

УДК 656.12

DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.10-19

FORMATION OF CARGO PLAN CONTAINER SHIP FOR MULTI PORTS TRANSPORTATIONS

ФОРМУВАННЯ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ ПРИ ЗДІЙСНЕНІ МУЛЬТИПОРТОВИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

A. Ben, Vice-rector of Research KSMA, A. Fedorov, postgraduate, KSMA
А.П. Бень, проректор з науково-педагогічної роботи, А.І. Федоров, аспірант
Kherson State Maritime Academy, Ukraine
Херсонська державна морська академія, Україна

ABSTRACT

Purpose. The article deals with the creation of automated systems for managing cargo operations of container ships.

Method. The main idea of the scientific research is to study the features of the process of loading-unloading of a container ship during its multi-port going's (sequential enter to several ports during the same route). This raises the problem of shifting, i.e. the need to move some containers on board a vessel to accommodate others. The proposed method of placing containers on the basis of logical rules of loading and unloading allows to reduce the time of stay of the vessel in port by reducing the number of "shifting" operations, which has a positive effect on the economic performance of a container ship.

Scientific novelty. The mathematical model of loading of a container ship on the basis of logical rules is developed that allows to take into account simultaneously the multiplicity of execution of trip of the vessel and technological limitations of formation of cargo plan due to the peculiarities of their placement on the ship. The model of formation of the optimal cargo plan of the ship, taking into account the sequence of approach to the ports during the passage, is proposed.

Practical importance. In the practical side, this work is aimed at creating a software product, the use of which will allow to solve an important scientific and applied task in the field of application of information technologies in navigation - increase the efficiency and safety of container transportation due to the creation of an automated containerized cargo operations management system (ACCOMS).

Results. Key areas of research in this field are identified. It has been shown that ACCOMS will simultaneously solve a complex of cargo operations management tasks, which will reduce the time required to perform them and increase the economic efficiency of a vessel's passage. Particularly effective is the application of the proposed approach when it is applied to multi-port transportations carried out by container ships with a small number of containers (feeder transportation).

Keywords: container cargo plan, logical rules for loading and unloading containers, multipoint transportation, automated container cargo operation management system.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Оптимізація вантажного плану контейнеровозу в сучасних умовах зростання обсягів контейнерних перевезень має край важливе значення для світового судноплавства, оскільки при здійсненні вантажних операцій на контейнеровозі вони доволі часто здійснюються за принципом «останній завантажений – перший вивантажений», що призводить до формування неоптимального вантажного плану судна [1,3].

Побудова технологічно обумовлених ланцюжків завантаження-вивантаження контейнерів, особливо, якщо маршрут судна проходить через кілька портів, призводить до виникнення проблеми так званого шифтінга, тобто нераціональних вантажних операцій завантаження-вивантаження контейнерів на судні з метою вилучення лише потрібних в завданому порту контейнерів. Згідно [2], плата за переміщення контейнерів може бути високою, складаючи близько 200 доларів США за один контейнер. Крім того зазначені операції призводять не лише до зростання часу здійснення вантажних операцій, але й впливають на зміну параметрів остійності судна, тому повинні ретельно контролюватися [2].

Таким чином, метою раціонального планування розміщення вантажу на контейнеровозах є мінімізація кількості непотрібних переміщень контейнерів. Важливо також зазначити, що слід враховувати інші параметри, такі як остійність контейнеровозу, вага кожного з контейнерів, та їх тип (стандартний, небезпечний та ін.)

Зменшення кількості шифтінга позитивно впливає на економічні показники перевезення контейнерних вантажів, тому являє собою актуальну наукову та практичну задачу сучасного судноводіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Приймаючи до уваги той факт, що сучасний контейнеровоз зазвичай перевозить кілька тисяч контейнерів, а вищенаведена оптимізаційна задача динамічного програмування є *NP*-повною, безпосереднє розв'язання її лише традиційними методами край ускладнено і потребує додаткового застосування евристичних підходів [4,5].

В ході аналізу робіт, присвячених створенню моделей і алгоритмів розміщення контейнерів на судні і терміналі було визначено, що для вирішення подібних завдань використовуються такі евристичні підходи, як: ітераційний локальний пошук (iterative local search, ils); спрямований локальний пошук (guided local search, gls) [5]; пошук зі змінною околицею (variable neighborhood search, vns); імовірнісний жадібний алгоритм (grasp) [6]; еволюційний алгоритм (evolutionary algorithm, ea); імітація відпалу (simulated annealing, sa); пошук із заборонами (tabu search, ts) [7]; генетичний алгоритм (genetic algorithms, ga); алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ant colony optimization, aco) [8].

Проведений аналіз наукових праць дозволяє стверджувати, що для вирішення поставленої задачі найбільш доцільно застосовувати методи еволюційного програмування у вигляді генетичних алгоритмів у поєднанні з класичними методами вирішення задач динамічного програмування [8].

При цьому також з'являється можливість її додаткового уточнення і ускладнення шляхом введення додаткових обмежень по вазі, розмірам контейнерів, та заздалегідь визначеним місцям розташування окремих груп контейнерів на судні, наприклад рефрижераторних.

Формулювання цілей статті (постановка задачі)

Метою дослідження є розробка математичної моделі завантаження судна-контейнеровоза, що забезпечує зменшення впливу шифтінга контейнерів, і як наслідок сприяє зниженню економічних витрат на виконання рейсу.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Для побудови математичної моделі завантаження судна, без втрати структури оптимізаційної задачі розміщення контейнерів контейнеровозу в цілому, будемо вважати, що:

- 1) контейнерний масив контейнеровозу має прямокутний формат і може бути представлений матрицею з рядками ($r = 1, 2, \dots, R$), стовпчиками ($c = 1, 2, \dots, C$) і беями (відсіками) ($d = 1, 2, \dots, D$), з максимальною ємністю $R \times C \times D$ контейнерів.
- 2) контейнери на судні є однакового (або подвійного) розміру.
- 3) судно починає завантажуватися в порту № 1, куди воно приходить порожнім.
- 4) судно відвідує порти 2, 3, ..., N таким чином, що воно буде пустим в останньому порту, оскільки судно виконує рейс, в якому останній порт N є портом його відходу.
- 5) в кожному з портів $i = 2, \dots, N-1$, судно додатково може бути завантажено контейнерами, призначенням яких є порти $i + 1, \dots, N$.
- 6) контейнеровоз перевозить всі контейнери з порту в порт ніколи не досягаючи при цьому максимально можливої кількості контейнерів на судні.

Кількість контейнерів, що завантажуються в кожному із портів визначається транспортною матрицею

$$T (N-1) \times (N-1)$$

У реальному житті розвантаження та завантаження контейнеровозів здійснюється відповідно до досвіду судноводія, проте значно ефективніше вирішувати цю проблему за допомогою програмних засобів, що виконують розміщення контейнерів на основі логічних правил та евристичних алгоритмів. Зазначений підхід можна краще пояснити, якщо розглянути контейнеровоз у вигляді графу, як наведено на рис. 1.

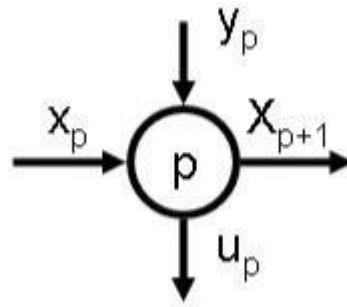


Рис. 1. Вузол і дуги графу процесу завантаження контейнеровоза.

На рис 1. вузол p являє собою порт, в якому відбуваються процеси завантаження та вивантаження судна. Стан контейнеровозу змінюється коли він заходить та виходить з порту p . Зазначені зміни відображаються у вигляді дуг x_p та x_{p+1} , відповідно. Стан x_p перетворюється на x_{p+1} відповідно до двох наступних рішень.

1. Якщо існуючі контейнери вивантажуються в порту p . Це рішення може бути представлено як u_p . Воно може бути розглянуто як сукупність двох змінних:

- змінна q_p визначає контейнери, які повинні бути вивантажені, оскільки порт p є портом їх призначення, або якщо вони блокують собою інші контейнери, призначенням яких є порт p ;

- змінна v_p визначає контейнери, які повинні бути вивантажені для кращого розташування контейнерів на судні, що забезпечить зменшення шифтінгу (переміщення контейнерів) при заходженні судна в наступні порти.

2. Як перезавантажити контейнери судна з порту $1, \dots, p-1$, місцем доставки яких є порти $p+1, \dots, p$, і як завантажувати контейнери з порту p , які будуть перевозитися в наступні порти. Таке рішення визначається змінною y_p .

Слід зазначити, що q_p та v_p можуть істотно змінюватись в залежності від кількості контейнерів, що будуть перезавантажені на судно.

Інакше кажучи, це гарантує, що розташування в контейнеровозі при виході з кожного порту p (x_{p+1}) залежить від розташування контейнерів, коли судно прибуває до порту p (x_p), плюс кількість контейнерів, які завантажуються або вивантажуються у порту p .

Програмна реалізація процесу розміщення контейнерів на судні потребує визначення двох складових:

- розміщення контейнерів на судні може бути представлено тривимірною матрицею B , і при вирішенні оптимізаційної задачі розміщення контейнерів на судні необхідно здійснювати послідовний аналіз її стану для кожного із портів з метою зменшення шифтінгу (кількості контейнерів, що перезавантажуються);

- зміни у стані розміщення контейнерів на судні доцільно здійснювати на основі правил розвантаження та правил завантаження, представлених u_p і y_p відповідно, що може бути здійснено за допомогою евристичних методів та процедур імітаційного моделювання.

Матриця B – схема розміщення контейнерів на контейнеровозі, де кожен елемент в B представлений B_{drc} , і описує контейнер, пунктом призначення якого

є Порт p в комірці, розташованій у рядку r , стовбці c і відсіку d . Матриця B , де $D = 3$ і $R = C = 2$, показана на рис. 2.

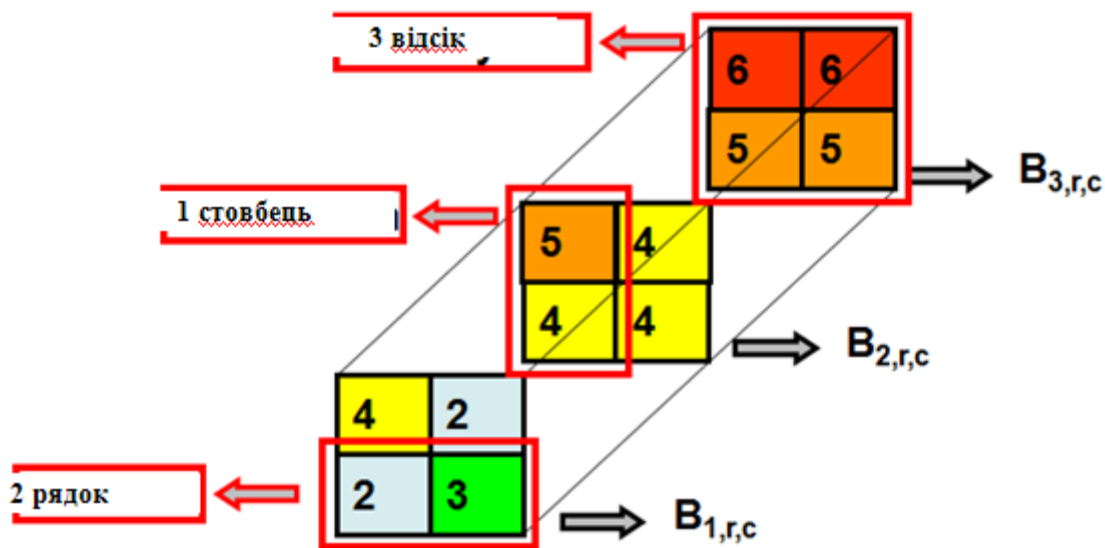


Рис. 2. Матриця стану B , що представляє розташування контейнерів у контейнеровозі при русі до 6 портів

На рис. 2 рядок 2 представляє нижню частину контейнеровозу, а рядок 1 – верхню частину контейнеровозу. Таким чином, елемент (1, 1, 1) дорівнює 4, що означає, що цей модуль зайнятий контейнером, пунктом призначення якого є порт 4. Використовуючи ті ж критерії, елемент (3, 2, 2) дорівнює 5, і це означає, що цей модуль зайнятий контейнером, призначенням якого є порт 5.

Припускаючи, що матриця B на рис. 2 представляє контейнеровоз в порту 2, для розвантаження цього контейнеровозу необхідно перемістити контейнери, розташовані в модулях (1, 2, 1) та (1, 1, 2). Однак контейнер у модулі (1, 2, 1) може бути розвантажений лише якщо контейнер, розташований в комірці (1, 1, 1), теж розвантажений; навіть незважаючи на те, що пунктом призначення цього контейнера є Порт 4. Метою процесу завантаження контейнеровозу (ПЗК) є мінімізація кількості переміщень подібного роду шляхом раціональної схеми розміщення у відсіках контейнеровозу у кожному порту.

Таким чином, запропонований нами підхід розміщення контейнерів за правилами розглядає ПЗК як проблему, в якій матриця B – схема розміщення на контейнеровозі (x_p), до прибуття в Порт p . Вона буде змінюватися у кожному порту шляхом вирішення, як виконувати операції розвантаження (u_p) та завантаження (y_p), визначаючи правила розвантаження та завантаження відповідно.

При цьому вибір ПР або ПЗ для порту 2 може опосередковано впливати на схему розміщення на контейнеровозі в Порті 4, як це показано в графічному поданні ПЗК на рис. 3.

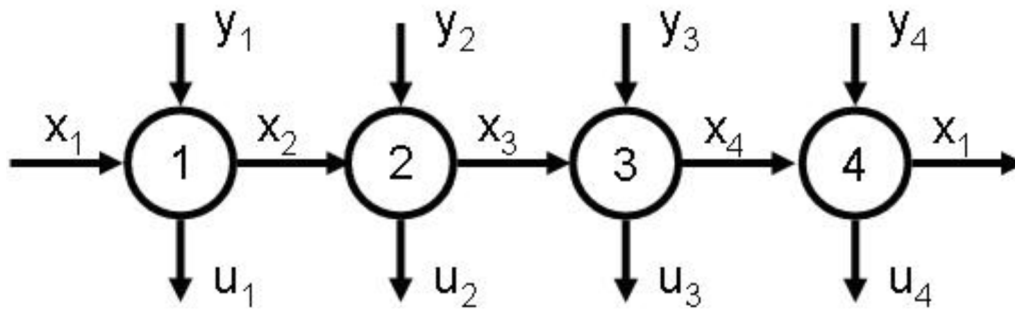


Рис. 3. Графічне подання ПЗК з чотирма портами призначення

Нами було визначено 6 основних правил завантаження контейнеровозу та 2 правила вивантаження, а саме:

Правило завантаження ПЗ1: за цим правилом матриця B заповнюється рядок за рядком, зліва направо, починаючи з нижнього ряду для кожного відсіку таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення були розміщені на найнижчих рядках, і кожен відсік заповнюється перед наступним.

Правило завантаження ПЗ2: за цим правилом матриця B заповнюється рядок за рядком, зліва направо, починаючи з першого відсіку, і заповнюючи лише один рядок на відсік таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення були розміщені в найнижчих рядках і розподілені між відсіками.

Правило завантаження ПЗ3: це правило є зворотним ПЗ1, що означає, що матриця B заповнюється рядок за рядком, справа наліво, починаючи з нижнього ряду для кожного відсіку таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення були розміщені в найнижчих рядках і кожен відсік заповнюється перед початком наступного.

Правило завантаження ПЗ4: це правило є зворотним ПЗ2 в тому сенсі, що матриця B заповнюється рядок за рядком, справа наліво, один рядок на відсік починаючи з першого відсіку, доки не досягне останнього таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення розміщуються на найнижчих рядах і розподілялися між відсіками.

Правило завантаження ПЗ5: за цим правилом матриця B заповнюється рядок за рядком зліва направо контейнерами, призначеними для найближчого порту, починаючи з першого відсіку та продовжуючи, доки в стовпчику не буде досягнуто кількість елементів θ_p . Значення θ_p обчислюється за рівнянням:

$$\Theta_p = \left[\frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=p+1}^N T_{ij}}{D * C} \right]. \quad (1)$$

Потім інший відсік заповнюється таким чином, щоб контейнери з найближчим призначенням були розміщені спочатку для формування штабелів.

Правило завантаження ПЗ6: це правило є зворотним ПЗ5 в тому сенсі, що матриця В заповнюється рядок за рядком справа наліво контейнерами, призначеними для найближчого порту, починаючи з першого відсіку і продовжуючи, доки не досягається кількість елементів θ_p у стовпчику. Значення θ_p також обчислюється за вищенаведеним рівнянням.

Правило розвантаження ПР1: припустимо, що контейнеровоз прибуває у Порт p . За цим правилом вилучаються лише контейнери, пунктом призначення яких є Порт p , і всі інші, що блокують штабель.

Правило розвантаження ПР2: це правило зазначає, що контейнеровоз повинен розвантажувати кожен контейнер при прибутті в певний Порт p таким чином, щоб він міг повністю перебудувати кожен штабель.

Для зручності кодування правил, шість ПЗ і два ПР, описані вище, можуть бути об'єднані для створення нових 12 правил (підсумкових правил - ПП).

При цьому ПП1=ПЗ1+ПВ1, ПП2=ПЗ1+ПП2, ПП3=ПЗ2+ПП1, ПП4=ПЗ2+ПП2 і т.ін.

Для збереження умов остійності судна необхідно додатково обчислювати суму відстані між центром маси та геометричним центром контейнеровозу у кожному відсіку d .

Для вирішення оптимізаційної задачі ПЗК нами застосовуються методи імітаційного моделювання, якими визначаються набори логічних правил та послідовність їх застосування. При цьому в якості цільової функції виступає мінімізація шифтінгу контейнерів, а в якості обмежень – збереження параметрів остійності судна.

Найбільш ефективним та відносно нескладним з евристичних методів в плані практичної реалізації, враховуючи існуючі програмні продукти (Mathlab, Simulink) тощо були обрані генетичні алгоритми (ГА).

Відповідно вирішення проблеми оптимального завантаження контейнеровозу було розроблено ГА з наступною структурою.

Структура ГА. ГА використовує сукупність елементів, що представляють собою: $A(t) = \{A_1^t, \dots, A_n^t\}$ для кожної генерації (ітерації) t , в якій кожен елемент – це вектор правил. У процесі обчислення, сукупність елементів зберігається в матриці $A(t)$, і кожен рядок A_i^t представляє цей вектор правил. Кожен вектор A_i^t оцінюється за кількістю переміщень та показником остійності. Далі розраховується придатність, тобто міра того, наскільки успішним є цей елемент в задачі розміщення контейнерів.

Придатність розраховується для всієї сукупності контейнерів і враховує найбільш ефективні елементи (варіанти розміщення), які утворюють нову сукупність $t + 1$. Під час формування нової сукупності окремі елементи з сукупності t надаються процесом перетворення генетичними операторами для формування нових правил.

Ці перетворення включають в себе унарні операції m_i (мутації), які дозволяють створювати нові правила за допомогою невеликих змін окремих

атрибутів ($m_i: A_i \rightarrow A_j$) і перетворення верхнього порядку c_j (кросовер), що генерує нові елементи, об'єднуючи один або декілька елементів ($c_j: A_j \times \dots \times A_k \rightarrow A_j$).

Зазначений процес здійснюється до досягнення визначеної раніше попередньої кількості генерацій. Наступним важливим етапом є кодифікація структури даних для кожного окремого елемента.

Кодифікація структури даних для кожного окремого елемента. Кожний елемент ГА асоціюється з набором правил за допомогою вектора v , наприклад, чотирьохелементного. Значення всередині елементів відповідають кожній комбінації логічних правил (від ПП1 до ПП12), яка буде застосовуватися у кожному Порту (від 1 до 4). Набір правил для різних елементів зберігається в матриці, а кожен стовпець представляє окремий елемент, показано на рис. 4, де матриця A має два вектори v_1 і v_2 , з номерами правил ПП1-ПП12.

Порт	Елемент 1	Елемент 2
1	6	3
2	1	5
3	12	10
4	2	7

v_1 v_2

Рис. 4. Відношення між кодуванням елементів ГА та набором правил для кожного елемента.

Оскільки кожен стовпець матриці A представляє елементи / рішення, кожен елемент $A(i, j) = k$ визначає, яке правило k (k дорівнює 1-12) в Порту i буде використовуватися, якщо вибрати елемент j . Наприклад, $A(1, 1) = 6$ означає, що елемент / рішення 1 у Порту 1 повинен застосувати правило 6, тобто розвантаження контейнеровозу за ПР2 та завантаження за ПЗ3.

Оцінка придатності рішення чи доцільність варіанта розміщення відповідає за оцінку елемента в межах сукупності в генерації t і розраховується за формулою:

$$Fit(A_i) = f(A_i), \quad (2)$$

де: $f(A_i)$ – оцінка придатності, згідно з комбінацією кількості переміщень контейнерів та дотримання вимог остійності судна.

Іншими словами, вона відображає рішення, сформовані набором правил, що зберігаються в векторі A_i , з точки зору кількості переміщень та дотримання остійності судна при різних варіантах розташування контейнерів в контейнеровозі, коли він подорожує від порту до порту. Наступним кроком є вибір елементів для формування наступної генерації.

Процес формування варіантів розміщень – це випадковий вибір («колесо рулетки»), де ймовірність $Q(A_i)$ використовується для вибору елемента A_i для наступної генерації. Значення $Q(A_i)$ можна отримати, використовуючи рівняння (3).

$$Q(A_i) = \text{Fit}(A_i) / \sum_{i=1}^{\text{numprop}} (\text{Fit}(A_i)). \quad (3)$$

Найкращий елемент поточної генерації завжди залишається в наступній генерації. З метою отримання нових елементів застосовуються оператори кросовера і мутації. Остаточне рішення з розміщення контейнерів формується відповідно до вищого показника $\text{Fit}(A_i)$, коли для інших елементів цей показник відрізняється не більше ніж на 10%.

Запропонований новий комбінований підхід до задачі тримірною планування завантаження контейнеровозів, що має наступні переваги:

- дозволяє здійснювати компактне кодування, що дає можливість спростити обробку даних на вирішення проблеми з оптимального розміщення контейнерів;

- досвід кваліфікованого персоналу може бути включений в процес оптимізації у формі правил та обчислювального моделювання;

- формування рішення з розміщення з використанням запропонованих математичних моделей завжди дозволяє досягнути оптимального або квазіоптимального рішення, та дозволяє знизити витрати часу на розробку вантажного плану.

- новий підхід до кодування значно зберігає час на обчислення і дозволяє формувати якісні рішення з розміщення контейнерів на судні.

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

В результаті проведеного аналізу наукових досліджень у зазначеній галузі, було з'ясовано, що питання створення АСУВОК є актуальною науковою проблемою сьогодення, яка потребує вирішення з урахуванням нагальних поточних потреб морської індустрії.

Визначено, що в умовах запровадження сучасних інформаційних технологій в судноводінні найважливішою складовою підвищення ефективності та безпечності контейнерних перевезень стає створення АСУВОК.

Аналіз наукових публікацій, який було проведено у даній роботі, дозволив розробити власну модель і алгоритм розміщення контейнерів на судні, що оптимізує процес складання вантажного плану судна, сприяє підвищенню безпеки контейнерних перевезень.

Застосування запропонованого підходу до побудови вантажного плану контейнеровозу дозволяє також поліпшити економічні показники виконання судном рейсу за рахунок зменшення часу виконання вантажних операцій та тривалості стоянки судна в портах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vacca, I., Bierlaire, M. & Salani, M. (2007). Optimization at container terminals: status, trends and perspectives. 7-th Swiss Transportation Research Conference, September, 1–21.
2. Fan, L., Low, M. Y. H., Ying, H. S., Jing, H. W., Min, Z. & Aye, W. C. (2010). Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists, III, 1–7.
3. Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006). Multi-objective simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. European Journal of Operational Research, 171, 3, 373–389.
4. Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. European Journal of Operational Research, 44, 2, 145–159.
5. Sciomachen, A. & Tanfani, E. (2007). A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity. European Journal of Operational Research, 183, 3, 1433–1446.
6. Wilson, I. & Roach, P. A. (1999). Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning. Journal of Heuristics, 5, 4, 403–418.
7. Valente, J. M. S. & Alves, R. A. F. S. (2005). Filtered and recovering beam search algorithm for the early/tardy scheduling problem with no idle time. Computers & Industrial Engineering, 48, 2, 363–375.
8. Dubrovsky, O., Levitin, G. & Penn, M. (2002). A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. Journal of Heuristics. 8, 6, 585–599