

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт

Комп'ютерні науки

СТУДЕНТСЬКА НАУКОВА РОБОТА

На тему: *«Розробка та дослідження математичного забезпечення задач розвезення та обробки вантажів»*

Шифр: *«Математика вантажів»*

АНОТАЦІЯ

Наукова робота містить: 30 сторінок, 7 малюнків, 24 джерел.

Мета роботи – підвищення ефективності процесів розвезення та обробки вантажів за рахунок створення математичного та програмного забезпечення.

Об'єкт дослідження – процес перевезення та обробки вантажів.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи, алгоритми та програмне забезпечення розв'язання задач розвезення та обробки вантажів.

Результати роботи – математична модель задачі розвезення та обробки вантажів, програмна реалізація пошуку рішення задачі розвезення та обробки вантажів.

Область застосування – логістичні системи, мультимодальні перевезення, залізничні перевезення.

ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУ, МАТЕМАТИЧНЕ
МОДЕЛЮВАННЯ, КОМБІНАТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ, ВАНТАЖНІ
ПЕРЕВЕЗЕННЯ, ЗАЛІЗНИЧНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

ЗМІСТ

Вступ	4
Розділ 1 Теоретичні відомості про задачі розвезення та обробки вантажів..	5
1.1 Проблема маршрутизації транспорту у задачах розвезення та обробки вантажу.....	6
1.2 Методи вирішення задачі розвезення та обробки вантажів	10
1.3 Постановка задачі.....	11
Розділ 2 Математична модель задачі розвезення та обробки вантажу	16
2.1 Математичне моделювання задач побудови розкладів потягів на перевантажувальній станції	16
2.2 Опис математичної моделі задачі розвезення та обробки вантажу	20
2.3 Метод пошуку променем.....	23
Розділ 3 Розробка програмного забезпечення для рішення задачі розвезення та обробки вантажів	24
3.1 Особливості програмного забезпечення для пошуку рішень задачі розвезення та обробки вантажів	24
3.2 Вибір мови програмування для реалізації програмного забезпечення для пошуку рішень задачі розвезення та обробки вантажів.....	25
3.3 Інтерфейс програмного засобу	26
Висновок	30
Перелік джерел посилання.....	31

ВСТУП

В сучасному світі теорія та методи логістики мають особливо важливу роль в організації вантажоперевезень. Транспортування продукції є однією з основних функціональних областей логістики. В залежності від характеру та особливостей системи «виробник-споживач» вирішуються різноманітні задачі планування та організації перевезень.

Серед задач транспортної логістики особливе місце посідають задачі оперативного планування та управління вантажними перевозками, економіко-математичними моделями яких є транспортна задача та маршрутизація.

Дана робота присвячена розгляду класу задач розвезення та обробки вантажів, який об'єднує в собі кілька базових задач оптимізації. Обробка полягає в процедурах зберігання, перевантаження, упаковки, розміщення вантажу. Така задача конкретизується для планування роботи перевантажувального двору, а саме процесу перевантаження контейнерів між потягами, які одночасно знаходяться на перевантажувальному майданчику.

Мета роботи – підвищення ефективності процесів розвезення та обробки вантажів за рахунок створення математичного та програмного забезпечення.

Об'єкт дослідження – процес перевезення та обробки вантажів.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи, алгоритми та програмне забезпечення розв'язання задач розвезення та обробки вантажів.

Дослідження даної предметної області є актуальним для розвитку та процесів автоматизації роботи перевантажувального майданчика. Математична модель обраної задачі має на меті оптимізувати процедуру перевантаження деяких контейнерів, що є необхідним для ефективного використання ресурсів та часу.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАДАЧІ РОЗВЕЗЕННЯ ТА ОБРОБКИ ВАНТАЖІВ

Протягом останніх десятиліть зростає використання програмних засобів, які мають на меті оптимізацію процесів. Вони засновані на методах дослідження операцій і математичного програмування та призначені для ефективного управління доставкою товарів і наданням послуг. Велика кількість реальних програмних засобів широко показала, що використання комп'ютеризованих процедур для планування процесів дає значну економію (як правило, від 5% до 20%) [1] у світових транспортних витратах. Можна зазначити, що вплив цих заощаджень на глобальну економічну систему є значним. Дійсно, процес транспортування охоплює всі стадії виробничих і розподільчих систем і являє собою відповідний компонент (як правило, від 10% до 20%) [1] кінцевої вартості товарів.

Успіх використання методів дослідження операцій зумовлений розвитком комп'ютерних систем, як з точки зору апаратного забезпечення, так і програмного забезпечення, а також із збільшенням інтеграції інформаційних систем у виробничі та комерційні процеси. Іншим фактором успіху, настільки ж важливим, як і інші, є розробка моделюючих і алгоритмічних інструментів, впроваджених в останні роки. Дійсно, запропоновані моделі враховують всі характеристики проблем розподілу, що виникають в існуючих програмних додатках, а відповідні алгоритми і комп'ютерні реалізації знаходять хороші рішення для реальних випадків в межах прийнятого обчислювального часу.

На сьогодні у світі існує велика кількість оптимізаційних задач [2], які мають застосування у всіх сферах людського життя. Для спрощення пошуку рішень в таких задачах та для повноти представлення предметної області, до якої вони мають відношення, схожі задачі прийнято об'єднувати в класи.

Досліджуючи область перевезення та обробки вантажів, необхідно визначити до якого вже існуючого класу задач можна віднести проблему, яка дослужується в роботі. У сфері транспортної логістики вагоме місце посідає клас задач розвезення та обробки вантажу. Цей клас задач об'єднує в собі кілька базових задач оптимізації, відомих у всьому світі. Обробка полягає в процедурах зберігання, перевантаження, упаковки, розміщення вантажу. До класу задач розвезення та обробки вантажу відносяться: задача маршрутизації транспорту, задача упаковки, задача про рюкзак.

Задача маршрутизації транспорту [1] присвячена створенню оптимальних маршрутів для різних видів перевезення та використовується при вирішенні задач розвезення. Проблема обробки вантажу може бути пов'язана з вирішенням наступних задач:

- задача упаковки має на меті або упаковку окремого контейнеру якомога щільніше, або упаковку якоїсь кількості об'єктів в якомога меншу кількість контейнерів.
- мета задачі про рюкзак полягає в укладанні якомога більшої кількості цінних речей в деякий контейнер з обмеженим об'ємом.

1.1 Проблема маршрутизації транспорту у задачах розвезення та обробки вантажу

Визначаючи наявну задачу розвезення та обробки вантажів, слід розглянути клас оптимізаційних задач, представлений задачею маршрутизації транспорту. Частіше за все ці задачі розглядаються для автомобільних розвезень, але вони можуть бути використані для оптимізації процесу перевезення вантажів різними видами транспорту (автомобільний, залізничний і т.д.)

Задачі маршрутизації транспорту (Vehicle Routing Problem, VRP) [1] – *NP*-складні [2] задачі комбінаторної оптимізації, в яких для парку

транспортних засобів, що знаходяться в одних чи декількох депо, має бути визначений перелік маршрутів до кількох віддалених точок-споживачів.

Задачі маршрутизації транспорту є деяким перетином двох добре відомих та досліджених задач:

1) Задача комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) - загальна задача комівояжера визначається як пошук найвигіднішого маршруту, що проходить через визначені міста хоча б один раз [3].

2) Задача про упаковку рюкзака (Bin Packing Problem, BPP) - задача про упаковку рюкзака має мету скомбінувати між собою найбільшу кількість важливих (цінних) речей для розміщення в рюкзаку, за умови, що рюкзак має обмежену припустиму масу.

Для задачі маршрутизації транспорту є характерним те, що перевезення вантажів здійснюється з використанням парку транспортних засобів, склад і розміри яких можуть бути фіксованими або можуть бути визначені відповідно до вимог замовників. Типовими характеристиками транспортних засобів є [1]:

- домашнє депо транспортного засобу, а також можливість закінчення експлуатації в депо, крім домашнього;
- потужність (ємність) транспортного засобу, виражена як максимальна вага, або об'єм, або кількість палет, які транспортний засіб може навантажувати;
- можливий поділ транспортного засобу на типи, кожен з яких характеризується ємністю та типами товарів, які може перевозити;
- пристрої, доступні для вантажно-розвантажувальних робіт;
- підмножина дуг дорожнього графа, що може бути пройдена транспортним засобом;
- витрати, пов'язані з використанням транспортного засобу (за одиницю відстані, за одиницю часу, за маршрут і т.д.)

Для проблем маршрутизації транспортних засобів можуть бути розглянуті різні цілі. Типовими завданнями є [1]:

- мінімізація глобальних транспортних витрат, що залежать від глобальної пройденої відстані (або від глобального часу подорожі) і від фіксованих витрат, пов'язаних з використаними транспортних засобів (і з відповідними витратами на водіїв);
- мінімізація кількості транспортних засобів (або водіїв), необхідних для обслуговування всіх клієнтів;
- балансування маршрутів, часу проїзду та навантаження на транспортний засіб;
- мінімізація штрафів, пов'язаних з частковим (неповним) обслуговуванням клієнтів;

Класичну задачу маршрутизацію транспортних засобів розширюють до інших її видів шляхом додавання додаткових обмежень. Різні обмеження породжують різні види задачі маршрутизації транспорту, деякі з них наведені нижче [4].

1. Маршрутизація з обмеженням по вантажопідйомності (Capacitated VRP): Обмеження – об'єм вантажів на кожному маршруті не повинен перевищувати заданої величини (однакової для всіх транспортних засобів). Мета – мінімізувати парк машин, необхідних для виконання завдання, а також загальний час виконання задачі.

2. Маршрутизація з обмеженням на час (VRP with time windows) [5]: обмеження – для кожного клієнту v_i існує відомий проміжок часу, визначений як інтервал $[e_i, l_i]$ - запланований горизонт. Мета – мінімізувати кількість машин, загальний час шляху та очікування.

3. Маршрутизація з декількома депо (Multiple Depot VRP): в кожному депо розміщується парк транспорту. Кожна машина від'їжджає з свого депо, обслуговує споживачів, прикріплених до даного депо, після чого повертається назад. Обмеження – кожен маршрут повинен починатися та завершатися в одному і тому ж депо. Мета – мінімізувати парк транспорту та загальний час шляху.

4. Маршрутизація з негайним поверненням товарів (VRP with pick-ups and deliveries) [6, 7]: деяка кількість товарів повертається назад від користувачів в депо та відбувається обмін товарами між споживачами. Обмеження – кількість товару в маршруті «депо – споживачі» і «споживачі – депо» не повинно перевищувати місткість транспортного засобу в жодній точці маршруту. Мета – мінімізувати парк транспорту та загальний час руху.

5. Маршрутизація з поверненням товарів після повної доставки (VRP with backhauls): повернення товарів відбувається тільки після того, як завершиться доставка. Кількість товарів, які необхідно доставити та прийняти, фіксована та відома завчасно. Обмеження – об'єм товарів при доставці та при поверненні не повинен перебільшувати вантажопідйомність транспортного засобу.

Проблеми маршрутизації з обмеженням по вантажопідйомності, маршрутизації з обмеженням на час, маршрутизації з негайним поверненням товарів та маршрутизації поверненням товарів після повної доставки детально розглянуті в [1].

Окрім задач розвезення (маршрутизації), важливою є проблема обробки вантажу, яка зазвичай розглядається в поєднанні з задачами маршрутизації. На сьогодні є актуальними контейнерні перевезення, які мають високу економічну обґрунтованість. Контейнерні перевезення [8] дозволяють значно спростити процеси розвантаження та завантаження транспортних засобів та зробити їх автоматизованим. Такий вид вантажу зручно використовувати в інтермодальних перевезеннях [9], тобто у випадку, коли є неможливим використовувати один вид транспортних засобів, або один транспортний засіб впродовж всього шляху перевезення. В процесі інтермодальних перевезень виникає задача перевантаження контейнерів між різними транспортними засобами одного виду (потяг-потяг), або між транспортними засобами різних видів (потяг-автомобіль, автомобіль-корабель). З метою спрощення процедур обробки вантажу будуються перевантажувальні майданчики, метою яких є забезпечення процедури перенесення контейнерів та їх зберігання (у випадку,

коли транспорт на який має бути завантажений контейнер ще не готовий). Зберігання вантажів є небажаним, адже в такому випадку зменшується економічна ефективність перевезення. Всі наведені вище умови роблять актуальною задачу оптимізації процедур обробки вантажів, з метою зменшення вартості їх транспортування та підвищення ефективності роботи перевантажувальних майданчиків.

1.2 Методи вирішення задачі розвезення та обробки вантажів

Оптимізаційні задачі, які відносяться до класу NP - складних, мають на меті знайти мінімум або максимум заданої функції (оптимізаційна функція, функція мети) на деякій допустимій множині. Для вирішення NP - складних оптимізаційних задач існує багато методів, більшість з яких досить відомі та ефективні. Кожен метод має окремі переваги та недоліки перед іншими. Перш за все, треба визначити, що дані методи можна розділити на наступні категорії [3]: точні алгоритми, евристичні алгоритми, пошукові алгоритми. Найбільш популярні методи вирішення NP - складних оптимізаційних задач розглянуті нижче.

Точні алгоритми [10, 11]. *Метод гілок і меж* [12-14] є розвитком алгоритму повного перебору. Його суть полягає в додаванні перевірки критерію обмежуючої функції, за яким на певному рівні можна призупинити побудову даної гілки дерева перестановок. Він зберігає всі позитивні властивості алгоритму повного перебору, але тим не менше мало придатний для задач, де N не є достатньо малим. Недоліком є значний час пошуку рішення та необхідність великих обчислювальних потужностей.

Евристичні алгоритми [15 - 18]. Ідея *методу включення дальнього* полягає в наступному: міста, максимально віддалені один від одного, ніколи не будуть суміжними в ланцюзі. Ці два міста і будуть базовими для подальшого вирішення. Потім знову знаходиться вершина, максимально віддалена від вершин, вже укладених в ланцюг. Знаходиться мінімальна сума довжин ребер

між знайденої вершиною і парою суміжних вершин в ланцюзі, що задає місце в ланцюзі для знайденої вершини. Даний алгоритм має лінійну складність, дає приблизне рішення задачі і не може бути розпаралелений.

Пошукові алгоритми. *Ant Colony System* є розвитком алгоритму «Система мурах» (Ant System). Його головні відмінності: у функції вибору нового міста явно заданий баланс між використанням накопичених знань і дослідженням нових можливих рішень; при глобальному відновленні феромону (по завершенні кожної ітерації) його додавання відбувається тільки до дуг, що належить глобальному найкоротшому шляху; поки мурахи шукають рішення, відбувається локальне оновлення феромону (аналогія зі справжніми мурахами, які відкладають феромон в процесі свого руху).

1.3 Постановка задачі

Інтермодальні перевезення [19, 20], а також маршрутизація поїздів і планування їх розкладу [19, 20] є важливими напрямками досліджень в даний час. Зокрема, останнім часом багато уваги приділяється проблемі обробки контейнерів у залізничних перевантажувальних дворах. Одним з основних питань, що стосуються обробки контейнерів на залізничних перевантажувальних майданчиках, є проблема планування обробки вантажних поїздів у залізничних перевантажувальних майданчиках.

В роботах [19, 20] розглядається проблема призначення поїздів до залізничних колій в кожному слоті обслуговування. Це може бути важливим завданням, оскільки загальна вартість операцій завантаження-розвантаження в реальних системах може залежати від відстані між потягом-джерелом і цільовим поїздом. Якщо цільовий поїзд і джерело обслуговуються в одному і тому ж часовому інтервалі, представляється доцільним розмістити їх на найближчих залізничних коліях. Якщо поїзди обслуговуються в різних часових інтервалах, важливо також розмістити обидва поїзди таким чином, щоб переміщення порталного крана [21] були якомога коротші. У цьому випадку

кран повинен спочатку переміщати контейнери з вихідного поїзда до місця зберігання, а потім з місця зберігання до цільового поїзда [22]. Таким чином, обидва поїзди повинні бути якомога ближче до місця зберігання. Виходячи з того, що переміщення перевантажувального крану є ресурсозатратним процесом, вартість обробки вантажу оцінюється відстанню, який робить кран під час перевантаження контейнеру.

Кожен поїзд, що зупиняється на перевантажувальному дворі, несе в собі певну кількість контейнерів, що залежить від кількості вагонів і коефіцієнта навантаження. Деяка підгрупа цих контейнерів вже присвячена кінцевому пункту призначення поїзда і, таким чином, залишається недоторканою. Інша частина повинна бути вивантажена на перевантажувальному дворі, щоб або бути укладеною на інших поїздах, або залишити залізничну систему вантажівкою. Після цього вільні залізничні вагони можуть бути заповнені іншими контейнерами, які доставляються зі смуг зберігання системи сортування або безпосередньо іншим вантажним поїздом. Таким чином, при вирішенні питання про призначення поїзда на слот, необхідно забезпечити, щоб всі контейнери, що будуть завантажуватися на цей потяг, вже були доставлені потягами, призначеними для того ж самого або попереднього слота. Якщо це неможливо, існують дві загальні альтернативи для вирішення такої ситуації.

1) Потяги, які не отримали всі контейнери, призначені для них, повинні вийти з перевантажувального двору, почекати, коли вся треки зайняті, доки всі відповідні поїзди не будуть оброблені, і повернутися до двору в наступному слоті. Очевидно, що повторний візит затримує завершення транспортування і повинен скорочуватися до мінімуму. Якщо повторний візит неминучий, то обробляти потяг необхідно після того, як всі інші поїзди побували у дворі хоча б один раз. Такий підхід гарантує, що всі контейнери, призначені для поїзда з повторним візитом, прибули і не потрібно більше одного візиту щоб завантажити потяг.

2) Всі поїзди, що виїжджають з двору після їх першого відвідування, відправляються до наступного пункту призначення. Це означає, що можуть

залишитися деякі контейнери, які не завантажуються на ті поїзди, для яких призначалися. Ці контейнери залишаються на перевантажувальному майданчику і призначаються на наступний поїзд, який прямує до необхідного пункту призначення (зазвичай наступного дня). Зрозуміло, що така затримка контейнерів небажана, оскільки вони можуть прибути пізно до клієнтів і займають місце в зоні зберігання. Крім того, необхідно забезпечити, щоб наступний поїзд мав достатньо вільних вагонів. Однак цей підхід дає змогу всім поїздам вийти з двору вчасно. Таким чином, затримка контейнерів до наступного дня здається розумною, коли тривалість перебування поїздів обмежена.

Задача розвезення та обробки вантажів, яка розглядається в даній роботі, є продовженням досліджень, представлених в [19, 20].

Розглядається наступна проблема. Для обробки вантажів (перевантаження, зберігання) на залізниці використовуються так звані перевантажувальні двори (transshipment yard). Перевантажувальний двір, зазвичай складається з кількох паралельних залізничних колій (tracks), на яких обробляють «пакети» вантажних потягів. Для перевантаження контейнерів між потягами використовуються вантажопідйомні крани (gantry cranes), які теж рухаються по залізничним коліям. Також на перевантажувальному майданчику є буферна зона, де може зберігатися вантаж (контейнери), якщо потяг, для якого він був призначений, ще не прибув. Візуальне представлення перевантажувального двору наведено на рис. 1.1.

В якості вантажу передбачаються контейнери, тобто товар (вантаж) вже завантажений та запакований в деякий стандартний контейнер, що значить відсутність операцій над самим товаром. Контейнерні перевезення вважаються одним з найбільш недорогих і перспективних видів послуг логістики. Контейнерні перевезення - найсучасніший і поширений спосіб доставки вантажів між країнами. Особливо актуальним такий вид вантажу є для мультимодальних перевезень. Алгоритм функціонування перевантажувального двору представлений на рисунку 1.2.

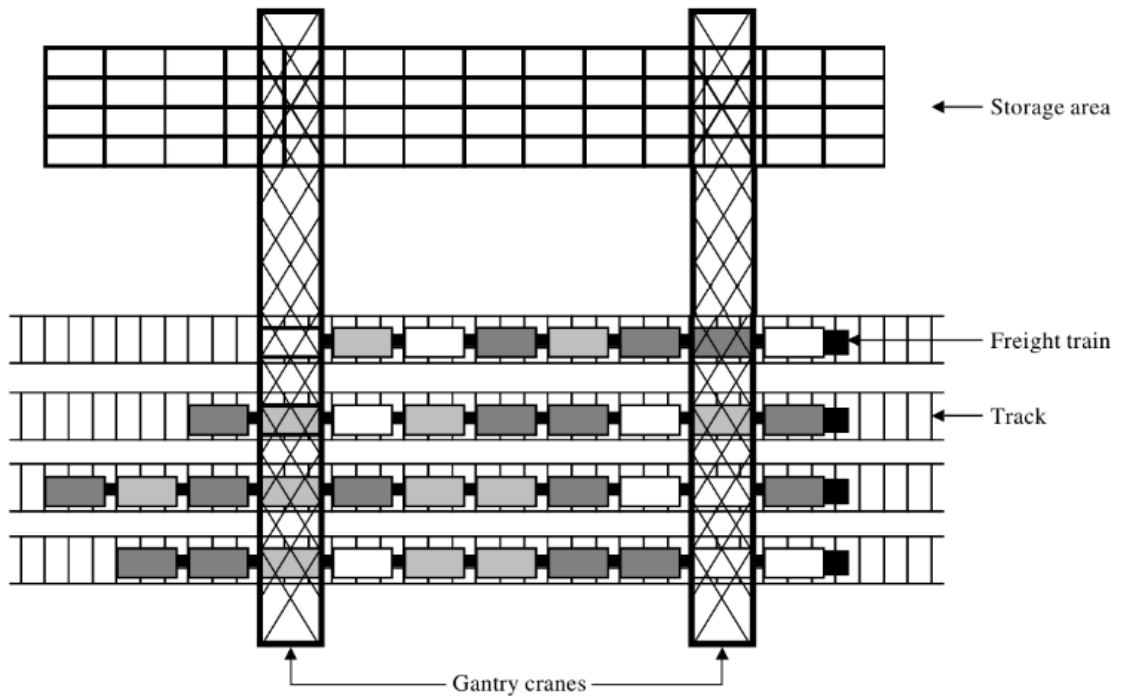


Рисунок 1.1 – Схематичний вигляд перевантажувального двору

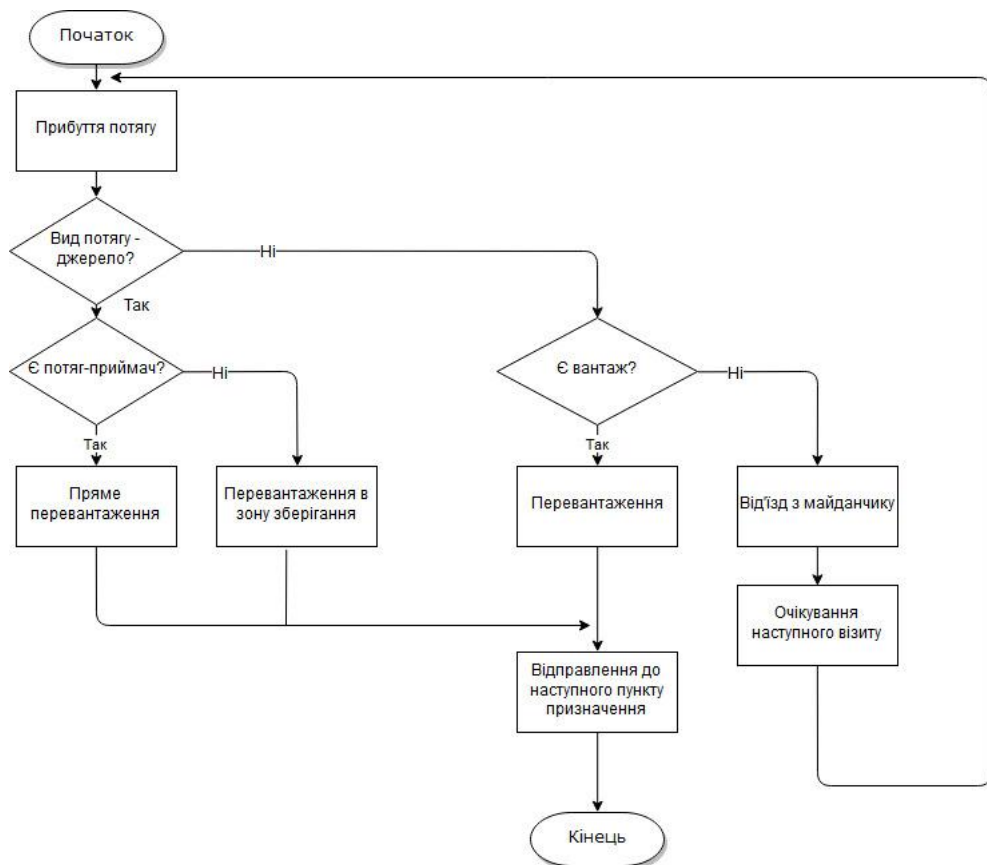


Рисунок 1.2 – Алгоритм роботи перевантажувального двору

Роботи [19, 20] присвячені вирішенню проблеми формування розкладу обробки потягів, а саме визначенню номерів потягів, які потраплятимуть в один слот з метою мінімізації витрат на їх обробку. Під час вирішення такої задачі можна виділити ще одну проблему, яка не була розглянута в вище наведених роботах. Під час процесу перевантаження можна розглядати необхідність оптимізувати переміщення саме контейнерів з потягу на потяг та визначення найбільш вигідних позицій для розташування вантажу на потязі-приймачі.

В даній роботі, більш детально розглядається формування розкладу (послідовності) перевантаження контейнерів безпосередньо з потягу на потяг, що не було враховано в попередніх дослідженнях. При формуванні розкладу обробки потягів (формування слотів, перевантаження на складський майданчик, мінімізація повторної обробки потягів) в даній роботі додатково визначаються оптимальні позиції заздалегідь визначених контейнерів з потягу-джерела на відомих місцях в потязі-приймачі, за умови розміщення потягу-джерела та потягу-приймача в один слот.

Фактично, в роботі розглядається задача складання розкладу перевантаження контейнерів безпосередньо з потягу на потяг як наступний рівень деталізації задач побудови розкладу обробки потягів [19, 20].

Задача перевантаження контейнерів безпосередньо між потягами (Immediate containers transshipment between trains problem, ІСТТР).

Два потяги (потяг-джерело та потяг-приймач) знаходяться на паралельних коліях в перевантажувальному дворі, відомі номери контейнерів, які необхідно перенести з потяга-джерела, номери порожніх вагонів (платформ) на потязі-приймачі та вартість переміщення перевантажувального крану на одиницю відстані. Необхідно скласти розклад переміщення контейнерів з потягу на потяг, якому відповідає мінімальна сумарна вартість переміщень перевантажувального крану.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ РОЗВЕЗЕННЯ ТА ОБРОБКИ ВАНТАЖУ

2.1 Математичне моделювання задач побудови розкладів потягів на перевантажувальній станції

Загальна задача планування роботи перевантажувального майданчика, яка була наведена у розділі 1, є досить складною, щоб працювати над одночасним її вирішенням, тому дозволяється ієрархічна декомпозиція загальної проблеми на декілька рівнів [19]:

1) Складання розкладу потягів з призначенням їх на «пакети» - визначення порядку прибуття потягів та розбиття їх на групи, обробка в яких відбувається одночасно.

2) Визначення позиції контейнерів у потягах – оптимальне розміщення контейнерів для зменшення затрат на їх перевантаження.

3) Визначення зон дії кранів – крани при роботі не повинні перетинатися, тому виникає задача визначення зон, на яких вони можуть безперешкодно працювати.

4) Визначення вертикальних та горизонтальних позицій потягів – для оптимального перевантаження контейнерів необхідно не тільки визначити «пакети» потягів для одночасного опрацювання, а і визначити їх позиції на коліях (треках).

5) Визначення послідовності переміщення контейнерів на кран – розрахунок оптимальної послідовності проходження краном потягу при перевантаженні контейнерів.

Математична модель [20] є подальшим розширенням запропонованої моделі в [19], оскільки описує більш детальну проблему: проблему призначення

кожного поїзда на залізничну колію. Наведена в [20] модель описує проблему, використовуючи комбінаторні структури замість булевих змінних.

В роботі [20] розглядається проблема призначення поїздів на залізничні колії в кожному слоті (пакеті) обслуговування. Якщо цільовий поїзд і джерело обслуговуються в одному і тому ж часовому інтервалі, є доцільним їх розміщення на найближчих залізничних коліях. Якщо поїзди обслуговуються в різних часових інтервалах, важливо також розмістити обидва поїзди таким чином, щоб переміщення вантажопідйомного крана були якомога коротше.

Існує G треків та заданий набір I поїздів, де кожен поїзд має заздалегідь визначене число вагонів і певний коефіцієнт навантаження, що визначається кількістю контейнерів, що перевозяться цим поїздом. Кожен потяг потім призначається до сервісного слота $t = 1, \dots, T$ від G поїздів, які одночасно обслуговуються. Це призначення обмежується найранішим доступним слотом e_i поїзда i (найбільш раннім часом прибуття) і найпізнішим доступним слотом l_i (найбільш пізнім часом відправлення). Перевантажувальний двір зазвичай обслуговує окремі пакети поїздів (також відомі як сервісні слоти). Це означає, що G поїздів (по одному на колію) одночасно обслуговуються і спільно виходять з системи після того, як були виконані всі перевезення контейнерів, необхідні для цього пакету поїздів. Потім в двір надходить інший пакет G поїздів [19]. Кожна ітерація є сервісним слотом. Таким чином, виникають особливі ситуації, які розглядаються в [19]:

- розвантажені потяги повинні знову потрапити на перевантажувальний двір для завантаження товарів, які були доставлені після першого візиту поїзда;

- розподілена обробка, коли поїзд i , який несе контейнер, призначений для поїзда j , подається для обслуговування в слот t , перед слотом t' , в якому обслуговується поїзд j .

Основним рішенням проблеми планування перевантажувального двору є призначення кожного поїзда i із заданого набору поїздів I до сервісного слоту $t = 1, \dots, T$ [19]. На додаток до [19], робота [20] вирішує проблему присвоєння

кожного поїзда на один з треків у кожному слоті. Не більше, ніж G поїздів можна призначати на кожен слот t , оскільки G - це кількість паралельних залізничних колій перевантажувального двору [19].

В роботі [20] пропонується описати кожний часовий інтервал (слот) t , використовуючи кортеж K^t , що містить кількість всіх поїздів, призначених для слота t ; в задачі призначення кожного поїзда певному залізничному шляху, їх порядок важливий, тому $K^t = (k_1^t, k_2^t, \dots, k_g^t, \dots, k_G^t)$. Тут $k_g^t \in I$ позначає кількість поїздів, віднесених до часового інтервалу t та розташованих на залізничній колії $g \in G$.

Варто зауважити, що при формуванні часового інтервалу обираються G -поїзди з $|I|$ можливих, тобто обираються K^t з набору розміщень $P_{|I|}^G$ (розміщення $|I|$ елементів, які обираються одночасно G). Отже, вибір оптимального часового інтервалу K^t можна розглядати як комбінаторну задачу оптимізації вибору оптимального розміщення з множини $K^t \in P_{|I|}^G$. Таким чином, знайдені змінні є часовими інтервалами $K^t, t = 1, 2, \dots, T$, які були сформовані поїздами.

Результат прийняття рішення повинен бути оптимальним по трьом пунктам:

- 1) мінімальна кількість повторних візитів потягів;
- 2) мінімальна вартість витрат на роздільні переміщення контейнерів (що залежить від призначення поїздів на залізничні колії);
- 3) Мінімальна вартість витрат на переміщення контейнерів між поїздами одночасно (що також залежить від призначення поїздів на залізничні колії).

Завдання №1 є тим же, що й у [19]; мета № 2 - більш загальний випадок для того, що описано в [19], де розглядається лише кількість розділених ходів; мета № 3 є новою порівняно з [19], оскільки враховується призначення поїздів на залізничні колії.

Для вирішення цієї проблеми пропонується наступна оптимізаційна функція цілі та обмеження:

$$\alpha_1 \sum_{i \in I} y_i + \alpha_2 \sum_{t=1}^T \sum_{t'=t+1}^T \sum_{p=1}^G \sum_{q=1}^G z_{tt'} A_{k_p^t k_q^{t'}} C_{pq}^* + \alpha_3 \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^G \sum_{q=1}^G A_{k_p^t k_q^{t'}} C_{pq} \rightarrow \min \quad (2.1)$$

$$z_{tt'} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t < t', \\ 0, & \text{якщо } t = t' \end{cases}$$

$$k_g^t \in I \quad \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad \forall g = 1, 2, \dots, G, \quad (2.2)$$

$$e_{k_g^t} \leq t \leq l_{k_g^t} \quad \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad \forall g = 1, 2, \dots, G \quad (2.3)$$

$$k_p^t, k_q^{t'} : t \leq t' + y_{k_q^{t'}} \cdot M, \quad (2.4)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \quad (2.5)$$

де $I = \{1, 2, \dots, N\}$ це множина потягів (індекси i та j); T це номер слоту для розвантаження (завантаження) потягів (індекс t); G це номер паралельних колій (треків) на перевантажувальному майданчику (індекс g); $A = [A_{ij}]$, $i, j = 1, 2, \dots, N$ це номер контейнера з потягу i , який призначений потягу j ; e_i це найбільш ранній слот (час) в який може бути призначений потяг i ; l_i це найбільш пізній слот (час) в який може бути призначений потяг i ; M це велике число (наприклад $M = T - 1$); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - задані вагові коефіцієнти для функцій ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \geq 0$); y_i позначає бінарну змінну: 1, якщо потяг i потребує повторного візиту до перевантажувального двору, 0 в протилежному випадку; $K^t = (k_1^t, k_2^t, \dots, k_G^t) \in P_{|I|}^G$ ($P_{|I|}^G$ розміщення $|I|$ елементів, одночасно розташованих на G треках) – слот t , сформований призначенням G потягів на колії; C_{pq}

визначає вартість перевантаження контейнеру з потягу-джерела на треку p на потяг-приймач на треку q , якщо потяги були призначені в один слот; C_{pq}^* визначає вартість перевантаження контейнеру з потягу-джерела на треку p на потяг-приймач на треку q , якщо потяги були призначені в різні слоти.

2.2 Опис математичної моделі задачі розвезення та обробки вантажу

Розглядається задача оптимізації переміщення вантажу у вигляді контейнерів, між двома потягами: потягом-джерелом та потягом-приймачем – в той час, коли вони одночасно знаходяться на паралельних треках на перевантажувальному майданчику. До задачі, яка розглядатиметься не входить процес роботи з буферною зоною перевантажувального майданчика. Метою такої оптимізації є мінімізація вартості обробки вантажів, тобто вартості перенесення контейнерів з одного потяга на інший. Вважається, що вартість перевантаження залежить від відстані, пройденої вантажопідйомним краном між контейнером на потязі-джерелі, який треба перемістити та порожнім вагоном на потязі-приймачі.

Для математичного опису задачі введемо наступні позначення:

- i - номер трека, на якому знаходиться потяг-джерело;
- j - номер трека, на якому знаходиться потяг-приймач;
- k - номер вагону, на якому розташований контейнер, призначений для перевантаження;
- l - номер порожнього вагону на потязі-приймачі;
- n - кількість контейнерів, призначених для перевантаження;
- $m, m \geq n$ - кількість порожніх місць на потязі-приймачі;
- $\{b_{ik_1}, b_{ik_2}, \dots, b_{ik_n}\}$ - координати контейнерів на i -му треку, які необхідно перевантажити на j -й трек;

- $\{b_{jl_1}, b_{jl_2}, \dots, b_{jl_m}\}$ - координати порожніх місць під контейнери на j -й треку;
- $x \in R^n$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - варіанти розміщень контейнерів з треку i на порожніх місцях потягу з треку j .

Для кращого візуального сприйняття описаної задачі, пропонується розглянути рис. 2.1. На рисунку наводиться ймовірна ситуація при перевантаженні контейнерів. Штрихованою лінією позначено контейнери (для потяга-джерела – ті контейнери, які необхідно перенести, для потяга-приймача – вже зайняті місця), білим виділені порожні вагони (платформи під контейнери).

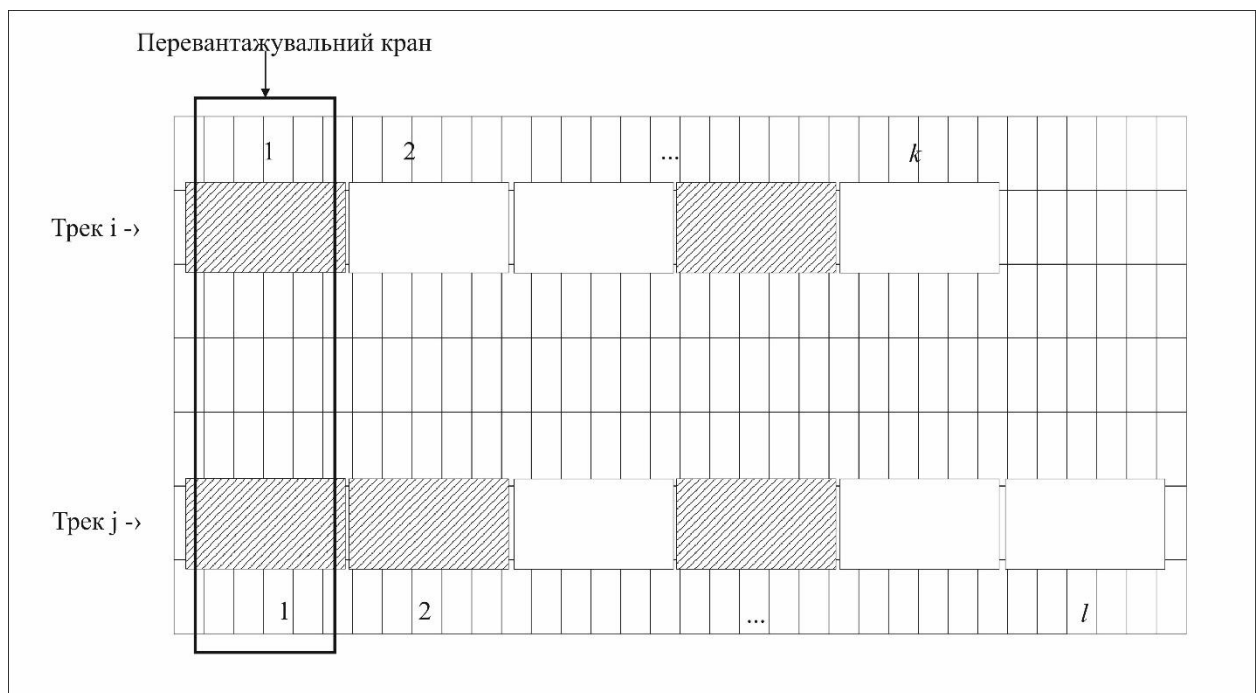


Рисунок 2.1 – Візуальне представлення планування перевантажувального майданчика

Для продовження роботи над моделлю необхідно визначитися з способом знаходження варіантів розміщень контейнерів на порожніх місцях. Оскільки в роботі є необхідним призначити одному контейнеру одне місце на потязі-приймачі, за умови, що вартість перевантаження збільшуватиметься при

збільшенні відстані між контейнером та вакантним місцем, то маємо задачу знаходження деякої впорядкованої множини вакантних місці. Розташування контейнерів на цій множині повинно мати мінімальну можливу вартість.

Для цього пропонується використати поняття розміщення з розділу комбінаторики. В комбінаториці поняття розміщення описується наступним чином: упорядкована вибірка n елементів із множини m елементів ($n \leq m$) називається розміщенням із m елементів по n . Розміщення позначається символом A_m^n , кількість розміщених знаходиться за формулою $A_m^n = \frac{m!}{(m-n)!}$.

Тобто, варіанти розміщень контейнерів з треку i на порожніх місцях потягу з треку j обираються з $A_m^n = \frac{m!}{(m-n)!}$ варіантів розміщень із m елементів $\{b_{jl_1}, b_{jl_2}, \dots, b_{jl_m}\}$ по n (де n - кількість контейнерів, призначених для перевантаження; m - кількість порожніх місць на потязі-приймачі).

Для оцінки вартості перевантаження контейнерів на вакантні місця, враховуючи особливості роботи вантажопідйомних кранів, пропонується використовувати відстані, визначені на основі манхетенської метрики: $\rho(b_{ik}, b_{jl}) = \alpha_1 |b_{ik}^x - b_{jl}^x| + \alpha_2 |b_{ik}^y - b_{jl}^y|$, де α_1, α_2 - вагові коефіцієнти, які враховують нерівноцінність переміщення каретки перевантажувального крану (x - координата) та переміщення самого перевантажувального крану по коліям (y - координата).

На основі усього вищевказаного визначається цільова функція для поставленої задачі:

$$F(x) = \sum_{k=1}^n \rho(b_{ik}, x_k) \rightarrow \min_{x \in A_m^n} \quad (2.6)$$

Сенсом даної цільової функції є зменшення вартості перевантаження контейнерів з потяга-джерела на потяг-приймач при опрацюванні вантажу на перевантажувальному майданчику потяг-потяг.

2.3 Метод пошуку променем

Для знаходження оптимального рішення поставленої задачі з визначеною математичною моделлю, пропонується обрати евристичний метод оптимізації, а саме – пошук променем (beam search) [23]. Серед методів, які найчастіше використовуються для пошуку оптимальних рішень, пошук променем має досить нескладну реалізацію та не вимагає великих об'ємів пам'яті. Запропонований алгоритм пошуку досліджує деякий граф, побудований на множині можливих рішень та розширює лише найперспективніші вузли такого графу. Кількість найперспективніших вузлів є обмеженою, та задається при побудові графу.

Метод працює наступним чином: будується дерево рішень на множині допустимих розв'язків, на кожному рівні графа генеруються всі нащадки вузлів поточного рівня, після чого з таких нащадків обирається деяка кількість найбільш перспективних, інші «відсікаються». Обрані нащадки розширюються, та процедура вибору найперспективніших вузлів повторюється. Нащадки генеруються, доки не буде розглянута вся допустима множина розв'язків. Таким чином реалізується пошук по дереву в ширину [24].

Метод променевого пошуку дозволяє зберігати в пам'яті лише окремі розв'язки, а не будувати повне дерево рішень, що значно зменшує час роботи та вимоги до використання пам'яті обчислювальної техніки. Недоліком такого методу оптимізації, як і інших евристичних методів є можлива втрата правильного рішення, яке може знаходитися на відсіченому промені.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗВЕЗЕННЯ ТА ОБРОБКИ ВАНТАЖІВ

Наступним етапом, після формування математичної моделі поставленої задачі, є створення програмного засобу, тобто програмна реалізація пошуку рішення задачі розвезення та обробки вантажів за допомогою однієї з мов програмування.

Для автоматизації пошуку рішень задачі розвезення та обробки вантажів передбачається розробка програмного засобу, який повинен шукати рішення на основі розглянутого раніше методу пошуку променем.

3.1 Особливості програмного забезпечення для пошуку рішень задачі розвезення та обробки вантажів

Запропонований для реалізації програмний засіб використовує вже відомі методи, але є змістовно новим та не має аналогів, адже пошук оптимального рішення відбувається за допомогою визначеної, під час проведення даного дослідження, математичної моделі.

Такий програмний засіб може використовуватися, як в комплексі, з програмними засобами, які вирішують, наприклад, проблему призначення потягів до слотів, так і працювати окремо. Наведена реалізація розв'язку задачі розвезення та обробки вантажів призначена спростити та оптимізувати роботу перевантажувального двору на стадії обробки вантажу у вигляді стандартизованих контейнерів та зробити ефективними процеси автоматизації подібних областей, що є актуальним за необхідності правильного розподілення та використання ресурсів.

Програмне забезпечення дозволяє вдосконалити організацію роботи перевантажувального двору з метою максимального використання

можливостей його техніки. Необхідність в розробці ПЗ обумовлюється наступним:

- забезпечити оптимальну працю технічних засобів, так як без належного програмного забезпечення ресурси можуть використовуватися не ефективно, а час виконання операції може бути невиправдано великим;
- забезпечити оптимізацію процесів автоматизації перевантаження контейнерів між потягами на перевантажувальному дворі;
- скоротити цикл від постановки завдання до отримання результату його рішення;
- підвищити ефективність використання ресурсів технічних засобів.

3.2 Вибір мови програмування для реалізації програмного забезпечення для пошуку рішень задачі розвезення та обробки вантажів

Для реалізації програмного засобу обрано сучасну досить популярну мову програмування «Java».

Величезна перевага Java полягає в тому, що на цій мові можна створювати додатки, які здатні працювати на різних платформах. Додатки Java, призначені для роботи на різних платформах і не залежать від конкретного типу апаратного і програмного забезпечення.

Автономні програми, написані на Java, нажаль, мають деякі недоліки. Так як вони не містять машинного коду і працюють під управлінням спеціального інтерпретатора, їх продуктивність

Мова Java є об'єктно-орієнтованою і поставляється з досить об'ємною бібліотекою класів. Так само як і бібліотеки класів систем розробки додатків на мові C ++, бібліотеки класів Java значно спрощують розробку додатків, представляючи в розпорядження розробника потужні засоби вирішення поширених завдань, це дозволяє більше уваги приділити вирішенню прикладних задач.

3.3 Інтерфейс програмного засобу

Програмний засіб, який проектується та реалізується у роботі має на меті вирішення математичної задачі, тому інтерфейс програмного забезпечення повинен бути простим та зручним у використанні. Керуючись такими характеристиками був створений віконний додаток, за допомогою мови програмування Java. На рисунку 3.1 наведена форма реалізованого додатку.

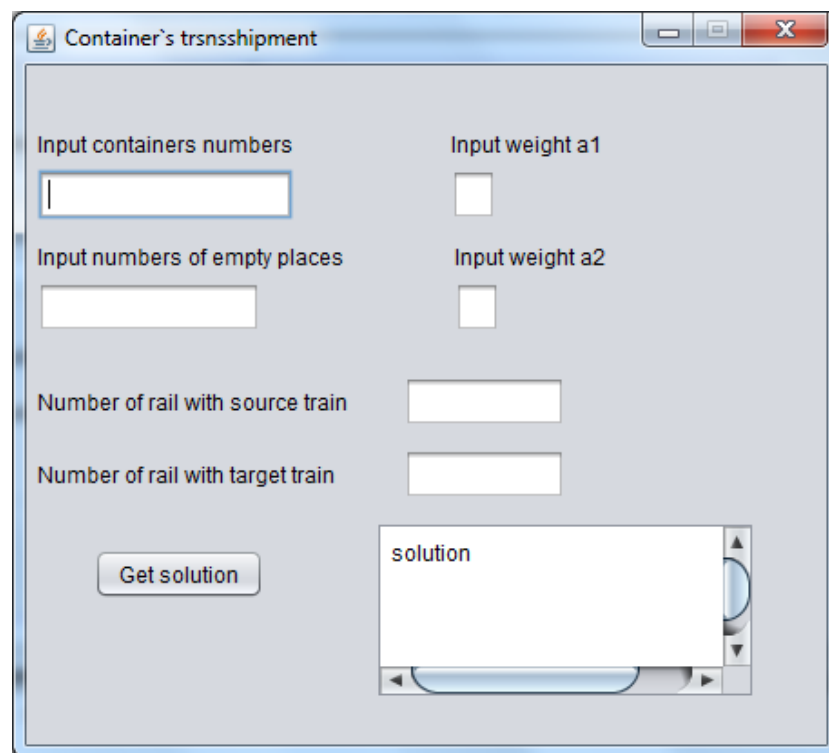


Рисунок 3.1 – Форма програмного засобу

При завантаженні програмного засобу, реалізованого з метою вирішення задачі перевантаження контейнерів безпосередньо між потягами, відкривається одна форма. На даній формі потрібно ввести інформацію, необхідну для вирішення поставленої задачі:

- номери контейнерів на потязі-джерелі;
- номери порожніх місць (платформ) на потязі-приймачі;
- вагові коефіцієнти a_1 , a_2 , які враховують нерівноцінність переміщення каретки перевантажувального крану (x - координата) та

переміщення самого перевантажувального крану по коліям (у - координата), якщо не введені, прирівнюються одиниці, тобто вартість переміщень рівноцінна;

- номер колії, на якій розташований потяг-джерело;
- номер колії, на якій розташований потяг-приймач.

Якщо перед натисненням кнопки не було введено дані в поле номери контейнерів на потязі-джерелі, або номери порожніх місць (платформ) на потязі-приймачі, або номер колії, на якій розташований потяг-джерело, або номер колії, на якій розташований потяг-приймач, то виникне помилка, продемонстрована на рисунку 3.2.

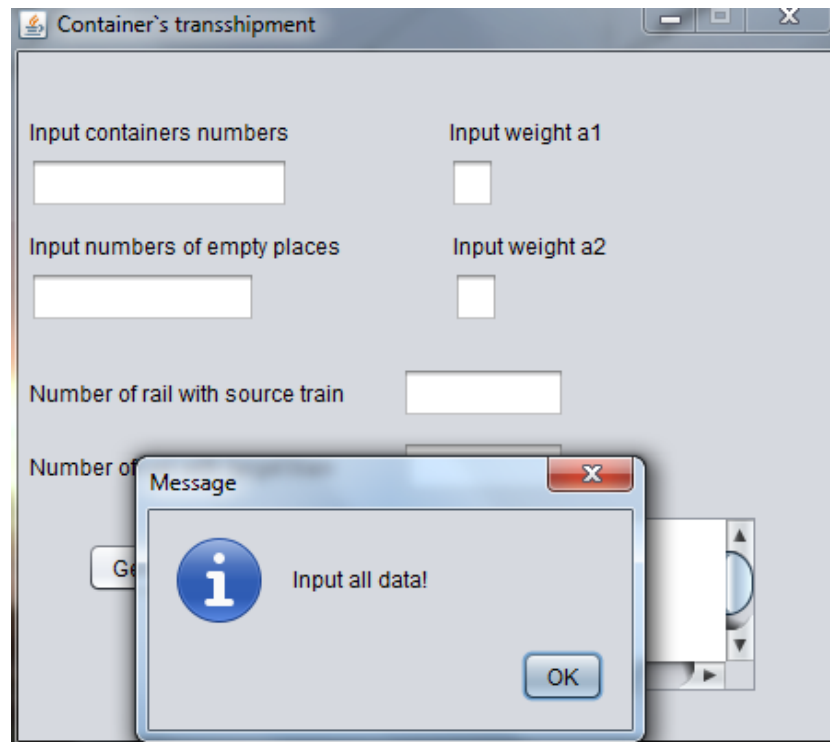


Рисунок 3.2 – Помилка виконання програми: «Недостатньо даних»

На рисунку 3.3 зображено коректний запис даних до додатку, а на рисунку 3.4 показано результат обчислення задачі із заданими параметрами.

The screenshot shows a window titled "Container's trsnshipment" with the following input fields and values:

Input containers numbers	2,4	Input weight a1	1
Input numbers of empty places	3,5,6	Input weight a2	1
Number of rail with source train	5		
Number of rail with target train	8		

A "Get solution" button is located below the input fields. To the right, there is a text area labeled "solution" which is currently empty.

Рисунок 3.3 – Коректно введені дані в програмному вікні

The screenshot shows the same window as Figure 3.3, but with the "Get solution" button highlighted. The "solution" text area now contains the following text:

```
Container 2 assigned to place 3
container 4 assigned to place 5
```

Рисунок 3.4 – Результат пошуку рішення за заданими критеріями

Запропонований, спроектований та реалізований програмний засіб дозволяє вирішити задачу переміщення контейнерів, яка відноситься до класу задач розвезення та обробки вантажів.

Такий програмний засіб може функціонувати як окремий додаток, а може слугувати модулем системи автоматизації процесів, які виконуються на перевантажувальному майданчику.

Інтерфейс програмного засобу спрощено, так як основна мета його використання – вирішення оптимізаційних задач, тобто результатом роботи такої програми має бути виведення місць оптимального розташування контейнерів на потязі-приймачі, які потрібно перевантажити з потягу-приймача.

ВИСНОВОК

Робота присвячена розробці та дослідженню математичного забезпечення задач розвезення та обробки вантажів. Дослідження існуючих опублікованих матеріалів дозволило визначити клас задач розвезення та обробки вантажів, які мають місце в логістичних системах, зокрема, на залізничних вантажних станціях.

В класі задач розвезення та обробки вантажів сформульовано задачу перевантаження контейнерів безпосередньо між потягами, та побудовано її математичну модель у вигляді задачі комбінаторної оптимізації.

Для аналізу математичної моделі використано евристичний метод, який застосовує відому евристику пошуку променем (beam search).

Виконано програмну реалізацію методу рішення задачі перевантаження контейнерів безпосередньо між потягами. Запропонований програмний засіб може функціонувати як окремий додаток, або може бути приєднаний до системи управління процесами залізничної вантажної станції.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Toth P., Vigo D. The vehicle routing problem // Monographs on discrete mathematics and applications. SIAM, Philadelphia, 2001
2. Garey, M., & Johnson, D. (1979). Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. New York: Freeman.
3. В. О. Борознов, “Исследование решения задачи коммивояжера”, Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ., 2009, № 2, 147–151
4. New Magenta Papers // Сборник научных трудов, Выпуск No 1. Труды международного семинара по интеллектуальному планированию. Под ред . А . В . Иващенко – Самара : Издательство Самарского научного центра РАН , 2012. – 68 с ., ил .
5. M.M. Solomon. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. Operations Research, 35:254-265, 1987.
6. Anily, S., Bramel, J., 1999. Approximation algorithms for the capacitated traveling salesman problem with pickups and deliveries. Naval Research Logistics 46, 654–670 .
7. T.R. Sexton and Y.-M. Choi. Pickup and delivery of partial loads with "soft" time windows. American Journal of Mathematical and Management Sciences, 6:369-398, 1986.
8. Jenny Nossack, Dirk Briskorn, Erwin Pesch (2018) Container Dispatching and Conflict-Free Yard Crane Routing in an Automated Container Terminal. Transportation Science
9. T. Crainic and K. Kim, "Intermodal transportation", Handbooks Oper. Res. Manag. Sci., Vol.14, pp.467 – 537, 2007.
10. Blasum, U., Bussieck, M., Hochstättler, W., Moll, C., Scheel, H.-H., & Winter, T. (1999). Scheduling trams in the morning. Mathematical Methods of Operations Research , 49 , 137–148.

11. M. Gendreau, G. Laporte, and R. Seguin. An exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers. *Transportation Science*, 29:143-155, 1995
12. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Глава 22. Элементарные алгоритмы для работы с графами // *Алгоритмы: построение и анализ* (второе издание). — М.: «Вильямс», 2005. — С. 622—632..
13. M. Barketau, H. Kopfer, and E. Pesch, "A Lagrangian lower bound for the container transshipment problem at a railway hub for a fast branch - and - bound algorithm", *J. Oper. Res. Soc.*, Vol.64, pp.1614 – 1 621, 2013
14. Moccia, L., Cordeau, J., Gaudioso, M., & Laporte, G. (2006). A branch-and-cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal. *Naval Research Logistics*, 53 , 45–59
15. Orgun MA, Thornton J, eds. *AI 2007 : Advances in Artificial Intelligence . Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 4830 (Springer, Berlin), 625–631
16. Caris, A., Janssens, G.K., 2009. A local search heuristic for the pre- and end-haulage of intermodal container terminals. *Computers & Operations Research* 36, 2763– 2772 .
17. M. Gendreau, G. Laporte, and R. Seguin. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers. Working paper, CRT, Montreal University, Canada, 1994.
18. C. Tan and J. Beasley. A heuristic algorithm for the period vehicle routing problem. *Omega*, 12:497-504, 1984. N. Christofides and J. Beasley. The period routing problem. *Networks*, 14:237-256, 1984
19. N. Boysen, F. Jaehn, and E. Pesch, "New bounds and algorithms for the transshipment yard scheduling problem", *J. Sched.*, Vol.15, pp.499–511, 2012.
20. Igor Grebennik, Rémy Dupas, Oleksandr Lytvynenko, Inna Urniaieva, "Scheduling Freight Trains in Rail - rail Transshipment Yards with Train Arrangements ", *International Journal of Intelligent Systems and Applications(IJISA)*, Vol. 9 , No. 10 , pp.12 - 19 , 2017.
21. Peng Guo, Wenming Cheng, Yi Wang & Nils Boysen (2018): Gantry crane scheduling in intermodal rail-road container terminals, *International Journal of Production Research*

22. Carlo HJ, Vis IFA, Roodbergen KJ (2014) Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *Eur. J. Oper. Res.* 235:412–430.
23. N. Boysen, F. Jaehn, and E. Pesch, "Scheduling Freight Trains in Rail-Rail Transshipment Yards", *Transp. Sci.*, Vol.45, pp.199–211, 2011.
24. Левитин А. В. Глава 5. Метод уменьшения размера задачи: Поиск в ширину // *Алгоритмы. Введение в разработку и анализ* — М.: Вильямс, 2006. — 576 с. — ISBN 978-5-8459-0987-9