

Національна академія наук України
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного

Литвиненко Олександр Сергійович



УДК 519.85

**МЕТОДИ ГЕНЕРАЦІЇ КОМБІНАТОРНИХ КОНФІГУРАЦІЙ ТА ЇХ
ЗАСТОСУВАННЯ В МАТЕМАТИЧНОМУ І КОМП'ЮТЕРНОМУ
МОДЕЛЮВАННІ ЗАДАЧ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ТА ОБРОБКИ ВАНТАЖІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Гребеннік Ігор Валерійович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
завідувач кафедри системотехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Комяк Валентина Михайлівна,
Національний університет цивільного захисту України
МВС України,
професор кафедри фізико-математичних дисциплін.

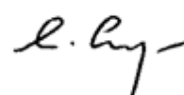
доктор фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник
Семенова Наталія Володимирівна,
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,
провідний науковий співробітник відділу методів дискретної оптимізації, математичного моделювання та аналізу складних систем.

Захист відбудеться «28» лютого 2019 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01 при Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий « 24 » січня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01
д.т.н., проф.



О.О. Стрельнікова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Багато наукових та прикладних задач мають дискретну структуру і можуть бути описані за допомогою комбінаторних конфігурацій. Значна кількість задач цього класу може бути адекватно подана за допомогою комбінаторних оптимізаційних моделей. Зокрема, до них належать комбінаторні задачі розміщення геометричних об'єктів, задачі транспортної маршрутизації, задачі інтермодальних контейнерних перевезень, задачі про призначення тощо. Задачам комбінаторної оптимізації присвячено багато досліджень закордонних та вітчизняних вчених, серед яких N. Christofides, A. Schrijver, C.H. Papadimitriou, P. Toth, D. Vigo, P.M. Pardalos, S. Martello, I.B. Сергієнко, М.З. Згуровський, Ю.Г. Стоян, С.В. Яковлев, Н.В. Семенова. Серед проблем, які зводяться до задач комбінаторної оптимізації, останнім часом стають все більш актуальними задачі перевезення та обробки вантажів, в яких транспортування вантажів поєднується з їх різноманітним обробленням (упаковкою, перевантаженням, тимчасовим зберіганням тощо). Вони виникають, зокрема, у контейнерних інтермодальних перевезеннях, у транспортній маршрутизації, при плануванні робіт в морських портах, на вантажних залізничних станціях, великих підприємствах, товарних складах.

Ефективним засобом комбінаторики при дослідженні задач, що мають дискретну структуру, є комбінаторна генерація. Комбінаторній генерації присвячені, зокрема, роботи D. Knuth, F. Ruskey, D. Kreher, D. Stinson, P. Flajolet. Методи комбінаторної генерації використовуються в математичному і комп'ютерному моделюванні та аналізі об'єктів з дискретною структурою, під час розв'язання задач комбінаторної оптимізації та в інших областях. Прикладами таких задач є задачі розподілу співробітників між проектами, задачі проектування електричних ланцюгів, знаходження альтернативних шляхів в задачах транспортної маршрутизації тощо.

Методи генерації комбінаторних конфігурацій можуть бути застосовані в стратегіях розв'язання задач комбінаторної оптимізації, що використовують генерацію елементів області допустимих розв'язків. В реальних задачах виникає багато обмежень на допустимі розв'язки, тому застосування класичних комбінаторних конфігурацій (перестановок, сполучень тощо) для опису та розв'язання таких задач є надлишковим. Як наслідок, виникає необхідність у застосуванні неklasичних комбінаторних конфігурацій, що враховують властивості та обмеження задач. Використання методів генерації неklasичних комбінаторних конфігурацій для розв'язання задач комбінаторної оптимізації дозволяє генерувати одразу допустимі розв'язки, завдяки чому можна уникнути надлишковості та знизити обчислювальну складність методів комбінаторної оптимізації. Серед неklasичних комбінаторних конфігурацій композиційні k -образи комбінаторних множин (k -множини), введені в роботах Ю.Г. Стояна та I.B. Гребенніка, можуть бути використані для формалізованого опису множин допус-

тих розв'язків задач, що мають складну комбінаторну структуру. Незважаючи на добре розроблений математичний апарат k -множин, задача їхньої генерації у загальній постановці залишається невирішеною.

Використання генерації різноманітних комбінаторних конфігурацій в методах розв'язання задач комбінаторної оптимізації вимагає побудови досить універсальних, гнучких методів комбінаторної генерації, що можуть враховувати обмеження таких задач. Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених генерації комбінаторних конфігурацій, більшість існуючих методів орієнтовані на генерацію вузьких класів комбінаторних множин і важко піддаються модифікації. Таким чином, *актуальними* є розробка та розвиток стратегій і методів генерації комбінаторних конфігурацій, зокрема, некласичних, використання їх для математичного та комп'ютерного моделювання задач, що мають дискретну структуру, та підвищення ефективності розв'язання задач комбінаторної оптимізації, зокрема, задач перевезення та обробки вантажів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконана в період з 2014 по 2018 рр. на кафедрі системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках розділу №293-2 «Генерація комбінаторних конфігурацій в задачах математичного моделювання стійкого розвитку соціально-економічних систем» науково-дослідної роботи «Розробка методології і математичних моделей соціально-економічних систем при реалізації концепції їх стійкого розвитку» (ДР № 0115U001522), в розробці якої автор брав участь як виконавець.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи – розробка методів генерації комбінаторних конфігурацій та підвищення на їх основі ефективності розв'язання задач перевезення та обробки вантажів при їх математичному та комп'ютерному моделюванні.

Для досягнення цієї мети поставлено такі наукові задачі:

1. Розробка стратегії та узагальненого методу генерації комбінаторних конфігурацій як основи методів розв'язання задач комбінаторної оптимізації.
2. Розробка методу генерації композиційних k -образів комбінаторних множин (k -множин) з використанням запропонованого узагальненого методу.
3. Опис та розв'язання задач перерахунку і генерації перестановок з частково заданою сигнатурою як узагальнення перестановок з заданими підйомами та спусками.
4. Побудова математичної моделі задачі вивозу і доставки (Pickup and Delivery Problem, PDP) на основі комбінаторних конфігурацій, що одночасно враховує послідовність завантаження тривимірних контейнерів та порядок відвідування пунктів вивозу і доставки, виключаючи можливість блокування одних контейнерів іншими під час розвантаження та забезпечуючи стійкість завантаження. Розробка методу на основі комбінаторної генерації, алгоритму та програмного забезпечення для розв'язання цієї задачі.
5. Побудова математичної моделі задачі складання розкладу руху вантаж-

них поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції з урахуванням призначення поїздів на колії на основі комбінаторних конфігурацій. Розробка методу на основі комбінаторної генерації, алгоритму та програмного забезпечення для розв'язання цієї задачі.

Об'єкт дослідження – процеси генерації комбінаторних конфігурацій та математичного і комп'ютерного моделювання задач перевезення та обробки вантажів, які мають комбінаторну структуру.

Предмет досліджень – методи генерації комбінаторних конфігурацій, математичне та комп'ютерне моделювання під час розв'язання задач перевезення та обробки вантажів.

Методи дослідження. В роботі застосовуються методи комбінаторного аналізу, комбінаторної генерації та оптимізації, методи геометричного проектування для побудови математичної моделі задачі вивозу і доставки (Pickup and Delivery Problem, PDP), зокрема, метод Ф-функцій для опису тривимірних обмежень завантаження, евристичні методи побудови та аналізу рекурсивних дерев при генерації та комбінаторній оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. Набули подальшого розвитку стратегії та методи генерації комбінаторних конфігурацій у частині використання рекурсивних процедур та узагальнення класів комбінаторних конфігурацій, які генеруються, що дозволяє підвищити універсальність генерації та розширити класи генерованих комбінаторних множин під час математичного та комп'ютерного моделювання задач, які мають комбінаторну структуру.

2. Вперше розроблено методи повної та випадкової часткової генерації композиційних k -образів комбінаторних множин (k -множин) на основі розробленого узагальненого методу комбінаторної генерації, які складають основу методів комбінаторної оптимізації на k -множинах.

3. Введено нову комбінаторну множину – перестановки з частково заданою сигнатурою, що є узагальненням перестановок з заданими підйомами та спусками, для якої розв'язано задачі перерахунку та генерації на базі запропонованого методу.

4. Вперше розроблено математичні моделі задачі вивозу і доставки з тривимірними обмеженнями завантаження (PDPBS) і задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції, що використовують апарат комбінаторних конфігурацій замість традиційних булевих змінних, що дозволяє знизити розмірність, урахувати додаткові властивості та підвищити ефективність розв'язання задач зазначених класів.

5. Набули подальшого розвитку стратегії та методи розв'язання задач перевезення та обробки вантажів завдяки використанню методів комбінаторної генерації і врахуванню додаткових властивостей задач, що дозволяє підвищити ефективність їх розв'язання, зокрема:

– задачі PDPBS в частині одночасного врахування послідовності заван-

таження тривимірних контейнерів, порядку відвідування пунктів вивозу і доставки, виключення можливості блокування одних контейнерів іншими під час розвантаження та забезпечення стійкості завантаження, регулювання балансу між часом на отримання розв'язку та точністю отриманих результатів за допомогою евристики променевого пошуку;

- задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції в частині врахування призначення поїздів на залізничні колії.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення результатів роботи підтверджується актами впровадження: методів генерації комбінаторних конфігурацій, математичних моделей задач перевезення та обробки вантажів – в держбюджетні наукові дослідження; програмного забезпечення для розв'язання задачі вивозу та доставки вантажів і задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції – в ТОВ «Клауд Воркс» для розв'язання задач, пов'язаних з перевезенням та обробкою вантажів.

Запропоновані стратегія та узагальнений метод комбінаторної генерації можуть бути використані під час розв'язання широких класів задач комбінаторної оптимізації: метод генерації k -множин – при розв'язанні задач, що мають складну комбінаторну структуру (зокрема, задач упаковки n -вимірних паралелепіпедів); методи розв'язання задач вивозу і доставки та задачі складання розкладу вантажних поїздів на сортувальній станції – для підвищення ефективності діяльності транспортних компаній за рахунок зниження вартості доставки та обробки вантажів.

Особистий внесок здобувача. В роботах [1, 3, 8, 10] автору належать метод генерації базових множин та алгоритм *GenBase*, метод генерації k -множин та алгоритм *Gen_k-set*, а також усе програмне забезпечення; в роботах [4, 7, 14] – математичний опис, метод перерахунку, а також метод, алгоритм та програмне забезпечення для генерації; в роботах [5, 11-13] – математична модель досліджуваної задачі PDP, а також метод, алгоритм та програмне забезпечення для розв'язання описуваної задачі; в роботах [6, 15] – комбінаторні аспекти математичної моделі, методу, алгоритму та програмного забезпечення для розв'язання задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції; в роботі [16] – створене програмне забезпечення; в роботах [2, 9] – алгоритм пошуку евристичного розв'язку задачі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися та дістали схвалення на 19-й та 20-й міжнародних конференціях «Problems of decision making under uncertainties» (Україна-Чехія, 2012 р.); на 5-й та 7-й міжнародних конференціях «International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE)» (Болгарія, 2014 та 2017 рр.); на 5-й міжнародній конференції «Konferencija

Zastosowań Matematyki w Technice, Informatyce i Ekonomii» (Польща, 2015 р.); на 10-й міжнародній конференції «Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)» (Україна, 2015 р.); на 6-й міжнародній конференції «International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS)» (Франція, 2016 р.); на конференції молодих вчених та спеціалістів «Сучасні проблеми машинобудування» (Україна, 2017 р.); на постійно діючому семінарі «Математичні методи геометричного проектування» (м. Харків, 2018 р.) при науковій раді з проблеми «Кібернетика» НАН України; на семінарі відділу методів дискретної оптимізації, математичного моделювання та аналізу складних систем Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України (м. Київ, 2018 р.); на семінарах відділу математичного моделювання і оптимального проектування Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України (м. Харків, 2018 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць: з них 3 статті в спеціалізованих виданнях, затверджених ДАК МОН України [1, 2, 7], 4 статті у закордонних виданнях [3-6] (всі праці входять до міжнародних наукометричних баз) та 9 тез доповідей на міжнародних конференціях [8-16]. Автор має 4 роботи (2 статті [1, 6] та 2 тези доповідей [11, 13]), що індексуються базою SCOPUS та 1 статтю, що індексується базою Web of Science [4].

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаної літератури, три додатки. Повний обсяг дисертації становить 172 сторінки тексту, (з них 141 с. – основного тексту), містить 41 рисунок (14 с.), 13 таблиць (6 с.), список використаних літературних джерел із 229 найменувань (22 с.) та 3 додатки (7 с.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність обраної теми, сформульовані мета і задачі, вказані об'єкт, предмет і методи дослідження, визначається наукова новизна і практична значущість отриманих результатів, наведено відомості про публікації за темою дисертаційної роботи і апробацію результатів дослідження.

Перший розділ дисертації містить огляд і аналіз існуючих методів комбінаторної генерації та оптимізації та областей їх застосування. Розглянуто класичні задачі комбінаторики, існуючі методи комбінаторної оптимізації. Задачі комбінаторної оптимізації досліджувались в роботах N. Christofides, A. Schrijver, I.B. Сергієнка, В.П. Шила, Л.Ф. Гуляницького, Н.В. Семенової; в рамках напряму геометричного проектування – в роботах Ю. Г. Стояна, С.В. Яковлева, М.І. Гіля, В.М. Комяк, О.О. Ємця, О.В. Панкратова, Т.Є. Романової, I.B. Гребенніка. Проведено аналіз досліджень в галузі комбінаторної генерації, зокрема, розглянуто класифікацію та методи побудови алгоритмів комбінаторної генерації. Комбінаторній генерації присвячені роботи таких вчених як D. Knuth, F. Ruskey, D. Kreher, D. Stinson. Проаналізовано роботи, присвячені некласичним комбінаторним конфігураціям – k -множинам, введеним у роботах Ю.Г.

Стояна та І.В. Гребенніка, та перестановкам з заданими підйомами та спусками, введеним F. Ruskey та N.G. De Bruijn. Проведено аналіз публікацій, присвячених задачам та методам комбінаторної оптимізації, та науково-прикладним задачам, що подаються за допомогою задач комбінаторної оптимізації. У цьому класі виділено задачі перевезення та обробки вантажів, до яких належать задачі маршрутизації транспорту, зокрема, задачі вивозу і доставки, та задачі інтермодальних перевезень, серед яких задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції. На основі проведеного аналізу публікацій виявлено актуальні для предметної області проблеми та сформульовано задачу дослідження дисертаційної роботи: розробити стратегію, методи та алгоритми генерації комбінаторних конфігурацій з метою використання результатів в математичному та комп'ютерному моделюванні для розв'язання задач перевезення та обробки вантажів, що мають комбінаторну природу. Як математична модель досліджуваних в роботі комбінаторних оптимізаційних задач використовується модель вигляду

$$\begin{aligned} k(w) &\rightarrow_{a \in A} \text{extr}, \\ F(w) &\geq 0, \\ G(w) &= 0, \\ w &\in W, W = \{w = (a, d), a \in A \subseteq P, d \in D\}, \end{aligned} \tag{1}$$

де k – відображення, задане на підмножині A деякої комбінаторної множини P . При цьому відображення k може залежати від множини додаткових дискретних або неперервних параметрів D , на які можуть бути накладені обмеження для врахування специфіки задач при побудові їх математичних моделей.

Другий розділ присвячений розробці стратегій, методів та алгоритмів генерації комбінаторних конфігурацій.

У підрозділі 2.1 сформульовано узагальнену стратегію та розроблений в її рамках метод генерації комбінаторних конфігурацій, що є базовим результатом, на використанні якого ґрунтуються усі подальші методи комбінаторної генерації, а також методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації, розроблені в роботі.

За визначенням D. Kreher та D. Stinson, задача комбінаторної генерації полягає у генерації всіх комбінаторних структур заданого типу [1*]. Нехай задана базова комбінаторна множина T та множина її параметрів p , до якої входять довжина m кожного елемента множини T , множина твірних елементів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ та інші параметри, специфічні для конкретного

[1*] Kreher D. L, Stinson D. R. Combinatorial Algorithms: Generation, Enumeration, and Search. 1998.

класу комбінаторної множини T . Необхідно згенерувати всі елементи $t \in T$, кожний з яких є кортежем довжини m . Позначимо $t^i = (t_1, t_2, \dots, t_i)$, $\forall t_i \in A$, $i \in J_n, J_n = \{1, 2, \dots, n\}$. Тоді $t^0 = ()$, $t^m = t \in T$.

Запропонована стратегія генерації комбінаторних конфігурацій полягає у використанні єдиного методу генерації комбінаторних конфігурацій, визначенні порядку та повноти генерації (вичерпна або часткова генерація). В рамках стратегії розроблено узагальнений метод генерації комбінаторних конфігурацій, що ґрунтується на класичній процедурі *backtracking*, що полягає в утворенні від часткового кортежу довжини i одного або декількох кортежів довжини $i+1$. В процесі роботи методу будується рекурсивне дерево (*backtracking tree*). Універсальність запропонованого методу досягається за рахунок можливості використання різних формальних правил побудови конкретної комбінаторної множини.

Запропоновано алгоритмічну реалізацію розробленого узагальненого методу – алгоритм *GenBase*, що належить до класу алгоритмів пошуку з поверненням (*backtracking algorithms*), описаних в класичних роботах з комбінаторики. На кожному рівні рекурсії $i \in J_{m-1}^0, J_{m-1}^0 = \{0, 1, \dots, m-1\}$ алгоритм додає в поточний елемент-кортеж $t^i = (t_1, t_2, \dots, t_i)$ наступний твірний елемент $t_{i+1} \in A$, отримуючи таким чином на рівні $i+1$ кортеж $t^{i+1} = (t_1, t_2, \dots, t_{i+1})$. На рівні m алгоритм додає повний кортеж $t^m = t$ до результуючої множини T . Належність множини T до конкретного класу комбінаторних множин задає відповідні обмеження на елемент $t_{i+1} \in A$. На кожному рівні $i \in J_{m-1}^0$ позначимо через F^i кортеж, що містить всі твірні елементи, що задовольняють цим обмеженням. Правила побудови конкретної комбінаторної множини, тобто правила отримання F^i , задаються за допомогою процедури *Get_F* (що входить до множини p). Після отримання F^i , алгоритм додає у кінець вхідного кортежу $t^i = (t_1, t_2, \dots, t_i)$ всі елементи $t_{i+1} = f_j$ і рекурсивно викликає сам себе з параметром $t^{i+1} = (t_1, t_2, \dots, f_j)$ для всіх $j \in J_k$.

Обчислювальна складність алгоритму *GenBase* визначається як $O(N) = mN$, де N – потужність множини T ; m – довжина кожного елемента-кортежа множини T . За класифікацією F. Ruskey, алгоритм належить до класу *BEST*, що свідчить про його ефективність.

Підрозділ 2.2 присвячений розробці методу генерації композиційних k -образів комбінаторних множин (k -множин), введених у роботах Ю.Г. Стояна та І.В. Гребенніка, що базується на використанні розробленого узагальненого методу для генерації базових комбінаторних множин. Створено алгоритм, що реалізує розроблений метод, наведено оцінку його обчислювальної складності.

k -множина – це комбінаторна множина, побудована з інших, базових множин як результат композиції відображень, що будуються за допомогою

операції n -композиції – заміни твірних елементів батьківської множини на елементи-кортежі дочірніх множин.

Задача генерації k -множин ставиться таким чином. Нехай задано k (кількість рівнів k -множини), комбінаторні множини Y_{ij} та їхні параметри $p(Y_{ij})$, $i \in J_{k-1}^0$, $j \in J_{\eta_i}$, $J_{k-1}^0 = \{0, 1, \dots, k-1\}$, $J_{\eta_i} = \{1, 2, \dots, \eta_i\}$ (η_i – кількість базових множин на рівні i). Необхідно згенерувати всі елементи k -множини $W_z = \Gamma_k \circ \Gamma_{k-1} \circ \dots \circ \Gamma_0(z)$, $z = A_0 \in p(Y_0)$ (A_0 – твірні елементи множини $Y_0 = Y_{00}$, Γ_k – відображення, що відповідає операції n -композиції на рівні k).

Розроблено метод генерації k -множин, що полягає в побудові всіх базових множин за допомогою узагальненого методу генерації та проведенні операції n -композиції. Описано алгоритм *Gen_k-set*, що реалізує запропонований метод, наведено оцінку його обчислювальної складності

$$\sum_{i=0}^k \sum_{j=1}^{\eta_i} O(Y_{ij}) + \sum_{i=0}^{k-1} (Card(P^i) \prod_{j=1}^{\eta_{i+1}} Card(Y_{(i+1)j})), \quad (2)$$

де $O(Y_{ij})$ – складність генерації базової множини Y_{ij} ;

$P^i = \Gamma_i \circ \Gamma_{i-1} \circ \dots \circ \Gamma_0(z)$ – k -множина, збудована до рівня i .

Застосування евристик в методах комбінаторної оптимізації вимагає побудови методів комбінаторної генерації, що дозволяють отримати лише деяку частину області допустимих розв'язків. У підрозділі 2.3 розроблено метод часткової (випадкової) генерації k -множин – модифікацію методу генерації k -множин, що дозволяє генерувати не всю множину, а лише деяку її підмножину, отриману випадковим чином. В цьому методі операція n -композиції виконується не для всіх, а лише для деяких елементів дочірньої множини. Побудовано алгоритм *Gen_Random_k-set*, що реалізує цей метод та є модифікацією алгоритму повної генерації k -множин *Gen_k-set*, оцінено його обчислювальну складність.

У підрозділі 2.4 введено нову комбінаторну множину – перестановки з частково заданою сигнатурою, що являють собою узагальнений випадок перестановок з заданими підйомами та спусками, описаних в роботах F. Ruskey та N.G. De Bruijn. Наведено математичний опис запропонованого класу перестановок, отримано формулу для обчислення їх кількості, побудовано метод та алгоритм їх генерації, що базуються на використанні узагальнених методу та алгоритму комбінаторної генерації, розглянутих в підрозділі 2.1. Наведено приклад роботи запропонованого алгоритму та оцінено його обчислювальну складність.

Нехай задана множина твірних елементів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,

$a_1 < a_2 < \dots < a_n$, $a_i \in R^1$, $i \in J_n$, $J_n = \{1, 2, \dots, n\}$. Множину перестановок з елементів $a_1, a_2, \dots, a_n$ позначимо P_n . Для будь-якої перестановки $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) \in P_n$, $\pi_j \in A$, $j \in J_n$ справедливі відношення між сусідніми елементами $\pi_1 \rho_1 \pi_2 \rho_2 \dots \rho_{n-1} \pi_n$, $\rho_i \in \{<, >\}$, $i \in J_{n-1}$. Послідовність таких відношень $\rho(\pi) = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{n-1})$ визначає сигнатуру перестановки, запропоновану F. Ruskey [2*]. Перестановки, де відношення між елементами визначаються заданою сигнатурою, називаються перестановками з заданими підйомами та спусками [2*].

У роботі введено та досліджено перестановки, в яких відношення «більше» або «менше» задаються не для всіх пар сусідніх елементів π_i, π_{i+1} , а лише для деяких. Для опису таких перестановок введено поняття часткової (частково заданої) сигнатури перестановки $r(\pi)$, що визначається як $r(\pi) = (\rho_{i_1}, \rho_{i_2}, \dots, \rho_{i_k})$, $\{i_1, i_2, \dots, i_k\} \subset J_{n-1}$. Для індексів елементів $J_{n-1} \setminus \{i_1, i_2, \dots, i_k\}$, в яких частково задана сигнатура $r(\pi)$ не визначена, відношення $\rho_i \in \{<, >\}$ можуть бути довільними. Відповідний клас перестановок названо перестановками з частково заданою сигнатурою.

Частково заданій сигнатурі $r(\pi) = (\rho_{i_1}, \rho_{i_2}, \dots, \rho_{i_k})$ відповідають $M = 2^{n-k-1}$ сигнатур $\rho(\pi)$, тому кількість перестановок з частково заданою сигнатурою $r(\pi)$ дорівнює сумі кількостей (див. [3*]) перестановок з сигнатурами $\rho^j(\pi)$, $j \in J_M$, що відповідають $r(\pi)$

$$N(r(\pi)) = \sum_{j=1}^{2^{n-k-1}} N(\rho^j(\pi)). \quad (3)$$

Розроблено метод генерації перестановок з частково заданою сигнатурою, що використовує узагальнений метод генерації. До параметрів p входять: множина твірних елементів A , частково задана сигнатура $r(\pi)$, $\{m_i\}, i \in J_{n-2}^0$ – кількість підйомів або спусків в частково заданій сигнатурі, що слідує один за одним, починаючи з наступної позиції $i+1$, та правила побудови даного класу перестановок, що задаються процедурою *GetF_updown*. Оцінено складність розробленого методу генерації (вона дорівнює складності узагальненого методу) та наведено приклади його роботи.

У третьому розділі розроблено математичні моделі задач перевезення та обробки вантажів та розвинуто методи їх розв'язання за рахунок використання

[2*] van Baronaigien D. R., Ruskey F. Generating permutations with given ups, downs. *Discrete applied mathematics*. 1992. Vol. 36. No. 1. P. 57–65.

[3*] Stanley R. P. Enumerative combinatorics. Wadsworth Publ. 1986.

узагальненого методу комбінаторної генерації та врахування додаткових властивостей задач. Використовується стратегія розв'язання задач комбінаторної оптимізації, що полягає в описі областей допустимих розв'язків за допомогою некласичних комбінаторних конфігурацій та застосуванні комбінаторної генерації в методах розв'язання таких задач.

У підрозділі 3.1 формулюється задача вивозу і доставки (Pickup and Delivery Problem, PDP) з тривимірними обмеженнями завантаження, запобіганням блокуванню контейнерів під час розвантаження та забезпеченням стійкості завантаження (PDP with 3D loading constraints, blocking prevention and stability check, PDPBS). У цій задачі транспортні засоби, що виїжджають з депо, мають забрати вантажі (по 1 контейнеру у формі паралелепіпеда) у пунктах вивозу (pickup) та доставити їх у відповідні пункти доставки (delivery). Кожному пункту pickup відповідає один пункт delivery (задача належить до класу one-to-one PDP). Нехай: n – кількість пар «pickup-delivery»; v – кількість однакових транспортних засобів; Q – вантажопідйомність; W, H, L – лінійні розміри вантажного відсіку кожного транспортного засобу; w_i, h_i, l_i та q_i – відповідно лінійні розміри та маса контейнерів, що завантажуються або розвантажуються у пунктах $i \in J_{2n}$. Треба знайти оптимальну сукупність маршрутів всіх транспортних засобів та параметри розміщення вантажів (контейнерів) всередині транспортних засобів. Дана задача є дискретно-неперервною NP-повною задачею умовної оптимізації. Цільовою функцією задачі є сумарна вартість всіх маршрутів

$$\Psi(E, U, V) = \sum_{j=1}^{\mu} [c(0, e_1^j) + \sum_{k=1}^{2n_j-1} c(e_k^j, e_{k+1}^j) + c(e_{2n_j}^j, 2n+1)], \quad (4)$$

де $\mu \leq v$ – кількість задіяних транспортних засобів; n_j – кількість пар pickup-delivery, які обслуговує транспортний засіб $j \in J_{\mu}$, $J_{\mu} = \{1, 2, \dots, \mu\}$; $E = (e^1, e^2, \dots, e^{\mu}) \in \mathbb{R}^{2n}$ – кортеж перестановок (маршрути всіх транспортних засобів), дискретна змінна; $e^j = (e_1^j, e_2^j, \dots, e_{2n_j}^j)$ – маршрут транспортного засобу $j \in J_{\mu}$; e_k^j – k -ий пункт маршруту транспортного засобу j , $j \in J_{\mu}$, $k \in J_{2n_j}$; $U = (U^1, U^2, \dots, U^{\mu}) \in \mathbb{R}^{3n}$ – вектори трансляції (координати полюсів всіх контейнерів, що перевозяться), $U^j = (u_1^j, u_2^j, \dots, u_{2n_j}^j)$, $u_i^j = (x_i^j, y_i^j, z_i^j)$, $i \in J_{n_j}$, $j \in J_{\mu}$; $V = (V^1, V^2, \dots, V^{\mu}) \in \mathbb{R}^{3n}$ – лінійні розміри контейнерів в порядку, який визначає їх орієнтацію (перестановка лінійних розмірів відповідає повороту паралелепіпеда на кут $\pi/2$), $V^j = (v_1^j, v_2^j, \dots, v_{n_j}^j)$, $v_i^j = (v_{1i}^j, v_{2i}^j, v_{3i}^j)$, $i \in J_{n_j}$, $j \in J_{\mu}$; $c(0, e_1^j)$ – відстань від депо (що описується за допомогою фіктивного пункту 0) до першого пункту, відвіданого транспортним засобом j ;

$c(e_{2n_j}^j, 2n+1)$ – відстань від останнього відвіданого пункту до депо (фіктивні пункти 0 і $2n+1$ відповідають депо).

Розглядаються такі обмеження.

Обмеження послідовності відвідування точок pickup та delivery (BS1) описуються таким чином. Для кожного пункту доставки (delivery) $e_r^j \in D$ маршруту кожного транспортного засобу $j \in J_\mu$ відповідний пункт пік업 $e_t^j \in P$ має відвідуватися раніше ($t < r$)

$$e_r^j \in D \Rightarrow \exists t < r : e_t^j \in P, e_t^j + n = e_r^j, r \in J_{2n_j}, j \in J_\mu. \quad (5)$$

Обмеження вантажопідйомності: загальна маса всіх вантажів, що перевозяться транспортним засобом $j \in J_\mu$ на момент досягнення кожного пункту $s \in J_{2n_j}$ маршруту e^j , не має перевищувати його вантажопідйомність

$$Q(j, s) = \sum_{k=1}^s q_{e_k^j}, Q(j, s) \leq Q, s \in J_{2n_j}, j \in J_\mu. \quad (6)$$

Для формалізації обмежень розміщення вантажів використовується апарат Ф-функцій, запропонований Ю.Г. Стояном.

Обмеження взаємного неперетину: в кожному транспортному засобі $j \in J_\mu$ ніякий контейнер i (що визначається координатами полюса u_i^j і орієнтацією v_i^j) не перетинається з контейнером m (що визначається координатами полюса u_m^j і орієнтацією v_m^j)

$$\begin{aligned} \Phi_{im}^j(u_i^j, u_m^j, v_i^j, v_m^j) &\geq 0, i, m \in J_n, i < m, j \in J_\mu \\ \Phi_{im}^j(u_i^j, u_m^j, v_i^j, v_m^j) &= \max\{x_m^j - x_i^j - v_{1i}^j, -x_m^j + x_i^j - v_{1m}^j, \\ y_m^j - y_i^j - v_{2i}^j, -y_m^j + y_i^j - v_{2m}^j, z_m^j - z_i^j - v_{3i}^j, -z_m^j + z_i^j - v_{3m}^j\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Обмеження на можливість розміщення вантажів всередині вантажного відсіку: в кожному транспортному засобі $j \in J_\mu$ всі контейнери можуть бути розміщені всередині вантажного відсіку (що визначається шириною W , довжиною L та висотою H)

$$\begin{aligned} \Phi_{0m}^j(u_0^j, u_m^j, v_m^j) &\geq 0, m \in J_n, j \in J_\mu \\ \Phi_{0m}^j(u_0^j, u_m^j, v_m^j) &= \min\{x_m^j - x_0^j, -x_m^j + x_0^j + W - v_{1m}^j, y_m^j - y_0^j, \\ &-y_m^j + y_0^j + L - v_{2m}^j, z_m^j - z_0^j, -z_m^j + z_0^j + H - v_{3m}^j\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Обмеження стійкості: якщо контейнер $k \in B^j$ (B^j – множина всіх пунктів, які обслуговуються транспортним засобом j) не знаходиться

безпосередньо на підлозі вантажного відсіку ($z_k^j > 0$), то повинен існувати контейнер $p \in B^j$, такий, що дно контейнера k повністю знаходиться на верхній площині контейнера p

$$\begin{aligned}
 \forall k \in B^j : z_k^j > 0 &\Rightarrow \exists p \in B^j : \\
 z_k^j &= z_p^j + h_p^j, \\
 x_k^j &< x_p^j, y_k^j < y_p^j, \\
 x_k^j + v_{1k}^j &< x_p^j + v_{1p}^j, y_k^j + v_{2k}^j < y_p^j + v_{2p}^j, \\
 j &\in J_\mu.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Обмеження неблокування: в кожному пункті доставки (delivery) r контейнер, що вивантажується, не повинен блокуватися (спереду та зверху) іншими контейнерами t , що знаходяться в вантажному відсіку

$$\begin{aligned}
 e_r^j &\in D: \\
 \exists T = \{t < r : e_t^j \in P, \exists d > r : e_t^j + n = e_d^j\} &\neq \emptyset \\
 \Rightarrow \Phi_{rt}^j(u_t^j, u_r^j, v_t^j, v_{ry}^j) &\geq 0, v_{ry}^j = (v_{1r}^j, L - u_{2r}^j, v_{3r}^j), \\
 \Phi_{rt}^j(u_t^j, u_r^j, v_t^j, v_{rz}^j) &\geq 0, v_{rz}^j = (v_{1r}^j, v_{2r}^j, H - u_{3r}^j), \\
 \forall t \in T, \\
 r \in J_{2n_j}, j \in J_\mu.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Математична модель задачі PDPBS

$$\begin{aligned}
 \min_{(E,U,V) \in \mathbb{W}} \Psi(E,U,V), \\
 \mathbb{W} = \{(E,U,V) \in \mathbb{R}^{8n}\},
 \end{aligned} \tag{11}$$

де $\mathbb{W}$ – область допустимих розв'язків задачі, яка містить вектори (E,U,V) , що задовольняють обмеження (6)-(10). Змінними задачі є вектор (E,U,V) , що містить маршрути всіх транспортних засобів, а також параметри розміщення вантажів (координати полюсів і орієнтація). Дискретні змінні задачі описуються k -множиною – кортежем перестановок.

Стратегія розв'язання задачі містить 2 етапи. На першому етапі відбувається розподіл пар pickup-delivery між транспортними засобами. Для цього кожна пара пунктів pickup-delivery замінюється на одну точку, після чого проводиться кластеризація методом k -середніх. На другому етапі формується оптимальний маршрут для кожного транспортного засобу. Метод розв'язання задачі на цьому етапі полягає в генерації допустимих маршрутів і виборі кращого з них. Для цього використовується узагальнений метод та класична евристика променевого пошуку (beam search). Розроблено правила формування

допустимих маршрутів, що задаються процедурою *GetF_PDP_heuristic*.

У підрозділі 3.2 розроблено математичну модель та розвинуто стратегії та методи розв'язання задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції (Transshipment Yards Scheduling Problem, TYSP) [4*]. На відміну від існуючих робіт, розроблена математична модель використовує комбінаторні конфігурації замість булевих змінних, а також враховує призначення поїздів на залізничні колії, що дозволяє підвищити ефективність розв'язання задачі.

Задано множину поїздів, які везуть контейнери один для одного. Контейнери перевантажуються на сортувальній станції за допомогою порталних кранів або безпосередньо з поїзда в поїзд, або через складський майданчик. За кожну ітерацію (сервісний слот) станція приймає не більше G поїздів, де G – кількість колій на станції. При цьому можливі особливі ситуації: повторні відвідування (revisits) та розділені переміщення (split moves). В роботі [4*] описано 5 рівнів деталізації розв'язання задачі, проте в існуючих роботах розв'язується тільки перший рівень, тобто формування сервісних слотів. У даній роботі задача розв'язується також на другому рівні, тобто розглядається призначення поїздів на коліях, що дозволяє скоротити витрати на функціонування сортувальної станції за рахунок скорочення витрат на роботу порталних кранів під час переміщення вантажів. Задача TYSP2 (Transshipment Yards Scheduling Problem, level 2) формулюється таким чином. Нехай $I = \{1, 2, \dots, N\}$ – множина всіх поїздів; $A = [A_{ij}]$ – кількість контейнерів, які кожний поїзд i перевозить для кожного поїзда j , $i, j = 1, 2, \dots, N$; G – кількість колій на станції; e_i та l_i – відповідно найраніший та найпізніший сервісні слоти, в які припустимо обслуговувати кожний поїзд $i \in I$; C_{pq} , C_{pq}^* – вартості переміщення порталним краном одного контейнера з поїзда, що розміщений на колії $p \in J_G$, на поїзд, що розміщений на колії $g \in J_G$, для випадків, коли поїзди обслуговуються в одному (C_{pq}) або різних (C_{pq}^*) сервісних слотах; C^r – вартість одного повторного відвідування (revisit). Необхідно знайти оптимальний розклад прибуття поїздів, що визначається сервісними слотами та розміщенням поїздів на коліях в кожному слоті. Цільова функція задачі – це сумарна вартість розкладу прибуття поїздів

$$\begin{aligned} \Psi'(X) = & \alpha_1 \sum_{i \in I} C^r y_i + \alpha_2 \sum_{t=1}^T \sum_{t'=t+1}^T \sum_{p=1}^G \sum_{q=1}^G z_{tt'} A_{\kappa_p^t \kappa_q^{t'}} C_{pq}^* \\ & + \alpha_3 \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^G \sum_{q=1}^G A_{\kappa_p^t \kappa_q^t} C_{pq}, \end{aligned} \quad (12)$$

[4*] Pesch E., Boysen N., Jaehn F. Scheduling Freight Trains in Rail-Rail Transshipment Yards. *Transportation Science*. 2011. Vol. 45. No. 2. P. 199–211.

де T – кількість сервісних слотів; $X = (K^1, K^2, \dots, K^T) \in \mathbb{R}^{G \times T}$ – послідовність усіх сервісних слотів; $K^t = (\kappa_1^t, \kappa_2^t, \dots, \kappa_G^t)$ – сервісний слот $t \in J_T$; $\kappa_g^t \in I, g \in J_G, t \in J_T$ – номер поїзда, що обслуговується в слоті t і розміщений на колії g ; y_i – булева змінна, що залежить від X та дорівнює 1, якщо поїзд i повторно відвідує сортувальну станцію (revisit), тобто входить до 2 сервісних слотів $t \neq t'$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – задані коефіцієнти; $z_{tt'}$ – булева змінна, що дорівнює 1, якщо сервісні слоти t та t' є різними, та 0 – якщо ідентичними.

Змінними задачі є вектор X , що містить послідовність усіх сервісних слотів. Розглядаються обмеження на допустимі слоти прибуття (кожний поїзд $i \in I$ обслуговується не раніше слоту e_i та не пізніше слоту l_i , див. (13)) та на порядок прибуття поїздів (вихідний поїзд прибуває раніше цільового, див. (14))

$$e_{\kappa_g^t} \leq t \leq l_{\kappa_g^t}, t = 1, 2, \dots, T, g = 1, 2, \dots, G \quad (13)$$

$$\kappa_p^t, \kappa_q^{t'} : t \leq t' + y_{\kappa_q^{t'}} \cdot M, t = 1, 2, \dots, T, t' = t, t + 1, \dots, T, p, q = 1, 2, \dots, G \quad (14)$$

Математична модель задачі TYSP2

$$\begin{aligned} \min_{X \in \mathbb{W}} \Psi'(X) \\ \mathbb{W} = \{X \in \mathbb{R}^{G \times T}\}, \end{aligned}$$

де допустимі розв'язання X задовольняють обмеження (13)-(14). Множина допустимих розв'язків описується за допомогою k -множини – кортежу розміщень. Запропоновано метод розв'язання задачі, що полягає в генерації усіх допустимих розкладів та виборі оптимального. Для цього використовується евристика променевого пошуку та узагальнений метод генерації, для чого розроблено правила формування розкладів, що задаються процедурою *GetF_TSY*.

У четвертому розділі наведено опис програмного комплексу, що містить програмні модулі для розв'язання розглянутих задач комбінаторної генерації та оптимізації. Розглянуто приклади роботи розроблених програмних модулів, проведено обчислювальні експерименти та проаналізовано їх результати. У підрозділі 4.1 наведено приклади роботи та скріншоти модуля для генерації k -множин, у підрозділі 4.2 – модуля генерації перестановок з частково заданою сигнатурою. У підрозділі 4.3 описано програмний модуль для розв'язання задачі PDPBS, у підрозділі 4.4 – програмний модуль для розв'язання задачі TYSP2. Виконано порівняння результатів даного дослідження та відомих аналогів. Обчислювальні експерименти проводилися на персональних комп'ютерах Dell Inspiron 5759, Intel Core i5-6200U (2.30GHz), 8 GB RAM, та Lenovo G575, AMD Dual-Core E-450 (1.65 ГГц), 4 GB RAM. Метод розв'язання задачі вивозу і дос-

тавки (PDP) порівняно з двома іншими евристичними методами [5*, 6*]. В результаті аналізу було встановлено, що запропонований в роботі метод дозволяє отримати результати кращі (за значенням цільової функції), ніж в [5*], та співрозмірні з [6*]. Однак за такого порівняння не було можливості враховувати обмеження, унікальні для даної або для інших робіт. Тому було проведено порівняння результатів з повним перебором. Аналіз (рис. 1, 2) показав, що запропонований метод розв'язання задачі PDP дозволяє отримати розв'язок на 1-4 порядки швидше, ніж повний перебір, водночас похибка становить 3-18%. Для задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції (TYSP) проаналізовано ефект від врахування призначення поїздів на залізничні колії. Для цього на кожному з 720 варіантів вхідних даних задачу було розв'язано двічі: без призначення поїздів на колії (як це робилося в попередніх дослідженнях інших авторів, що розв'язували задачу на першому рівні деталізації) та з призначенням (як запропоновано в даній роботі). Для кожної отриманої пари розв'язків розраховано відносне збільшення часу і відносне зниження вартості розв'язку з призначенням поїздів на залізничні колії порівняно з розв'язком без призначення (рис. 3). Аналіз показав, що врахування призначення поїздів на залізничні колії дозволяє знизити витрати на функціонування сортувальної станції на 9-35%.

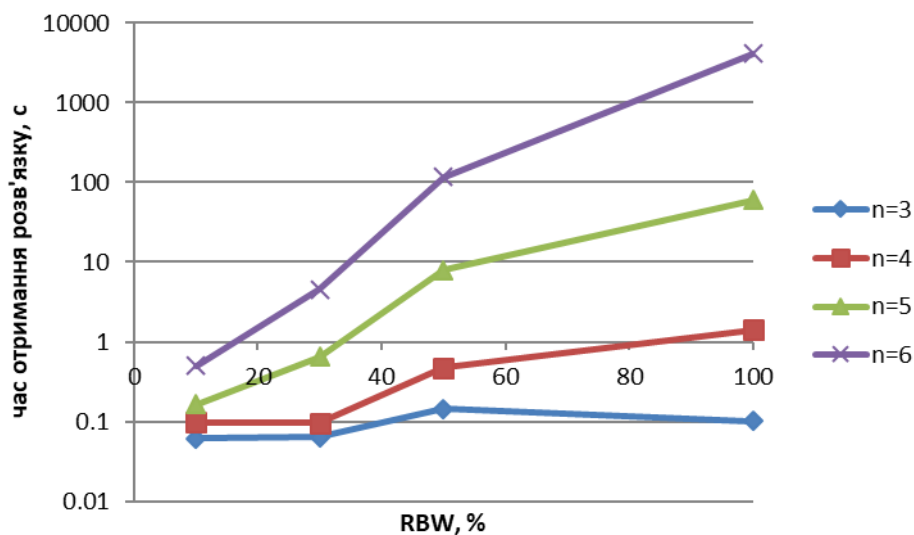


Рисунок 1. Час отримання евристичного ($RBW < 100\%$) та точного ($RBW=100\%$) розв'язків при різних значеннях кількості пар pickup-delivery (n) та відносної ширини променя (RBW , параметр евристики променевого пошуку)

[5*] Ropke S., Cordeau J.-F. Branch and Cut and Price for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*. 2009. Vol. 43. No. 3. P. 267–286

[6*] Renaud J., Boctor F. F., Ouenniche J. A heuristic for the pickup and delivery traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*. 2000. Vol. 27. No. 9. P. 905–916

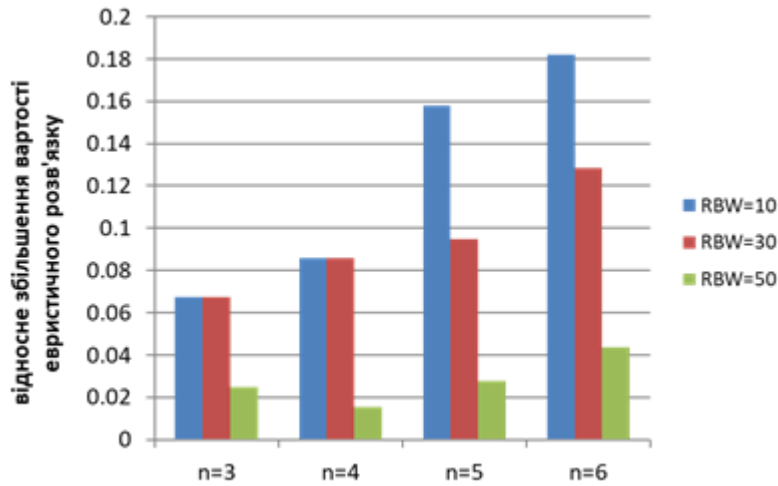


Рисунок 2. Збільшення вартості евристичного розв'язку при різних n та RBW

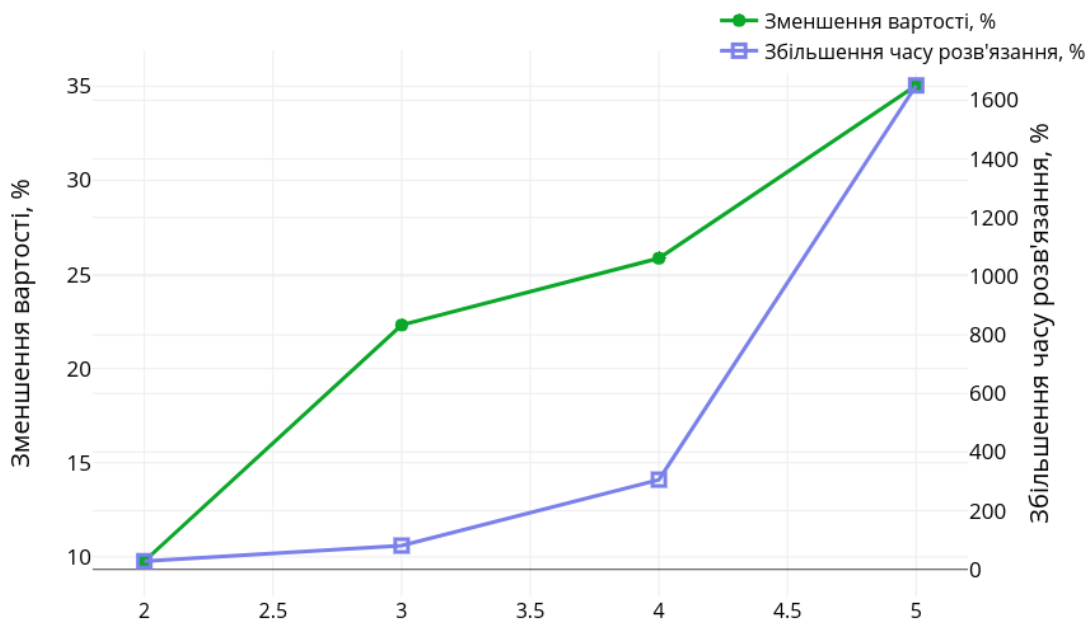


Рисунок 3. Ефект від врахування призначення поїздів на залізничні колії

Додатки дисертації містять: список публікацій здобувача; акти про впровадження в держбюджетні наукові дослідження та виробництво; скріншоти розроблених програмних модулів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розвинуто існуючі стратегії та методи генерації комбінаторних конфігурацій та застосовано їх в математичному і комп'ютерному моделюванні та розв'язанні задач перевезення та обробки вантажів.

1. У роботі проаналізовано сучасний стан таких областей дослідження, як комбінаторна генерація та оптимізація. В результаті аналізу встановлено:

– розвиток стратегій та методів комбінаторної генерації, створення методів генерації k -множин є актуальною задачею;

- нерозв'язаними залишаються задачі перерахунку та генерації перестановок з частково заданою сигнатурою, що є узагальненням перестановок з заданими підйомами та спусками;

- актуальним є дослідження задач перевезення та обробки вантажів, зокрема, задач вивозу та доставки зі спеціальними обмеженнями та задач складання розкладів руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальних станціях.

2. Набули подальшого розвитку стратегії та методи генерації комбінаторних конфігурацій.

3. Розроблено методи генерації k -множин.

4. Введено та досліджено перестановки з частково заданою сигнатурою.

5. Побудовано математичні моделі для задач вивозу і доставки (Pickup and Delivery Problem) і задач складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції, що використовують комбінаторні конфігурації та враховують додаткові обмеження. Розроблено методи розв'язання зазначених класів задач на основі комбінаторної генерації, створено відповідні алгоритми та програмне забезпечення.

Результати обчислювальних експериментів показали, що запропонований метод розв'язання задачі PDP дозволяє отримати розв'язок на 1-4 порядки швидше, ніж повний перебір, водночас похибка становить 3-18%. Врахування призначення поїздів на залізничні колії в задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції дозволяє знизити витрати на переміщення вантажів на 9-35%.

7. Отримані результати є теоретичною і практичною основою для розв'язання широких класів задач комбінаторної генерації та оптимізації. Зокрема:

- стратегія та узагальнений метод генерації комбінаторних конфігурацій можуть бути використані в методах розв'язання задач комбінаторної оптимізації, що використовують комбінаторну генерацію;

- метод та алгоритм генерації k -множин можуть бути використані для математичного моделювання багатьох задач, що мають складну структуру, зокрема, задачі упаковки n -вимірних паралелепіпедів, задачі Pickup and Delivery Problem та задачі складання розкладу вантажних поїздів на сортувальній станції;

- розроблені методи та алгоритми розв'язання задачі Pickup and Delivery Problem можуть бути використані в діяльності транспортних компаній для підвищення ефективності та зниження вартості доставки вантажів;

- метод та алгоритм розв'язання задачі складання розкладу вантажних поїздів можуть бути безпосередньо використані для оптимізації роботи сортувальних станцій, а врахування призначення поїздів на колії – для зниження витрат на роботу порталних кранів.

8. Практичне значення результатів роботи підтверджується їх впровадженням в держбюджетні наукові дослідження та у виробництво, про що свідчать відповідні акти.

9. Можливі напрями продовження досліджень за тематикою дисертації:

- розробка методів та алгоритмів генерації k -множин, а також перестановок з частково заданою сигнатурою, що мають меншу обчислювальну складність порівняно із запропонованими у даній роботі;
- використання більш ефективних методів та алгоритмів кластеризації для розв’язання верхнього рівня задачі вивозу та доставки (Pickup and Delivery Problem);
- розробка більш ефективних методів та алгоритмів для упаковки контейнерів та побудови маршрутів транспортних засобів для розв’язання задачі Pickup and Delivery Problem на нижньому рівні;
- створення більш ефективних методів отримання оптимального призначення поїздів на колії в задачі складання розкладу вантажних поїздів на сортувальній станції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гребенник И. В., Литвиненко А. С. Генерация комбинаторных множеств с заданными свойствами. *Кибернетика и системный анализ*. 2012. № 6 (48). С. 96–105.
2. Гребенник И. В., Титова О. С., Литвиненко А. С. Оптимизация линейной функции на множестве циклических перестановок. *Бионика интеллекта*. 2012. № 2 (67). С. 8–12.
3. Grebennik I., Lytvynenko O. Random generation of combinatorial sets with special properties. *Econtechmod: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes*. 2016. Vol. 5. No. 4. P. 43–48.
4. Stoyan Y.G., Grebennik I.V., Kalashnikov V.V., Lytvynenko O.S. Enumeration and Generation of Permutations with a Partially Fixed Order of Elements. *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 19–30.
5. Dupas Rémy, Grebennik Igor, Lytvynenko Oleksandr, Baranov Oleksij. An Heuristic Approach to Solving the one-to-one Pickup and Delivery Problem with Three-dimensional Loading Constraints. *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*. 2017. Vol.9, No.10. P. 1–12.
6. Grebennik Igor, Dupas Rémy, Lytvynenko Oleksandr, Urniaieva Inna. Scheduling Freight Trains in Rail-rail Transshipment Yards with Train Arrangements. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2017. Vol. 9. No. 10. P. 12–19.
7. Гребенник И. В., Литвиненко А. С. Генерация перестановок с частично определенным порядком следования элементов. *Бионика интеллекта*. 2017. №2 (89). С. 26–30.
8. Гребенник И. В., Литвиненко А. С. Генерация комбинаторных множеств с заданными свойствами. *XIX International Conference 'Problems of decision making under uncertainties': матеріали конф.* 23–27 апреля 2012. Мукачево, Украина. С. 88–89.
9. Grebennik I.V., Lytvynenko O.S., Titova O.S. Optimization of linear functions on cyclic permutations. *XX International Conference 'Problems of decision making under uncertainties': матеріали конф.* 17–21 сентября 2012.

Брно, Чехия. С. 43–44.

10. Grebennik I., Lytvynenko O. Random and exhaustive generation of combinatorial sets with special properties. *5th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE–2014): матеріали конф.* 24–25 ноября 2014. University of National and World Economy (UNWE). София, Болгария. С. 170–177.

11. Dupas R., Grebennik I., Lytvynenko O. Combinatorial mathematical model and decision strategy for one-to-one pickup and delivery problem with 3D loading constraints. *X International Scientific and Technical Conference Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2015): матеріали конф.* 14–17 сентября 2015. Lviv Polytechnic National University. Львов, Украина. С. 133–135.

12. Dupas R., Grebennik I., Lytvynenko O. Three-dimensional one-to-one pickup and delivery routing problem with loading constraints. *V Konferencja Zastosowań Matematyki w Technice, Informatyce i Ekonomii: матеріали конф.* 17 сентября 2015. Instytut Matematyki Wydział Matematyki Stosowanej Politechnika Śląska. Гливице, Польша. С. 26–31.

13. Lytvynenko O., Baranov O., Dupas R., Grebennik I. Three-dimensional one-to-one pickup and delivery routing problem with loading constraints. *6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2016): матеріали конф.* 1–4 июня 2016. Бордо, Франция. С. 101–108.

14. Гребенник И. В., Литвиненко А.С. Перечисление и генерация перестановок с частично заданным порядком следования элементов. *Сучасні проблеми машинобудування: матеріали конф.* 21–22 ноября 2016. Харьков, Украина. С. 26

15. Grebennik Igor, Dupas Rémy, Lytvynenko Oleksandr, Urniaieva Inna. Deciding on train arrangement in freight trains scheduling problem. *7th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE–2017): матеріали конф.* 3–4 ноября 2017. University of National and World Economy (UNWE). София, Болгария. С. 35–41.

16. Grebennik Igor, Lytvynenko Oleksandr. Developing software for solving some combinatorial generation and optimization problems. *7th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE–2017): матеріали конф.* 3–4 ноября 2017. University of National and World Economy (UNWE). София, Болгария. С. 58–64.

АНОТАЦІЯ

Литвиненко О.С. Методи генерації комбінаторних конфігурацій та їх застосування в математичному і комп'ютерному моделюванні задач перевезення та обробки вантажів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, 2018.

У роботі розглянуто методи генерації комбінаторних конфігурацій, а також застосування цих методів в математичному і комп'ютерному моделюванні задач перевезення та обробки вантажів. Отримали подальший розвиток стратегії та методи генерації комбінаторних конфігурацій, запропоновано узагальнений метод генерації комбінаторних конфігурацій. Розроблено методи повної та часткової генерації k -множин. Введено нову комбінаторну множину – перестановки з частково заданою сигнатурою, для якої розв'язано задачі перерахунку та генерації на базі запропонованого методу. Побудовано математичні моделі для задачі вивозу і доставки (Pickup and Delivery Problem) і задачі складання розкладу руху вантажних поїздів та обробки вантажів на сортувальній станції, що використовують комбінаторні конфігурації та враховують додаткові обмеження. Розроблено методи розв'язання цих задач на основі комбінаторної генерації, створено відповідні алгоритми та програмне забезпечення. Методи, алгоритми та програмне забезпечення, розроблені автором, використовуються в програмному забезпеченні для розв'язання задач, пов'язаних з перевезенням та обробкою вантажів.

Ключові слова: комбінаторна генерація, комбінаторна оптимізація, перевезення та обробка вантажів, евристика, задача вивозу і доставки, променевий пошук, k -множини, інтермодальні перевезення.

АННОТАЦИЯ

Литвиненко А.С. Методы генерации комбинаторных конфигураций и их применение в математическом и компьютерном моделировании задач перевозки и обработки грузов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, 2018.

В работе рассмотрены методы генерации комбинаторных конфигураций, а также применение этих методов в математическом и компьютерном моделировании задач перевозки и обработки грузов. Получили дальнейшее развитие стратегии и методы генерации комбинаторных конфигураций, лишь обобщен-

ный метод генерации комбинаторных конфигураций. Разработаны методы полной и частичной генерации k -множеств. Введено новое комбинаторное множество – перестановки с частично заданной сигнатурой, решена задача их перечисления и генерации на базе предложенного метода. Построены математические модели задачи вывоза и доставки (Pickup and Delivery Problem) и задачи составления расписания грузовых поездов и обработки грузов на сортировочной станции, использующие комбинаторные конфигурации и учитывающие дополнительные ограничения. Разработаны методы решения этих задач на основе комбинаторной генерации, созданы соответствующие алгоритмы и программное обеспечение. Методы, алгоритмы и программное обеспечение, разработанные автором, используются в программном обеспечении для решения задач, связанных с перевозкой и обработкой грузов.

Ключевые слова: комбинаторная генерация, комбинаторная оптимизация, перевозка и обработка грузов, эвристика, задача вывоза и доставки, лучевой поиск, k -множества, интермодальные перевозки.

ABSTRACT

Lytvynenko O.S. Methods of generation of combinatorial configurations and their application in mathematical and computer modeling of freight transportation and processing problems. – On the rights of the manuscript.

A Thesis for a Candidate of Engineering Sciences degree in the specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – A. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems NAS Ukraine, Kharkiv, 2018.

The methods of generation of combinatorial configurations, as well as the application of these methods in mathematical and computer modeling of freight transportation and processing problems, are considered in the paper. Strategies and methods for generating combinatorial configurations are developed; a generalized method for generating combinatorial configurations is proposed. Methods of complete and partial generation of k -sets are developed. A new combinatorial set is introduced – permutations with a partially given signature; enumeration and generation problems for these permutations are solved on the basis of using the proposed generalized method. Mathematical models for the Pickup and Delivery Problem and the Transshipment Yards Scheduling Problem are constructed; these models use combinatorial configurations and take into account some additional restrictions. Solution methods for these problems are developed on the basis of using combinatorial generation; corresponding algorithms and software are created. Methods, algorithms and software developed by the author are used in software for solving freight transportation and processing problems.

Keywords: combinatorial generation, combinatorial optimization, freight transportation and processing problems, heuristics, Pickup and Delivery Problem, beam search, k -sets, intermodal transportation.

Підписано до друку 21.01.2019 р. Формат 60х84/16.
Папір офсетний. Цифровий друк.
Тираж 100 прим. Зам. №19012101

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua