недоліки. Описано основні принципи роботи еволюційних алгоритмів. Визначено етапи моделювання, наведено математичну постановку задачі короткострокової оренди обладнання, побудовано математичну модель.

Виявлено, що для побудови математичної моделі оптимального логістичного ланцюга потрібно розв'язати дві NP-складні задачі. А саме, задачу складання розкладу та множинну задачу про доставку вантажів. Проаналізовано алгоритмічну складність та ефективність алгоритмів, що застосовуються для їх розв'язання. Виявлено, що на даний момент не відкрито точних алгоритмів для побудови математичної моделі оптимального логістичного ланцюга, що забезпечував би мінімізацію витрат для орендодавця та споживача. Під час розв'язання багатьох задач логістики доводиться приймати рішення експертним шляхом, або використовувати евристичні алгоритми, оскільки єдиним відомим шляхом знайти точний розв'язок є повний перебір усіх можливих рішень, що є застосованим лише для невеликої кількості задач малої розмірності. Час, потрібний для розв'язання багатьох задач за допомогою повного перебору експоненційно зростає зі збільшенням обсягу даних для розрахунку. Обрано еволюційний алгоритм на фрагментарних структурах, як спосіб оптимізації логістичного ланцюгу та описано його принцип роботи. Доведено ефективність запропонованого еволюційного алгоритму.

Обрано та описано програмне забезпечення, за допомогою якого, згідно розробленої математичної моделі, проводиться пошук субоптимального логістичного ланцюга. Наведено тестові приклади для перевірки математичної моделі логістичного ланцюга та еволюційного алгоритму. Визначено параметри еволюційного алгоритму для проведення подальшої оптимізації. Проведено обчислювальний експеримент, у процесі якого було побудовано субоптимальну модель логістичного ланцюга при короткостроковій оренді обладнання та наведено її часткову візуалізацію. Результат роботи дозволить орендодавцям мінімізувати витрати завдяки зменшенню кількості необхідних транспортних засобів, одиниць обладнання, та пройденого шляху для задоволення потреб споживачів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Марусева И. В., Котов В. В., Савченко И. Я. Логистика. Краткий курс. Санкт-Петербург : Питер, 2009. 192 с.
2. Communication from the Commission – Freight Transport Logistics Action Plan {SEC(2007) 1320} {SEC(2007) 1321}. URL : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:5_2007DC0607 (дата звернення: 15.11.2019).
3. Topolšek Darja, Čižiūnienė Kristina, Tina Cvahte Ojsteršek Defining transport logistics: A literature review and practitioner opinion based approach. *Transport*. 2018. No 33(5). P. 1199–1203. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2018.6965>.
4. Логистика. *Бизнес-словарь*. URL : http://www.businessvoc.ru/bv/TermWin.asp?theme=&word_id=8384.
5. ELA Certification for Logistics Professionals. Standards 040805. – Brussels : European Certification Body for Logistics, 2004. 15 p. URL : <https://www.czech-logistics.eu/wp-content/uploads/2018/10/ELAstandards.pdf>.
6. Грязнова О. Чем отличается логистика и Управление цепями поставок? (Часть 1). URL : http://olgagryaznova.ru/chem-otlichayetsya-logistika-i-upravleniye-tseruyami-postavok_ (дата звернення: 15.11.2019).
7. Улучшение экономического состояния региона с помощью создания совместного предприятия ООО «МАЗДА СОЛЛЕРС Мануфэкчуринг Рус». URL : <https://www.vl.ru/sollers-dalnij-vostok>
8. Евдокимова М. Посмотрите на сотни новых Mazda, которые не могут покинуть Приморье. URL : <https://motor.ru/news/mazda-stuck-09-11-2020.htm> (дата звернення: 15.11.2020).
9. Вин Майкл Рост Китая ведет к проблемам в будущем. URL : <https://www.nytimes.com/2010/08/28/world/asia/28china.html> (дата звернення: 15.11.2020).

10. Киев подтвердил, что хаб СПГ из США на Украине создавать не будут. URL : <https://eodaily.com/ru/news/2020/09/11/kiev-podtverdil-cto-hab-spg-iz-ssha-na-ukraine-sozdavat-ne-budut> (дата звернення: 15.11.2020).
11. Недостаток хранилищ и отсутствие технологий: что происходит с собранной на земле продукцией. URL : <http://uga.ua/meanings/nedostatok-hranilishh-i-otsutstvie-tehnologij-cto-proishodit-s-sobrannoj-na-zemle-produktsiej/> (дата звернення: 14.11.2020).
12. Шехтер Дэймон, Сандер Гордон Логистика. Искусство управления цепочками поставок / пер. с англ. В. В. Пророкова. Москва, 2008. 167 с.
13. Теорема про відсутність безкоштовних сніданків. URL : <http://www.no-free-lunch.org/> (дата звернення: 14.11.2020).
14. Козин И. В. Эволюционные модели в дискретной оптимизации : монография. Запорожье : Запорожский национальный университет, 2019. 204 с.
15. Лубенцова В. С. Математические модели и методы в логистике : учеб. пособ. / под ред. В. П. Радченко. Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 157 с.
16. Панкратьев Е. В., Чеповский А. М., Черепанов Е. А., Чернышев С. В. Алгоритмы и методы решения задач составления расписаний и других экстремальных задач на графах больших размерностей. *Фундаментальная и прикладная математика*. 2003. Том 9, № 1. С. 235–251.
17. Краснова И. И., Кисель Т. Р. Логистика складирования : учеб.-метод. пособ. Минск : БНТУ, 2016. 80 с.
18. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. Москва : Мир, 1982. 416 с.
19. Люк Ш. Основы метаэвристик / пер. с англ. 2009. URL : <http://qai.narod.ru/GA/metaheuristics.html>.
20. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн. Алгоритмы : построение и анализ. 3-е изд. Москва :

Вильямс, 2013. 1328 с.

21. Скобцов Ю. А., Федоров С. С. Метаэвристики : монография. Донецк : Ноулидж, 2013. 426 с.

22. Parameterized Algorithms and Computational Experiments. URL : <https://paceschallenge.org/> (дата звернення: 14.11.2020).

23. 8th meeting of the Working Group on Vehicle Routing and Logistics Optimization (VeRoLog) within EURO, the Association of European Operational Research Societies. URL : <https://verolog2020.sciencesconf.org/> (дата звернення: 14.11.2019).

24. The ROADEF/EURO Challenge 2020: Maintenance planning problem. URL : <https://www.roadef.org/challenge/2020/en/> (дата звернення: 14.11.2019).

25. U.S. Department of Energy – Grid Optimization Competition. URL : <https://gocompetition.energy.gov/> (дата звернення: 14.11.2019).

26. Список триваючих та завершених конкурсів від Helmut-Schmidt-Universität. URL : <https://www.hsu-hh.de/logistik/research/challenges> (дата звернення: 14.11.2019).

27. Теория вычислений. Введение в конечные автоматы. URL : <https://habr.com/ru/post/358304/> (дата звернення: 14.11.2019).

28. Оценка сложности алгоритмов, или Что такое $O(\log n)$. URL : <https://tproger.ru/articles/computational-complexity-explained/> (дата звернення: 14.11.2019).

29. Гуев Тимур. Знай сложности алгоритмов. URL : <https://habr.com/ru/post/188010/> (дата звернення: 14.11.2019).

30. Козин И. В., Борю С. Ю., Кривцун Е. В. Математическая модель комбинированной задачи транспортной логистики. *Вісник Запорізького національного університету. Економічні науки*. 2018. № 1. С. 44–51.

Закон України «Про освіту» від 05.09.2017 № 2145-VIII

Стаття 42. Академічна доброчесність

1. Академічна доброчесність – це сукупність етичних принципів та визначених законом правил, якими мають керуватися учасники освітнього процесу під час навчання, викладання та провадження наукової (творчої) діяльності з метою забезпечення довіри до результатів навчання та/або наукових (творчих) досягнень.

2. Дотримання академічної доброчесності здобувачами освіти передбачає:

- самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання (для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей);

- посилення на джерела інформації у разі використання ідей, розробок, тверджень, відомостей; - дотримання норм законодавства про авторське право і суміжні права;

- надання достовірної інформації про результати власної навчальної (наукової, творчої) діяльності, використані методики досліджень і джерела інформації.

3. Порухенням академічної доброчесності вважається:

- академічний плагіат - оприлюднення (частково або повністю) наукових (творчих) результатів, отриманих іншими особами, як результатів власного дослідження (творчості) та/або відтворення опублікованих текстів (оприлюднених творів мистецтва) інших авторів без зазначення авторства;

- самоплагіат – оприлюднення (частково або повністю) власних раніше опублікованих наукових результатів як нових наукових результатів;

- фабрикація – вигадання даних чи фактів, що використовуються в освітньому процесі або наукових дослідженнях;

- фальсифікація – свідомо зміна чи модифікація вже наявних даних, що стосуються освітнього процесу чи наукових досліджень;

- списування – виконання письмових робіт із залученням зовнішніх джерел інформації, крім дозволених для використання, зокрема під час оцінювання результатів навчання;

- обман – надання завідомо неправдивої інформації щодо власної освітньої (наукової, творчої) діяльності чи організації освітнього процесу; формами обману є, зокрема, академічний плагіат, самоплагіат, фабрикація, фальсифікація та списування;

- хабарництво – надання (отримання) учасником освітнього процесу чи пропозиція щодо надання (отримання) коштів, майна, послуг, пільг чи будь-яких інших благ матеріального або нематеріального характеру з метою отримання неправомірної переваги в освітньому процесі;

- необ'єктивне оцінювання – свідоме завищення або заниження оцінки результатів навчання здобувачів освіти.

Форма декларації академічної доброчесності

Декларація академічної доброчесності

здобувача вищої освіти ЗНУ

Я _____, студент _____ курсу, форми навчання _____, факультету _____, спеціальності _____, адреса електронної пошти _____, - підтверджую, що написана мною кваліфікаційна робота на тему «_____» відповідає вимогам академічної доброчесності та не містить порушень, що визначені у ст. 42 Закону України «Про освіту», зі змістом яких ознайомлений/ознайомлена;

- заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи є ідентичною її друкованій версії;

- згоден/згодна на перевірку моєї роботи на відповідність критеріям академічної доброчесності у будь-який спосіб, у тому числі за допомогою Інтернет-системи, а також на архівування роботи в базі даних цієї системи.

Дата _____ Підпис _____ ПІБ (студент) _____

Дата _____ Підпис _____ ПІБ (науковий керівник) _____

ДОДАТОК А

Вхідні дані моделі логістичних ланцюгів для розрахунку

ATASET = ORTEC Test Set,

NAME = Instance 02,

DAYS = 10,

CAPACITY = 48,

MAX_TRIP_DISTANCE = 22210,

DEPOT_COORDINATE = 0,

VEHICLE_COST = 1,

VEHICLE_DAY_COST = 10,

DISTANCE_COST = 1.

TOOLS = 5.

Таблиця А.1 – Перелік параметрів обладнання

№ типу обладнання	Вага обладнання	Кількість обладнання, одиниці	Ціна за використання одиниці обладнання
1	8	135	10
2	14	65	100
3	11	100	1000
4	10	70	10000
5	16	200	100000

COORDINATES = 296

Таблиця А.2 – Перелік споживачів та складу з координатами

№ споживача	X	Y	№ споживача	X	Y	№ споживача	X	Y
0	7410	5448	99	5382	8927	198	6381	3206
1	9133	6146	100	8759	8935	199	6083	3209
2	4347	6152	101	7622	8944	200	4029	3226
3	9361	6153	102	5720	8615	201	2846	3271
4	6556	3496	103	6668	9072	202	5176	3319
5	3500	6242	104	6446	9097	203	5640	3323

Продовження таблиці А.2

№ споживача	X	Y	№ споживача	X	Y	№ споживача	X	Y
6	4320	6284	105	7963	9100	204	3656	3339
7	7788	6295	106	6557	9164	205	3599	3357
8	7462	6312	107	7118	9166	206	5579	3391
9	7399	6437	108	8586	9168	207	4093	3395
10	6918	6441	109	9737	8641	208	3971	3403
11	8496	6446	110	8706	9200	209	4478	3537
12	9134	5131	111	6316	9204	210	3034	3538
13	4382	6485	112	8697	9241	211	4222	3568
14	4043	6498	113	7879	9275	212	4788	3639
15	7909	6520	114	8683	9283	213	4768	3680
16	8613	6547	115	6935	9479	214	5987	3689
17	6848	209	116	8602	9527	215	1951	3729
18	8642	6679	117	8442	9528	216	5691	6654
19	8862	6224	118	8885	9550	217	4757	4252
20	7961	6710	119	8563	9572	218	4434	3873
21	7950	6720	120	8948	8728	219	2097	3956
22	6909	6733	121	3790	5249	220	4534	3975
23	8743	6734	122	6090	9847	221	6169	3977
24	8393	6734	123	7127	8862	222	5063	3995
25	8320	6828	124	8468	4778	223	4248	4055
26	4032	6832	125	9400	6061	224	3825	4076
27	7452	6940	126	6160	2782	225	5257	4092
28	8204	4268	127	6882	6792	226	4048	4094
29	9001	6980	128	5069	2796	227	3466	4189
30	8426	6993	129	2864	4820	228	8180	4251
31	7185	7000	130	6552	8875	229	3624	4256
32	4795	7071	131	8770	6891	230	3938	4266
33	8919	7079	132	2788	4905	231	4216	4301
34	6793	7082	133	8748	4931	232	8164	4302
35	8857	7087	134	8125	8967	233	8618	4312
36	8923	7121	135	5805	2980	234	8271	4315
37	3506	7127	136	3977	7010	235	8589	4351
38	3938	7135	137	3419	4125	236	4468	4356
39	6693	6301	138	4234	7061	237	4442	4363
40	7500	7193	139	7119	5967	238	7079	4398
41	7497	7202	140	6648	0	239	7162	4446
42	8016	7231	141	6539	278	240	5021	4552
43	4102	7253	142	6474	421	241	3709	4590
44	4120	7298	143	5264	5362	242	7493	4710
45	3892	7365	144	3324	3241	243	8630	4717
46	9131	7376	145	8778	7271	244	8598	4733
47	3841	7443	146	7218	9346	245	5656	4759
48	9561	7469	147	5811	3356	246	7409	4774
49	8861	7535	148	8124	6183	247	8049	4818
50	6439	7538	149	1564	1805	248	7897	4856
51	8612	7567	150	3993	3409	249	3944	4906

Продовження таблиці А.2

№ споживача	X	Y	№ споживача	X	Y	№ споживача	X	Y
52	3914	7570	151	6392	1844	250	7981	4920
53	8553	7610	152	5463	1959	251	5878	5044
54	2908	2779	153	6416	1968	252	7318	8296
55	6107	9183	154	3634	4243	253	9026	5087
56	5583	7717	155	5166	1982	254	6997	5170
57	3555	7733	156	6185	2057	255	9245	5197
58	3624	4403	157	5497	2058	256	8359	5200
59	6769	7808	158	6237	2063	257	7922	5203
60	8364	7936	159	6270	2083	258	8434	5208
61	7477	7966	160	4557	3454	259	3184	5216
62	8602	7990	161	4145	6597	260	8859	5219
63	7437	8025	162	6095	2140	261	8361	5264
64	6911	8098	163	6339	2191	262	4280	5274
65	6895	8099	164	6138	2209	263	3141	5287
66	8143	8099	165	4842	2284	264	8313	5295
67	7999	8108	166	9166	5499	265	8168	4243
68	6210	8134	167	5426	3505	266	6989	5341
69	7688	8161	168	4565	2532	267	4024	5353
70	6109	8197	169	611	2542	268	7358	5412
71	7444	8221	170	6487	2544	269	5264	4009
72	7755	8233	171	4968	2559	270	8648	5444
73	5329	8490	172	3244	2577	271	5176	5450
74	8776	8277	173	2451	2615	272	4550	5468
75	7501	8298	174	8064	5545	273	7963	5475
76	7390	8301	175	7299	7553	274	3950	5482
77	6469	8308	176	2881	2659	275	8832	5484
78	6710	7605	177	3404	2689	276	7816	5497
79	5533	8347	178	3373	2704	277	4605	4027
80	5467	8372	179	3822	2716	278	4345	5564
81	7505	8376	180	3822	2792	279	6954	5656
82	7859	8405	181	4673	2836	280	9095	5681
83	7578	8420	182	4779	2868	281	6550	8720
84	8423	8459	183	709	2873	282	6970	5758
85	6201	8508	184	3546	2907	283	9343	5784
86	7239	8532	185	5896	2917	284	8155	5790
87	8209	8536	186	2517	2932	285	9122	5797
88	5572	8542	187	5168	2950	286	8508	5831
89	3933	8596	188	5917	2954	287	7841	5876
90	5591	8615	189	4144	2958	288	7528	5919
91	8266	8643	190	1103	3052	289	8842	5925
92	6976	8647	191	4000	5622	290	5834	8110
93	7736	8716	192	5940	3079	291	8944	5991
94	6378	8739	193	4892	3082	292	8939	6032
95	9491	8786	194	6360	3106	293	8284	6038
96	7723	8802	195	6584	3125	294	8560	6123
97	7338	8838	196	4289	3161	295	8343	6126
98	7394	8902	197	2753	3204			

REQUESTS = 300

Таблиця А.3 – Перелік та дані заяв на оренду обладнання

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
0	45	2	3	1	1	2
1	89	1	9	1	2	3
2	145	1	7	3	5	3
3	164	4	7	3	4	3
4	214	1	6	3	4	4
5	13	4	4	1	4	1
6	229	1	2	3	1	3
7	97	2	7	3	5	2
8	174	7	8	1	5	1
9	203	1	8	1	3	3
10	39	1	6	1	2	2
11	106	3	5	3	5	3
12	56	2	9	1	3	3
13	73	3	8	1	2	1
14	1	1	3	1	1	3
15	115	2	9	1	2	1
16	74	1	7	3	5	2
17	128	3	9	1	1	1
18	265	3	5	1	4	1
19	50	6	8	2	5	3
20	140	1	8	2	2	2
21	148	4	9	1	3	2
22	22	6	6	2	5	2
23	194	1	5	1	5	1
24	131	3	6	3	3	1
25	267	1	2	2	5	2
26	81	2	7	3	5	2
27	269	3	4	2	3	3
28	141	1	3	3	3	3
29	234	2	6	3	4	4
30	29	1	7	3	3	2
31	190	1	6	3	4	3
32	130	3	6	2	1	1
33	150	1	8	2	3	4
34	209	2	2	3	3	3

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
35	42	1	4	1	1	2
36	123	1	6	3	2	2
37	44	4	8	2	3	2
38	282	2	7	1	2	1
39	10	2	6	3	5	2
40	173	5	9	1	3	4
41	86	3	9	1	1	3
42	162	1	7	1	3	3
43	270	1	7	3	4	3
44	154	1	8	2	3	1
45	94	1	7	1	1	4
46	191	4	8	2	4	1
47	136	4	5	3	5	1
48	226	3	8	2	1	2
49	5	3	5	2	4	3
50	204	1	2	2	1	2
51	279	1	1	3	5	3
52	238	7	9	1	4	1
53	153	8	8	1	5	1
54	104	5	6	3	1	6
55	76	3	7	3	4	1
56	244	3	9	1	1	6
57	3	1	7	3	4	2
58	224	2	8	2	2	1
59	250	1	7	3	4	1
60	65	2	6	1	1	1
61	2	2	6	1	1	6
62	23	1	1	3	2	1
63	120	1	8	2	4	2
64	26	1	2	3	4	4
65	243	4	7	2	5	1
66	284	7	9	1	4	3
67	47	1	9	1	1	2
68	275	3	6	1	5	3
69	68	4	4	2	3	1
70	90	4	8	2	1	1
71	198	6	7	2	1	5
72	274	6	8	2	4	2

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
73	189	2	3	1	5	2
74	151	4	4	1	2	2
75	80	3	5	3	5	2
76	103	2	2	3	5	1
77	6	1	7	3	1	2
78	249	1	3	3	2	2
79	168	3	6	3	4	1
80	210	4	8	2	1	4
81	183	2	9	1	4	2
82	158	2	7	3	4	3
83	280	4	5	3	5	2
84	102	1	4	1	2	1
85	84	7	8	1	5	3
86	202	6	7	1	3	1
87	149	1	9	1	4	1
88	134	3	7	3	5	1
89	31	2	8	2	5	1
90	139	1	2	3	1	2
91	248	1	8	2	5	2
92	290	2	8	2	3	2
93	187	4	4	3	4	4
94	110	1	1	1	1	6
95	33	4	8	1	4	3
96	231	3	9	1	5	3
97	184	3	4	2	3	1
98	146	1	9	1	4	4
99	156	1	7	3	5	2
100	41	1	4	2	2	3
101	188	1	9	1	5	3
102	152	2	8	2	5	2
103	48	6	6	2	5	3
104	246	1	7	3	3	1
105	222	3	9	1	3	4
106	227	4	9	1	1	1
107	126	1	5	1	2	2
108	207	3	8	2	3	2
109	180	6	8	2	4	2
110	30	5	8	2	3	3

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
111	157	1	2	3	4	2
112	8	1	7	2	5	3
113	88	1	4	1	5	3
114	176	1	9	1	5	2
115	87	4	5	3	2	3
116	15	4	8	2	3	3
117	46	3	6	2	1	2
118	49	4	7	2	5	3
119	181	2	8	2	2	1
120	239	5	7	3	2	3
121	75	3	8	2	1	3
122	235	2	5	1	3	3
123	185	2	4	2	1	4
124	129	1	8	2	1	4
125	242	1	8	2	1	5
126	85	4	8	2	2	2
127	186	2	6	3	4	1
128	54	1	5	1	2	2
129	195	2	7	1	3	4
130	40	2	7	1	3	2
131	77	1	7	1	1	1
132	137	4	7	2	5	2
133	18	4	6	2	5	1
134	69	3	8	2	4	1
135	114	1	9	1	2	1
136	223	1	6	2	2	1
137	276	2	8	2	5	1
138	78	4	7	3	1	1
139	32	2	9	1	2	2
140	101	2	7	3	5	1
141	211	5	7	3	1	6
142	118	3	6	1	1	5
143	155	1	4	3	3	3
144	66	3	5	2	1	5
145	260	5	7	1	5	2
146	62	4	7	3	2	2
147	264	1	5	3	3	4
148	199	1	7	3	4	2

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
149	61	2	6	2	4	1
150	215	1	1	3	2	3
151	165	1	8	2	4	3
152	253	1	5	2	1	6
153	27	1	9	1	3	1
154	196	1	7	3	1	6
155	111	4	6	2	5	3
156	169	4	5	3	3	3
157	182	2	3	2	2	2
158	245	3	7	2	5	1
159	237	1	2	1	4	2
160	70	1	7	3	3	3
161	216	3	4	1	1	6
162	159	1	3	1	5	3
163	228	1	3	1	4	1
164	259	1	5	1	3	4
165	60	2	8	1	5	2
166	266	1	7	3	3	4
167	99	5	7	3	5	2
168	25	7	8	2	4	4
169	135	2	7	3	5	3
170	294	1	8	1	5	2
171	295	4	5	2	5	1
172	52	1	3	3	4	2
173	289	4	6	2	3	3
174	17	1	2	2	1	5
175	221	1	8	2	2	1
176	9	3	8	2	4	1
177	193	5	5	3	3	3
178	83	2	2	3	1	3
179	230	1	7	2	1	2
180	93	1	5	1	4	3
181	119	4	7	1	5	3
182	175	2	6	2	5	1
183	57	2	7	2	5	1
184	79	1	7	3	4	4
185	287	1	8	2	4	2
186	107	4	5	1	3	4

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
187	122	1	6	2	1	4
188	166	2	7	3	2	1
189	278	6	7	3	1	6
190	171	1	7	3	5	3
191	21	1	5	1	1	6
192	172	1	4	3	3	1
193	200	2	7	2	1	6
194	254	1	5	3	5	3
195	28	1	7	2	4	4
196	241	7	7	2	4	2
197	293	4	4	1	2	3
198	291	4	7	2	2	3
199	112	2	3	2	4	2
200	67	1	1	3	5	2
201	109	1	5	3	5	3
202	252	1	7	3	1	1
203	212	2	6	2	3	3
204	43	2	2	3	1	4
205	14	7	9	1	2	1
206	258	1	6	1	5	3
207	143	2	8	2	4	3
208	292	1	6	2	2	3
209	142	5	7	3	2	3
210	82	2	5	3	2	3
211	116	6	9	1	5	2
212	163	3	8	1	4	2
213	236	3	8	2	3	3
214	285	4	9	1	1	6
215	213	3	3	2	5	1
216	271	1	4	1	4	1
217	220	2	8	1	2	2
218	55	1	3	1	4	1
219	91	4	7	3	3	3
220	206	5	5	3	3	1
221	59	1	9	1	1	5
222	53	1	7	2	3	1
223	256	1	6	3	2	2
224	219	6	7	1	3	2

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
225	170	6	7	2	3	1
226	51	1	3	1	3	2
227	178	2	6	2	5	2
228	113	4	7	3	4	2
229	19	2	4	2	4	2
230	138	2	2	2	4	1
231	247	5	8	2	1	5
232	34	4	8	1	2	3
233	95	1	9	1	5	1
234	250	3	5	1	3	4
235	108	4	7	3	2	1
236	133	1	7	2	3	4
237	127	4	5	2	3	2
238	286	2	4	3	5	3
239	251	2	9	1	5	3
240	281	1	4	1	5	2
241	124	5	5	2	3	2
242	121	2	3	3	1	3
243	233	1	6	2	2	3
244	132	1	7	3	5	2
245	100	3	4	2	2	2
246	71	2	8	2	1	3
247	12	1	7	3	2	2
248	35	1	7	1	5	2
249	98	2	7	2	3	3
250	197	3	9	1	2	3
251	277	4	9	1	3	2
252	232	1	7	2	3	1
253	144	5	6	3	5	1
254	72	1	8	2	1	4
255	255	5	5	1	2	1
256	288	5	5	1	1	3
257	167	3	9	1	5	3
258	20	1	6	3	2	1
259	58	5	5	3	5	1
260	23	8	9	1	3	3
261	61	3	6	1	1	2
262	240	1	5	1	5	3

Продовження таблиці А.3

№ заяви	№ споживача	Часовий проміжок доставки (вікно), № доби		Строк оренди, доба	Тип обладнання	Кількість обладнання, одиниці
		Початок	Кінець			
263	24	1	6	3	2	2
264	192	1	7	1	5	1
265	45	1	8	2	1	5
266	105	1	7	3	3	2
267	125	4	7	2	1	6
268	117	1	9	1	5	2
269	283	1	5	3	5	3
270	160	1	7	3	2	1
271	16	1	7	3	2	3
272	257	1	7	2	5	3
273	63	2	3	3	2	1
274	96	1	5	3	1	2
275	38	2	5	2	5	1
276	279	4	6	2	2	3
277	263	5	8	2	4	2
278	161	1	6	3	1	6
279	44	5	5	3	2	2
280	147	1	3	2	1	4
281	179	1	5	2	1	6
282	205	2	7	3	5	3
283	36	1	7	2	3	4
284	268	1	5	3	2	1
285	261	1	8	2	1	6
286	217	1	8	2	1	5
287	177	2	7	2	1	2
288	272	4	8	2	1	2
289	11	2	4	1	5	1
290	4	2	6	2	3	4
291	273	4	7	1	4	3
292	92	6	8	2	3	1
293	218	1	6	1	4	3
294	37	2	7	2	3	4
295	262	2	6	1	3	3
296	225	2	7	3	3	3
297	208	1	8	2	3	1
298	7	3	3	2	3	4
299	64	3	7	2	1	6
300	201	1	2	3	2	3

ДОДАТОК Б

Результат розрахунку – математична модель субоптимального логістичного ланцюгу

DAY = 1, NUMBER_OF_VEHICLES = 5, START_DEPOT = -12 -10 -5 -6 -7, FINISH_DEPOT = -12 -10 -5 -6 -7.

Таблиця Б.1 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у першу добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспорт-ного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
1	1	0	147	0	252	0	51	18668	1	0	0	-4	0	0
									2	0	0	-1	0	0
									3	0	0	0	0	-3
		0	159	0	25	0			4	0	0	0	-2	0
									5	0	0	0	0	-2
									6	0	0	0	0	0
	2	2	0	64	0	6	0	15238	1	0	0	0	-4	0
									2	-3	0	0	0	0
									3	0	0	0	0	0
	3	3	0	300	0	150	0	21558	1	0	-3	0	0	0
									2	0	-3	0	0	0
									3	0	0	0	0	0
	4	4	0	90	0	100	0	17777	1	-2	0	0	0	0
			62	0	200	0			2	0	-3	0	0	0
									3	-1	-1	0	0	0
									4	0	0	0	0	-2
									5	0	0	0	0	0
	5	5	0	94	0			7938	1	-6	0	0	0	0
									2	0	0	0	0	0

DAY = 2, NUMBER_OF_VEHICLES = 12, START_DEPOT = -57 -23 -13 -15 -24,
 FINISH_DEPOT = -50 -23 -13 -13 -24.

Таблиця Б.2 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у другу добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами					
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	
2	1	0	163	0	152	0	14	20454	1	0	0	0	-1	0	
		226	0	35	178	-94	0		2	-6	0	0	0	0	
									3	-3	0	-2	0	0	
									4	-5	0	0	0	0	
									5	6	0	0	0	0	
	2	2	0	201	0	199	135	0	15989	1	0	0	0	0	-3
										2	0	-1	0	-2	0
										3	0	0	0	0	0
	3	3	0	240	-131	84	0	113	15396	1	0	-1	0	0	-2
			0							2	1	0	0	0	-3
										3	0	0	0	0	0
	4	4	0	139	216	0	262	-159	20792	1	0	-2	0	-1	0
			0	136	179	0				2	0	0	0	0	-3
										3	-2	-1	0	2	0
										4	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.2

№ доби	№ Транс-портного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
2	5	0	78	0	124	0		16194	1	0	-2	0	0	0
									2	-4	0	0	0	0
									3	0	0	0	0	0
	6	0	217	0	34	0	50	22070	1	0	-2	0	0	0
		0							2	0	0	-3	0	0
									3	-2	0	0	0	0
									4	0	0	0	0	0
	7	0	281	0	128	0		19484	1	-6	0	0	0	0
									2	0	-2	0	0	0
									3	0	0	0	0	0
	8	0	114	0	157	111	0	19294	1	0	0	0	0	-2
									2	0	-2	0	-2	0
							3		0	0	0	0	0	
9	0	162	0	174	0		17642	1	0	0	0	0	-3	
								2	-5	0	0	0	0	
								3	0	0	0	0	0	
10	0	296	0	280	230	0	15309	1	0	0	-3	0	0	
								2	-4	0	0	-1	0	
								3	0	0	0	0	0	
11	0	204	0	172	76	0	18460	1	-4	0	0	0	0	
								2	0	0	0	-2	-1	
								3	0	0	0	0	0	
12	0	187	0				9184	1	-4	0	0	0	0	
								2	0	0	0	0	0	

DAY = 3, NUMBER_OF_VEHICLES = 12, START_DEPOT = -82 -36 -34 -32 -49,
 FINISH_DEPOT = -77 -26 -32 -31 -37.

Таблиця Б.3 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у третю добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
3	1	0	284	0	194	0	175	20859	1	0	-1	0	0	0
		0	4	0	148	23	0		2	0	0	0	0	-3
		264	123	0					3	0	-1	0	0	0
									4	0	0	0	-4	0
									5	0	0	0	-2	-1
									6	-4	0	0	0	-1
									7	0	0	0	0	0
	2	0	190	0	73	215	-217	21333	1	0	0	0	0	-3
		0	-262	0					2	0	0	0	0	-3
									3	0	2	0	0	0
									4	0	0	0	0	3
	3	0	-216	-25	0	242	0	14027	1	0	0	0	0	0
									2	-3	0	0	1	2
									3	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.3

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами					
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	
3	4	0	164	0	227	-128	0	19049	1	0	0	-4	0	0	
									2	0	0	0	0	-2	
										3	0	2	0	0	0
	5	0	-114	0	143	0		18894	1	0	0	0	0	0	
									2	0	0	-3	0	2	
										3	0	0	0	0	0
	6	0	99	0	28	-162	0	22074	1	0	0	0	0	-2	
		104	0	125	-252	0			2	0	0	-3	0	0	
										3	0	0	-1	0	3
										4	-5	0	0	0	0
										5	0	0	1	0	0
	7	0	29	0	122	0	223	20468	1	0	0	0	-4	0	
		0	43	0	238	0	208		2	0	0	-3	0	0	
		-14	0	269	0				3	0	-2	0	0	0	
										4	0	0	0	-3	0
										5	0	0	0	0	-3
										6	0	-3	0	0	0
										7	3	0	0	0	-3
										8	0	0	0	0	0
	8	0	229	0	271	0	248	17045	1	0	0	0	-2	0	
		-226	222	-35	0	-100	273		2	0	-3	0	0	0	
0							3		0	0	0	0	-2		
									4	2	0	1	0	0	
									5	0	2	0	0	0	

Продовження таблиці Б.3

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
3	9	0	180	0	245	-135	0	19592	1	0	0	0	-3	0
		221	0						2	0	-2	0	0	0
									3	-5	1	0	0	0
									4	0	0	0	0	0
	10	0	160	0	45	218	-240	15116	1	0	0	-3	0	0
		-84	0						2	-4	0	0	-1	0
									3	0	1	0	0	2
	11	0	-113	75	-139	275	0	20754	1	0	0	0	0	0
		265	0	191	0				2	-5	2	0	0	0
									3	-6	0	0	0	0
									4	0	0	0	0	0
	12	0	258	0	298	0	39	9680	1	0	-1	0	0	0
		-163	18	0					2	0	0	-4	0	0
									3	0	0	0	0	-2
									4	0	0	0	0	0

DAY = 4, NUMBER_OF_VEHICLES = 18, START_DEPOT = -105 -43 -66 -62 -58,
 FINISH_DEPOT = -64 -34 -58 -52 -51.

Таблиця Б.4 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у четверту добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
4	1	0	-51	0	-90	10	0	20772	1	0	0	0	0	0
		161	0	5	0	278	0		2	0	-2	0	0	3
									3	-4	0	0	0	0
									4	0	0	0	-1	0
									5	-6	0	0	0	0
									6	0	0	0	0	0
	2	0	49	-64	0	47	183	17978	1	0	0	0	-3	0
		-230	77	0					2	-2	0	0	4	-2
									3	0	0	0	1	0
	3	0	61	0	295	0		12552	1	-6	0	0	0	0
									2	0	0	-3	0	0
									3	0	0	0	0	0
	4	0	213	-136	-179	58	-50	20042	1	0	0	-4	0	0
		97	0	-300	0				2	4	0	0	0	0
									3	0	3	0	0	0
	5	0	127	-150	0			12201	1	0	0	0	-1	0
									2	0	3	0	0	0
	6	0	31	0				13492	1	0	0	0	-3	0
									2	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.4

№ доби	№ Транс-портного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
4	7	0	156	-281	0			15118	1	0	0	-3	0	0
									2	6	0	0	0	0
	8	0	-73	79	0	-157	0	16145	1	0	0	0	-1	0
									2	0	0	0	0	2
									3	0	2	0	0	0
	9	0	93	0	9	0	27	17408	1	0	0	0	-4	0
		0							2	0	0	-3	0	0
									3	0	0	-3	0	0
									4	0	0	0	0	0
	10	0	158	-280	-264	0	107	19440	1	0	0	0	0	-1
		0	82	0					2	4	-2	0	0	1
									3	0	0	0	-3	0
									4	0	0	0	0	0
	11	0	74	-174	0	-23	0	20103	1	0	-2	0	0	0
		290	0						2	5	0	0	0	0
									3	0	0	-4	0	1
									4	0	0	0	0	0
	12	0	287	192	-6	106	-124	21800	1	-2	0	-1	0	0
		0	244	-164	0				2	6	0	0	0	-2
									3	0	0	4	0	0
13	0	293	0	237	-221	0	17526	1	0	0	0	-3	0	
	69	0						2	0	0	-2	0	0	
								3	5	0	-1	0	0	
								4	0	0	0	0	0	

Продовження таблиці Б.4

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
4	14	0	184	-45	32	0	11	18377	1	0	0	0	-4	0
		-218	-187	60	202	55	0		2	3	0	0	0	-3
									3	2	0	0	0	0
	15	0	26	0	210	-180	0	21094	1	0	0	0	0	-2
		140	266	-199	0				2	0	-3	0	0	0
									3	0	0	-2	3	-1
									4	0	0	0	2	0
	16	0	142	-200	16	0	246	20765	1	-5	0	0	0	0
		0	112	0	137	185	0		2	-3	0	0	0	0
		197	0						3	0	0	0	0	-3
									4	0	0	0	-2	-1
									5	0	-3	0	0	0
									6	0	0	0	0	0
	17	0	171	0	173	0	57	21454	1	0	0	0	0	-1
		289	0	263	-191	0	-62		2	0	0	-3	0	0
		-248	0	272	-147	0	285		3	0	0	0	-2	-1
		0							4	0	-2	0	0	0
									5	6	0	0	0	0
									6	0	1	0	0	-1
									7	-6	0	4	0	0
									8	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.4

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
4	18	0	206	0	236	-122	0	15931	1	0	0	0	0	-3
		195	-18	0	243	-152	0		2	0	0	-4	0	0
		59	0	234	0				3	0	0	3	-4	0
									4	0	-3	0	1	0
									5	6	0	0	-1	0
									6	0	0	-4	0	0
									7	0	0	0	0	0

DAY = 5, NUMBER_OF_VEHICLES = 22, START_DEPOT = -98 -58 -95 -62 -83,
FINISH_DEPOT = -62 -41 -77 -54 -72.

Таблиця Б.5 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у п'ять добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
5	1	0	256	-298	0	-197	0	17116	1	-3	0	0	0	0
		170	-289	133	24	0	30		2	0	0	4	0	0
		0	2	0					3	0	3	-1	0	-2
									4	0	0	-2	0	0
									5	0	0	0	0	-3
									6	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.5

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами					
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	
5	2	0	118	-222	0	165	0	16131	1	0	0	0	0	-3	
		144	0						2	0	0	1	0	-2	
									3	-5	0	0	0	0	0
									4	0	0	0	0	0	0
	3	0	115	0	88	235	0	14371	1	0	-3	0	0	0	
									2	0	-1	0	0	-1	
									3	0	0	0	0	0	
	4	0	181	-142	0	-245	63	16603	1	0	0	0	0	-3	
		0							2	5	0	0	-2	0	
									3	0	2	0	0	0	
	5	0	-201	0	274	-178	149	20165	1	0	0	0	0	0	
		0	299	-60	138	0			2	-2	0	0	-1	3	
									3	-3	0	0	0	0	
									4	0	0	0	0	0	
	6	0	182	130	0	153	249	18024	1	0	0	-2	0	-1	
		0	36	0					2	0	0	-4	0	0	
									3	0	-2	0	0	0	
									4	0	0	0	0	0	
	7	0	186	-76	0	54	0	15435	1	0	0	-4	0	0	
									2	-6	0	0	0	1	
									3	0	0	0	0	0	
	8	0	70	13	15	0	146	19396	1	-1	-2	0	0	0	
		-229	0	-208	0				2	0	-2	0	0	0	
									3	0	0	0	2	0	
							4		0	3	0	0	0		

Продовження таблиці Б.5

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
5	9	0	267	0	83	0	68	21426	1	-6	0	0	0	0
		0	145	-206	0	241	-234		2	0	0	0	0	-2
		0	-125	0	120				3	0	0	0	0	-3
									4	0	0	0	0	-2
									5	0	0	-2	0	3
									6	0	0	4	0	0
									7	5	-3	0	0	0
									8	0	1	0	0	0
	10	0	220	-9	0	169	-123	17499	1	0	0	-1	0	0
		0	-107	0					2	0	0	3	0	-3
									3	4	0	0	0	0
									4	0	2	0	0	0
	11	0	3	0	212	-74	0	14482	1	0	0	0	-3	0
									2	0	0	0	-2	0
									3	0	2	0	0	0
	12	0	42	-111	151	0	119	16495	1	0	0	-3	-1	0
		177	0						2	0	-1	-3	0	0
									3	0	0	0	0	0
	13	0	270	0	154	0		14698	1	0	-1	0	0	0
									2	-6	0	0	0	0
									3	0	0	0	0	0
	14	0	108	0	33	0		15758	1	0	0	-2	0	0
									2	0	0	-4	0	0
									3	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.5

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
5	15	0	282	0				8692	1	0	0	0	0	-3
									2	0	0	0	0	0
	16	0	253	-227	87	-215	0	19180	1	0	0	0	-1	-1
		-296	0						2	0	0	0	0	3
									3	0	0	3	0	0
	17	0	-34	0	-293	48	0	14433	1	0	0	0	0	0
									2	-2	0	3	0	0
									3	0	0	0	3	0
	18	0	259	-78	0	-295	0	20583	1	0	0	0	0	-1
		-61	0						2	0	2	0	0	0
									3	0	0	3	0	0
									4	6	0	0	0	0
	19	0	-5	-275	0	294	-265	16555	1	0	0	0	0	0
		0							2	0	0	-4	1	1
									3	5	0	0	0	0
	20	0	-172	0	-204	0		15714	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	0	2	0
									3	4	0	0	0	0
	21	0	279	-106	0	102	0	19081	1	0	-2	0	0	0
									2	1	0	0	0	-2
									3	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.5

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
5	22	0	129	0	247	255	0	16992	1	0	0	-4	0	0
		166	0	276	0	38	-10		2	0	-3	0	0	0
		0	-161	0					3	0	0	-4	0	0
									4	0	-3	0	0	0
									5	0	-1	0	0	0
									6	0	2	0	0	0
									7	6	0	0	0	0

DAY = 6, NUMBER_OF_VEHICLES = 19, START_DEPOT = -97 -56 -91 -72 -85,
FINISH_DEPOT = -86 -40 -49 -48 -53.

Таблиця Б.6 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у шосту добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
6	1	0	-137	-185	0	-256	0	19453	1	0	0	0	0	0
		-112	0	176	-39	22	-237		2	0	0	0	2	1
		89	-153	0	-130	261	-273		3	3	0	0	0	0
		0	-246	41	0				4	0	0	0	-1	2
									5	-2	0	3	0	0
									6	0	1	2	0	0
									7	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.6

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
6	2	0	7	-186	0	98	0	15317	1	0	0	0	0	-2
									2	0	0	4	-4	0
										3	0	0	0	0
	3	0	228	-181	0	219	-165	19063	1	0	0	0	-2	0
		-15	0						2	0	0	-3	0	3
									3	0	1	0	0	2
	4	0	292	-32	126	-160	0	15799	1	0	-2	-1	0	0
		-75	-13	167	-69	0			2	1	0	3	0	0
									3	0	1	1	0	0
	5	0	155	0	291	-272	0	20581	1	0	0	0	0	-3
		-223	0	-285	0	-43	0		2	0	0	0	-3	0
		-238	0	-170	0				3	0	0	0	0	3
									4	0	2	0	0	0
									5	6	0	0	0	0
									6	0	0	0	3	0
									7	0	0	0	0	3
									8	0	0	0	0	2
	6	0	-271	0	110	-258	0	21148	1	0	0	0	0	0
		95	0	283	0	117	0		2	0	3	-3	0	0
									3	0	1	0	-3	0
									4	0	0	-4	0	0
									5	-2	0	0	0	0
									6	0	0	0	0	0

Продовження таблиці Б.6

№ доби	№ Транс-портного засобу		(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку					(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами					
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	
6	7	0	103	-173	0	198	-171	20158	1	0	0	0	0	-3	
		0	-68	0	188	-269	0		2	0	-3	3	0	0	
		-255	-145	0					3	0	0	0	0	0	1
									4	0	-1	0	0	0	3
									5	0	0	0	0	0	3
									6	0	1	0	0	0	2
	8	0	-236	0	65	-243	0	20979	1	0	0	0	0	0	
		-29	0	-195	0	56	0		2	0	0	4	0	-1	
		91	-104	-284	-38	0	-194		3	0	3	0	0	0	
		239	0						4	0	0	0	4	0	
									5	-6	0	0	4	0	
									6	0	0	0	0	-2	
									7	0	2	1	0	0	
									8	0	0	0	0	0	
	9	0	207	-158	0	-27	0	19644	1	0	0	0	-3	0	
		-4	0	-148	0				2	0	0	0	0	1	
									3	0	0	3	0	0	
									4	0	0	0	4	0	
									5	0	0	0	2	0	
	10	0	71	-290	0	-129	203	20028	1	-5	0	0	0	0	
		0	17	-190	0				2	0	0	4	0	0	
									3	-1	0	1	0	0	
									4	0	0	0	0	3	
	11	0	-143	0	-42	0		15376	1	0	0	0	0	0	
									2	0	0	3	0	0	
									3	0	0	3	0	0	

Продовження таблиці Б.6

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
6	12	0	-99	0	209	-28	0	17722	1	0	0	0	0	0
									2	0	-3	0	0	2
									3	0	0	3	0	0
	13	0	-212	0	141	-58	0	15039	1	0	0	0	0	0
									2	-6	0	0	2	0
									3	0	1	0	0	0
	14	0	44	-242	277	0	46	20249	1	0	0	-1	-2	0
		-49	67	-183	0				2	1	0	0	-1	0
									3	0	0	0	3	1
	15	0	1	0	132	0		17788	1	0	-3	0	0	0
									2	0	0	0	0	-2
									3	0	0	0	0	0
	16	0	80	0				9548	1	-4	0	0	0	0
									2	0	0	0	0	0
	17	0	250	-87	0			13893	1	0	-3	0	0	0
									2	0	0	0	1	0
	18	0	224	0	193	-97	-287	20783	1	0	0	-2	0	0
		0							2	-6	0	0	0	0
							3		2	0	1	0	0	
19	0	286	-213	0			6355	1	-5	0	0	0	0	
								2	0	0	3	0	0	

DAY = 7, NUMBER_OF_VEHICLES = 20, START_DEPOT = -99 -42 -69 -52 -69,
FINISH_DEPOT = -62 -30 -47 -17 -50.

Таблиця Б.7 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у сьому добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
7	1	0	-291	0	21	0	116	22074	1	0	0	0	0	0
		-263	-133	0	-57	0	-267		2	0	0	-2	3	0
		214	-95	0	-118	0			3	0	0	-3	0	0
									4	0	2	0	0	1
									5	0	0	0	2	0
									6	0	0	0	3	0
									7	0	0	0	0	3
	2	0	-16	0	-63	233	0	20765	1	0	0	0	0	0
		85	-144	0					2	0	0	0	0	1
									3	0	0	0	2	-3
									4	5	0	0	0	0
	3	0	-210	0	-26	-55	0	20465	1	0	0	0	0	0
		-149	-182	0	232	0			2	0	3	0	0	0
									3	0	0	0	1	2
									4	0	-3	0	1	1
									5	0	0	0	0	0
	4	0	19	0	92	0	12	18264	1	0	0	0	0	-3
		-184	-70	0					2	0	0	-2	0	0
									3	0	0	-3	0	0
									4	1	0	0	4	0

Продовження таблиці Б.7

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
7	5	0	-261	-202	0	-299	0	17301	1	0	0	0	0	0
		-41	0						2	3	0	0	0	0
									3	6	0	0	0	0
									4	3	0	0	0	0
	6	0	-249	0	-98	0		14712	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	3	0	0
									3	0	0	0	4	0
	7	0	-11	0	-140	-266	0	15193	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	0	0	3
									3	0	0	2	0	1
	8	0	211	-59	52	0	231	20550	1	0	0	0	0	-2
		-241	0	-56	0	-276	0		2	-5	0	0	0	0
		-239	0						3	0	0	2	0	0
									4	6	0	0	0	0
									5	0	3	0	0	0
									6	0	0	0	0	3
	9	0	288	0	189	-77	0	19630	1	-2	0	0	0	0
		-278	0						2	-6	0	0	0	0
									3	2	0	0	0	0
									4	6	0	0	0	0
	10	0	-47	37	-67	0	-1	17874	1	0	0	-2	0	0
0							2		2	0	0	0	1	
							3		0	3	0	0	0	
11	0	-294	0	72	196	-244	18507	1	0	0	0	0	0	
	0							2	0	0	4	-4	0	
								3	0	0	0	0	2	

Продовження таблиці Б.7

№ доби	№ Транс-портного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами					
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5									
7	12	0	96	0	251	-48	0	22073	1	0	0	0	0	-3	
		-33	0						2	0	0	-2	0	0	
									3	2	0	0	0	0	0
									4	0	0	4	0	0	0
	13	0	-108	-119	-17	0	-93	21524	1	0	0	0	0	0	
		0	86	0					2	1	1	2	0	0	
									3	0	0	-1	4	0	
									4	0	0	0	0	0	
	14	0	257	0	101	0	225	18535	1	0	0	0	0	-3	
		-82	0						2	0	0	0	0	-3	
									3	0	0	-1	0	0	
									4	0	0	0	3	0	
	15	0	20	-79	-151	0		13224	1	0	-2	0	0	0	
									2	0	0	0	4	0	
	16	0	-102	297	-192	0		12230	1	0	0	-1	0	0	
									2	0	0	1	0	2	
	17	0	40	-127	0	-250	0	21873	1	0	0	-4	0	0	
									2	0	0	0	1	0	
									3	0	3	0	0	0	
	18	0	-224	0				11036	1	0	0	0	0	0	
							2		0	0	2	0	0		
19	0	-31	0				13492	1	0	0	0	0	0		
								2	0	0	0	3	0		
20	0	-156	0				14788	1	0	0	0	0	0		
								2	0	0	3	0	0		

DAY = 8, NUMBER_OF_VEHICLES = 17, START_DEPOT = -69 -31 -51 -29 -52,
 FINISH_DEPOT = -26 -7 -16 -18 -9.

Таблиця Б.8 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у восьму добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
8	1	0	8	-91	0	-120	0	17143	1	0	0	0	0	-1
		-52	0	-71	0	-101	0		2	0	0	0	0	2
									3	0	3	0	0	0
									4	0	0	0	1	0
									5	5	0	0	0	0
									6	0	0	0	0	3
	2	0	-3	53	0	-169	0	18857	1	0	0	0	0	-1
		-220	0						2	0	0	0	3	0
									3	0	0	0	0	3
									4	0	0	1	0	0
	3	0	-257	0	-86	-177	0	19422	1	0	0	0	0	0
		-270	0						2	0	0	0	0	3
									3	0	0	4	0	0
									4	0	1	0	0	0
	4	0	-154	0	-193	0		15828	1	0	0	0	0	0
									2	6	0	0	0	0
									3	6	0	0	0	0
	5	0	109	-282	0	-253	0	18703	1	0	0	0	-2	0
									2	0	0	0	0	3
									3	0	0	0	0	1

Продовження таблиці Б.8

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами					
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5	
8	6	0	-40	0				11422	1	0	0	0	0	0	
									2	0	0	4	0	0	
	7	0	81	-80	0	-203	0	20740	1	0	0	0	-2	0	
									2	4	0	0	0	0	0
									3	0	0	3	0	0	
	8	0	-251	0	-96	0	-44	21486	1	0	0	0	0	0	
		-132	0						2	0	0	2	0	0	
									3	0	0	0	0	3	
									4	0	0	1	0	2	
	9	0	-259	-277	-46	0	205	17373	1	0	0	0	0	0	
		-279	0						2	0	-1	0	3	1	
									3	0	2	0	0	0	
	10	0	-286	0	-207	0	105	18917	1	0	0	0	0	0	
		-65	-247	0					2	5	0	0	0	0	
									3	0	0	-4	3	0	
									4	0	2	0	0	1	
	11	0	-83	0	-214	0	-198	19943	1	0	0	0	0	0	
		0	66	-21	-176	0	-22		2	0	0	0	0	2	
		-89	0	-232	0				3	6	0	0	0	0	
									4	0	3	0	-3	0	
									5	0	0	2	1	0	
							6		0	0	0	0	3		
							7		0	3	0	0	0		

Продовження таблиці Б.8

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
8	12	0	-138	168	-110	0	-24	20214	1	0	0	-4	0	
		-30	0	-283	0	-117	0		2	1	0	3	0	0
									3	0	0	3	0	0
									4	0	0	4	0	0
									5	2	0	0	0	0
	13	0	-103	0	-2	0	-146	16074	1	0	0	0	0	0
		0							2	0	0	0	0	3
									3	0	0	0	0	3
									4	0	2	0	0	0
	14	0	-85	0	-115	0	254	18361	1	0	0	0	0	0
		134	0						2	0	0	0	0	3
									3	-4	3	0	-1	0
									4	0	0	0	0	0
	15	0	121	-88	-235	-233	0	17938	1	-3	0	0	0	0
		-211	-274	0					2	0	1	0	0	2
									3	2	0	0	0	2
	16	0	-36	-292	0	-54	0	21043	1	0	0	0	0	0
		-126	0						2	0	2	1	0	0
									3	6	0	0	0	0
									4	0	2	0	0	0
	17	0	-12	0	-155	0	-166	14518	1	0	0	0	0	0
		0							2	0	0	3	0	0
									3	0	0	0	0	3
									4	0	0	4	0	0

DAY = 9, NUMBER_OF_VEHICLES = 8, START_DEPOT = -26 -7 -19 -18 -11,
 FINISH_DEPOT = -13 0 -3 -7 -2.

Таблиця Б.9 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у дев'яту добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
										Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5
9	1	0	-8	0	-231	0	-66	20495	1	0	0	0	0	0
		-188	0	-116	0	-19	0		2	0	0	0	0	1
		-7	0						3	5	0	0	0	0
									4	0	1	0	3	0
									5	0	0	3	0	0
									6	0	0	0	0	3
									7	0	0	0	0	2
	2	0	-228	0	-219	0		14324	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	0	2	0
									3	0	0	3	0	0
	3	0	268	-92	-37	0	-205	20852	1	0	0	0	0	-2
		-72	0						2	0	0	4	0	0
									3	0	1	0	2	0
	4	0	-196	0	-141	0	-105	20520	1	0	0	0	0	0
		0							2	0	0	0	2	0
									3	6	0	0	0	0
									4	0	0	4	0	0
	5	0	-225	-53	0	-209	0	17472	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	1	0	1
									3	0	3	0	0	0

Продовження таблиці Б.9

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
9	6	0	-20	-297	0			13831	1	0	0	0	0	0
									2	0	2	1	0	0
	7	0	-81	-288	0			14673	1	0	0	0	0	0
									2	2	0	0	2	0
	8	0	-167	0	260	0		11756	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	-3	0	2
							3		0	0	0	0	0	

DAY = 10, NUMBER_OF_VEHICLES = 3, START_DEPOT = -13 0 -3 -7 -2, FINISH_DEPOT = 0 0 0 0 0.

Таблиця Б.10 – Логістичний ланцюг короткострокової оренди обладнання у десяту добу

№ доби	№ Транспортного засобу	(R) № заяв, що обслуговує транспортний засіб у відповідному порядку						(D) Пробіг транспортного засобу	№ Повернення на склад	(V) Кількість завантаженого (-), або вивантаженого обладнання, за типами				
		Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4	Тип 5								
10	1	0	-189	0	-109	0	-168	18368	1	0	0	0	0	0
									2	6	0	0	0	0
									3	0	0	0	2	0
									4	0	0	0	4	0
	2	0	-134	-121	0	-254	0	19837	1	0	0	0	0	0
									2	3	0	0	1	0
									3	4	0	0	0	0
									4	0	0	0	0	2
	3	0	-260	0				3704	1	0	0	0	0	0
									2	0	0	3	0	0