

УДК 519.85

DOI: 10.32626/2308-5916.2026-29.108-121

Пилипюк Т. М.

ORCID: 0000-0002-4676-9830,

канд. фіз.-мат. наук, Кам'янець-Подільський національний
університет імені Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський, Україна,
E-mail: pylypyuk.tetiana@kpnpu.edu.ua

Щирба В. С.

ORCID: 0000-0002-2520-5825,

канд. фіз.-мат. наук, Кам'янець-Подільський національний
університет імені Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський, Україна,
E-mail: shchyrba.viktor@kpnpu.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ПРИ ЗАВАНТАЖЕННІ КОНТЕЙНЕРОВОЗА

У роботі запропоновано комплексний підхід до моделювання вантажних операцій на сучасному контейнеровозі як складної розподіленої системи, що функціонує в умовах реального часу. Автори представляють оригінальну декомпозицію процесу на п'ять функціональних потоків: логічне планування, крани, портовий транспорт, баластна система та контролюючий модуль. Такий підхід дозволяє детально розглянути механізми синхронізації та обміну повідомленнями між підсистемами, що мають конфліктні цільові установки.

Особливу увагу приділено генезису наукової думки в галузі морської логістики. Автори аналізують перехід від статичних моделей «ЗД-пакування» початку 2000-х років [13] до сучасних динамічних систем інтегрованого планування та багатопотокового моделювання [11, 15, 16]. Важливою є інтеграція вітчизняного наукового досвіду: від нормативного забезпечення безпеки небезпечних вантажів [7] до розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та рейсового планування [1, 3, 5, 9].

Центральним науковим меседжем є обґрунтування переходу від описового опису процесів до побудови оптимізаційної моделі. Через формалізацію адитивної цільової функції витрат продемонстровано методи пошуку парето-ефективного балансу між швидкістю обробки судна, енергозатратами на стабілізацію та дотриманням фізичних інваріантів системи

Стаття надійшла до редакції: 20.03.2026

Рекомендовано до друку: 02.04.2026

Оприлюднено (online): 15.05.2026

Ця стаття розповсюджується на умовах ліцензії CC Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0

(остійність, метацентрична висота). Робота формує розуміння судна не як статичного об'єкта, а як динамічного цифрового середовища, де ефективність досягається через складну співпрацю розподілених обчислювальних процесів.

Ключові слова: *планування розміщення вантажу, багатопотокова система, багатокритеріальна оптимізація, евристичні алгоритми, програмна синхронізація, атомарність.*

Вступ. Задача завантаження контейнеровоза (Container Stowage Planning – CSP) є однією з найскладніших багатофакторних задач у морській логістиці, яка поєднує в собі питання дотримання вимог безпеки судна (стабільність, осадка, вантажний момент), операційну ефективність (час проведення операцій завантаження/розвантаження, поромні витрати), економіку логістичного ланцюга (витрати на портові операції, черги суден тощо). Це задача з багатьма обмеженнями: вагові, геометричні, пріоритети вантажів, обмеження портових послідовностей, обмеження щодо небезпечних вантажів, а також додаткові критерії такі, як, наприклад, мінімізація перерозподілу вантажів.

Ця задача належить до класу NP-повних задач і характеризується високою обчислювальною складністю [13, р. 251; 17, р. 2, 3]. Спроба охопити дослідження в межах єдиної системи призводить до надмірного зростання кількості вимог і, як наслідок, до прояву так званого «прокляття розмірності». У зв'язку з цим доцільно застосувати декомпозиційний підхід, що передбачає формування розподілених взаємозалежних підсистем (потоків).

Контейнеровоз, як розподілена обчислювальна система, це масив інформації у сотні тисяч даних. Кожен запис у цю «пам'ять» змінює фізичний стан усієї системи. Задача автоматизації завантаження контейнеровоза поєднує в собі необхідність опрацювання великих масивів даних (логічне планування), керування обладнанням (крани, баласт) у реальному часі та дотримання жорстких інваріантів системи (остійність та безпека).

Аналіз літературних джерел. Питання ефективного використання обладнання, вузькі місця портової інфраструктури та дотримання вимог безпеки отримали значну увагу як з боку науковців, так і практиків.

На межі тисячоліть домінував погляд на судно як на статичний склад. Зокрема, в ключових роботах Sciomachen & Tanfani (2003, 2004) формалізували задачу завантаження як Master Bay Plan Problem. У центрі уваги стояла математична аналогія з тривимірним пакуванням контейнерів (3D bin packing problem). Головним досягненням цього періоду було створення алгоритмів, що здатні заповнити простір судна з дотриманням жорстких фізичних обмежень, описаних у Cargo Securing Manual [14].

Поки світова спільнота відточувала алгоритми Bin Packing, українські вчені зосередилися на критичній безпеці та специфіці небезпечних вантажів. Праці Кузнецова С. А. та Халупенка В. А. (2006) заклали методичну базу для перевезення небезпечних об'єктів, що пізніше знайшло відображення в оновленнях Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» (2021) та дотриманні Міжнародної конвенції про безпечні контейнери. Це етап формування «жорстких обмежень» системи, без яких жодна оптимізація не має сенсу.

Зі зростанням інтенсивності світової торгівлі стало очевидно, що щільно завантажене судно може стати «логістичною пасткою» в наступному порту. Пріоритет змістився на динаміку. Dean & Chow (2015) здійснили концептуальний перехід: вони довели, що ефективність визначається не статикою в порту завантаження, а мінімізацією переміщень (re-handles) протягом усього маршруту. Нікольський В. В. та ін. (2017) пропонують не просто плани, а Системи контролю завантаження. Водночас Власенко Е. А. та Цимбал Н. Н. (2018) зміщують фокус на «допустиму загрузку», деталізуючи особливості складання вантажного плану як багатокритеріальної задачі, де остійність судна є головним інваріантом.

До 2021 року наукова думка остаточно відмовилася від розгляду судна як ізольованого об'єкта. Ali Skaf та ін. (2021) підняли планку складності, запропонувавши моделі для одночасного розвантаження та завантаження. Стало зрозуміло, що потрібен інтегрований підхід, де причальні крани, тягачі та складські крани працюють як єдиний механізм, з можливістю паралельного розвантаження та завантаження. Це наштовхнуло на ідею багатопотокового моделювання.

Справжнім проривом у переході до «інтелектуального менеджера» стала дисертація Цимбал М. М. (2021). Автор виходить за межі одного порту, розглядаючи рейсове планування. Це ідеально корелює з ідеями Dean & Chow (2015) щодо мінімізації перестановок, але з глибшим математичним обґрунтуванням для мультипортових ротацій. Майже одночасно Бень А. П. та Соколов А. В. (2021) формалізують це у вигляді системи підтримки прийняття рішень, яка стає інтелектуальним ядром для формування бей-планів.

Найсучасніший етап, представлений роботами Yating Duan (2023) та Pylypiuk & Shchyrba (2025), демонструє перехід до Bi-Objective Integrated Scheduling. Це стало теоретичним фундаментом для розуміння того, що сучасний порт – це не послідовність операцій, а паралельна робота багатьох незалежних, але синхронізованих процесів. Дослідження Каменева К. І. та Каменєвої А. В. (2022-2023) демонструють використання адитивних алгоритмів для розміщення небезпечних вантажів та врахування черговості завантаження. Роботи

доводять, що сучасний бей-план – це результат роботи складної математичної моделі, яка враховує не лише де взяти контейнер, а й у якій послідовності він має бути доступний для крана.

Виклад основного матеріалу. Сучасні технології розподілених систем вимагають від розробника моделі не лише вміння розбивати задачу на окремі модулі, а й глибокого розуміння природи їхньої взаємодії. Помилка в синхронізації потоків призводить до катастрофічних наслідків. Наша задача: спланувати завантаження так, щоб забезпечити максимальну паралелізацію процесів, не порушивши інваріантів безпеки (остійності, міцності) та логіки маршруту.

Якщо ми спробуємо керувати завантаженням з одного потоку, ми отримаємо чергу, яка зробить роботу порту нерентабельною. Тому ми розіб'ємо систему на п'ять функціональних доменів, кожен з яких матиме свою зону відповідальності.

Наукова гіпотеза такого підходу дослідження задачі CSP, де головною метою планування є мінімізація тривалості виконання робіт, полягає у припущенні про можливість формування умовно незалежних оптимізаційних підзадач, пов'язаних з плануванням та проведенням завантажувально/розвантажувальних робіт контейнеровозу, оптимізаційні розв'язки яких в кінці кінців націлені на мінімізацію затрат при виконанні всього комплексу робіт. Декомпозиція задачі на розподілені модулі дозволяє не просто пришвидшити процес розвантаження (завантаження), мінімізуючи дорогоцінний час простою контейнеровоза в порту, але й запровадити динамічне перепланування безпосередньо під час вантажних операцій, що є критично важливим для сучасної логістики.

В тактичному плані задача CSP природно розбивається на два етапи: побудова оптимізаційного плану розміщення контейнерів, яка розв'язується ще до прибуття судна в порт та безпосереднє виконання вантажних операцій уже при перебуванні судна в порту. На перший погляд, це незалежні задачі, але забезпечення їх успішного розв'язання потребує дотримання вимог оптимізації – раціональної організації комплексу навантажувально/розвантажувальних робіт, що поєднують мінімізацію часу простою судна з мінімізацією фінансових затрат на забезпечення виконання вантажних операцій з дотримання вимог безпеки.

Задача першого етапу «як фізично вмістити контейнери?» має сорокарічну історію і для її розв'язання розроблено чимало як точних, так і евристичних алгоритмів. При декомпозиційному підході дослідження такої задачі доцільно виділити контейнери в окремий потік (систему). Математично кожен k -тий контейнер, зазвичай, задається вектором $(ID_k, P_DEST_k, VG_k, T_TYPE_k, C_CLASS_k, R_REQ_k, P_LOG_INIT_k)$, координати якого відображають, відповідно, інвентарний номер (ID_k) , порт призначення (P_DEST_k) , фактичну вагу (VG_k) ,

тип контейнера (T_TYPE_k), клас небезпечного вантажу (C_CLASS_k), потребу в рефрижераторному живленні (R_REQ_k), початкове місце розташування контейнера на терміналі ($P_LOG_INIT_k$).

Математично елементи комірок контейнеровоза (слоти) задають бінарною функцією, яка кожному слоту прописує нуль, якщо слот порожній, або P_DEST_k , якщо k -тий контейнер розміщено у цьому слоті. Тоді задачу розміщення контейнерів можна досліджувати методами математичного бінарного програмування.

При плануванні вантажних робіт в першу чергу враховують обмеження щодо небезпечних вантажів (якщо планується їх перевезення). «Всі небезпечні вантажі розподілені на 9 класів і 7 підкласів...» [7, с. 6]. Далі доцільно розглянути розміщення нестандартних контейнерів, які потребують особливих умов. До основних нестандартних типів належать: Reefer, Tank, Open Top, Flat Rack, Pallet Wide та Hard-Top [7]. Розподіл контейнерів інших типів здійснюють в останню чергу.

Варіантів допустимого плану перевезень може бути дуже багато. Постає питання про вибір найбільш оптимального плану розміщення контейнерів, який гарантує виконання безпеки судноплавства.

При штабелюванні контейнерів більш важкі контейнери повинні розташовуватися нижче більш легких (за вагою контейнерів має бути спадна послідовність знизу вгору) і, отже, важчі контейнери мають завантажуватися в першу чергу. Крім того, сумарна вага контейнерів у штабелі не має перевищувати гранично допустимого значення.

На основі сформованого плану розміщень генерується послідовність вантажних операцій згідно з критеріями безпеки та мультипортової логістики. За дотриманням плану її реалізації та внесенням корекції при виникненні збоїв у роботі портової системи контроль здійснює окремий – логістичний потік.

При застосуванні мультипортових маршрутів логістичний потік додатково повинен відслідковуватися, щоб останніми по вертикалі штабеля завантажували ті контейнери, які відповідно до послідовності заходження судна в порти потрібно розвантажити першими.

Гарантування безпеки перевезень є ключовим моментом в морській логістиці. Тому при паралельних розрахунках систему перевірки умов безпеки варто розглядати як окремий контролюючий потік. До функцій контролюючого потоку входить завдання слідкувати за дотриманням вимог остійності судна при кожному вивантаженні/завантаженні контейнера та перевірка статички судна після завершення всіх вантажних операцій (вимоги до безпеки під час руху судна можуть бути іншими, більш жорсткими ніж під час перебування в порту). Статика судна залежить від розподілу ваги на судні.

Зокрема, поперечна рівновага судна повинна перебувати в межах допустимого діапазону, тобто загальна вага на правій стороні

судна не повинна значно відрізнятись від ваги на лівій стороні. Якщо на судно з початковою вагою W_{init} і початковим поперечним центром ваги T_{init} встановлюється контейнер з вагою VG_k у T_k , то нове значення поперечного центру ваги судна визначається за формулою (1) [16]:

$$T_{new} = \frac{W_{init} \cdot T_{init} + VG_k \cdot T_k}{W_{init} + VG_k}, \quad (1)$$

де T_k – поперечна координата встановлення вантажу.

Зміна поперечної координати призводить до зміни крену судна. Аналогічно, за формулою (2):

$$L_{new} = \frac{W_{init} \cdot L_{init} + VG_k \cdot L_k}{W_{init} + VG_k}, \quad (2)$$

де L_{init} – початковий повздовжній центр ваги, L_k – повздовжня координата штабеля, в яку вставляється контейнер. Визначається нове значення повздовжньої координати центру ваги судна, зміна якої призводить до зміни диференту судна. Зміна остійності судна пов'язана зі зміною вертикальної координати, нове значення якої визначається за формулою (3):

$$V_{new} = \frac{W_{init} \cdot V_{init} + VG_k \cdot V_k}{W_{init} + VG_k}, \quad (3)$$

де V_{init} – початковий повздовжній центр ваги, V_k – повздовжня координата штабеля, в яку вставляється контейнер.

Використовуючи спеціальні (індивідуальні для кожного судна) таблиці, за зміщенням координат визначають зміщення крену, диференту та осадки судна і контролюючий потік відслідковує, щоб ці значення не перевищували допустимі показники. На практиці можна скористатися апроксимаційними методами.

Крен судна, який є кутовим відхиленням від вертикалі (де $T = 0$, або інше задане ідеальне значення) в поперечній площині від центральної площини судна, критично залежить від поперечної координати центру тяжіння. При моделюванні припускаємо, що для малих відхилень ΔT крен (φ) зростає лінійно (пропорційно ΔT):

$$\varphi = f(T) \approx \begin{cases} k_1 T, & \text{якщо } |T| \leq T_{\max}, \\ k_2 T + const, & \text{якщо } |T| > T_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

де T – поточна поперечна координата центру ваги; T_{\max} – поріг, після якого чутливість до крену зростає; k_1 і k_2 – константи нахилу, що задаються на основі теоретичної (спрощеної) чутливості судна, і $k_1 < k_2$ (що означає більшу чутливість до крену після певного порогу).

Для більших відхилень (наприклад, понад певний поріг $\pm T_{\max}$, але не критичний) ми можемо змінити кут нахилу лінійного сегмента або ввести штаф за перевищення допустимого крену.

Аналогічно можна імітувати залежність диференту ($Trim$, τ) від зміщення поздовжнього центру тяжіння (ΔL) від ідеальної (нульової) поздовжньої координати.

Модель припускає, що для малих відхилень ΔL диферент τ зростає лінійно (пропорційно ΔL). Для більших відхилень (наприклад, понад певний поріг $\pm L_{max}$) ми аналогічно можемо змінити кут нахилу лінійного сегмента або ввести штраф за перевищення допустимого диференту.

Функція апроксимації:

$$\tau = f(L) \approx \begin{cases} \alpha_1 L, & \text{якщо } |L| \leq L_{max}, \\ \alpha_2 L + const, & \text{якщо } |L| > L_{max}, \end{cases} \quad (5)$$

де α_1 і α_2 – константи нахилу, що задаються на основі теоретичної (спрощеної) чутливості судна, і $\alpha_1 < \alpha_2$ (що означає більшу чутливість до диференту після певного порогу).

Осадка судна (глибина занурення) залежить від загальної ваги судна, що є сумою власної ваги судна, ваги вантажу та ваги баласту. Ми будемо імітувати залежність осадки від загальної доданої ваги вантажу та баласту (ΔW).

Для нашої моделі припустимо, що в робочому діапазоні завантаження зміна осадки ΔD є лінійно пропорційною зміні загальної ваги ΔW . При наближенні до D_{max} або в небезпечних зонах модель може використовувати інший, більш крутий лінійний сегмент сплайну, щоб відобразити збільшення опору зануренню, або накласти жорстке обмеження.

Функція апроксимації:

$$D = D_{init} + g(\Delta W) \approx \begin{cases} m_1 \Delta W, & \text{якщо } \Delta W \leq W_{\Delta max}, \\ m_2 \Delta W + const, & \text{якщо } \Delta W > W_{\Delta max}, \end{cases} \quad (6)$$

де ΔW – зміна осадки судна; $W_{\Delta max}$ – поріг доданої ваги, що відповідає безпечній осадці D_{max} ; m_1 – константа, що задає лінійний зв'язок між вагою та осадкою (спрощений показник водотоннажності). Якщо ΔW перевищує певний поріг D_{max} , використовується інший коефіцієнт m_2 для імітації зміни геометрії занурення.

На завершальному етапі вантажних операцій необхідно досягти оптимальних для даного судна показників остійності, зокрема, диференту та осадки, що під час руху судна забезпечить якомога менший опір води та економію палива. Крім того, при низькому центрі ваги судно стає жорстким, що призводить до дуже різкої, швидкої хитавиці. Це призводить до колосальних прискорень, які можуть обірвати кріплення контейнерів та створює дискомфорт для роботи екіпажу. З іншої сторони, високий центр ваги робить хитавицю повільною та плавною (комфортною для екіпажу), але судно довше залишається в нахиленому стані, що небезпечно при сильному вітру.

З метою збільшення пропускної здатності порту, ми запускаємо декілька паралельних міні потоків (за кількістю кранів), які фізично незалежні, але кожен з них змінює стан судна. З позицій моделювання крани – це паралельні обчислювачі, що виконують безпосередній запис у «спільну пам'ять» (розміщення вантажу). Вони конкурують один з одним, адже кожен з них намагається виконати свою задачу якнайшвидше, при цьому змагається за спільний ресурс – простір на судні.

З метою прискорення процесу вантажних робіт для них потрібно провести темпоральну декомпозицію, закріпивши за кожним краном деяку рівноцінну частину виконання запланованих робіт.

Доцільно крани і припортову техніку, які безпосередньо забезпечують переміщення контейнерів, віднести до окремих потоків: крани та припортовий транспорт.

Припортовий транспорт відповідає за логістику припортової зони. Його головна мета мінімізувати час очікування кранів. Він діє як інтелектуальний буфер між складом та кранами. Внутрішньопортова техніка (автомобілі, залізничний транспорт тощо) включає транспортні засоби з переміщення контейнерів по причалу: горизонтальні (для переміщення з одного місця в інше, наприклад, автомобілі для доставки контейнерів зі складу) та вертикальні для штабелювання контейнерів у відведених місцях.

Організація роботи з підвезення і розміщення в порту контейнерів, які підлягають завантаженню їх на судно (експортуванню), та розміщення і відвезення вивантажених контейнерів (імпортування) багато в чому залежить від специфічних особливостей кожного порту. Тут важко передбачити уніфіковані стандартні дії. Це є в основному одноразова задача.

Контролюючий потік відслідковує безпечні зони роботи кранів, послідовність розміщення контейнерів по вертикалі, розраховує нові координати центру ваги судна після кожного встановленого контейнера, на підставі чого перевіряє, чи остійність судна перебуває в межах норми. Це потік-супервізор, що має право вето на будь-яку операцію, «останній рубіж», який перевіряє команди на відповідність правилам безпеки безпосередньо перед виконанням.

При потребі повернути показники остійності в допустимий діапазон контролюючий потік активує роботу баластної системи, яку, в свою чергу, варто виділити в окремий потік. Цей потік не працює постійно, а лише при потребі перерозподілити баластну воду для компенсації крену та диференту.

Після того, як ми визначили ролі кожного потоку, опишемо, як вони обмінюються інформацією. У розподілених системах зв'язки визначають рівень залежності та автономності компонентів.

У нашій системі потік контролю виступає як центральний «комутатор» або шина повідомлень, через яку проходять критичні сигнали.

Зв'язок між логічним потоком і кранами полягає в передачі чергового завдання відповідно до плану вантажних робіт. Логічний потік не чекає завершення роботи крана, а лише наповнює його чергу. Система контролю перевіряє допустимість виконання цього завдання. Якщо немає порушень умов безпеки, то дозволяє його виконати. Якщо ж виявлено порушення, то робота крану миттєво блокується.

Зв'язок між кранами і припортовою системою полягає в тому, що кран подає запит на готовність місця, куди кран планує розмістити імпортований контейнер, або чи в зазначеному місці уже розміщено контейнер, який підлягає експортуванню (можливо його ще не встигли підвезти). Контрольний потік в залежності від відповіді припортової системи дозволяє чи тимчасово блокує роботу крану. Припортовий транспорт не спілкується з краном напряду. Він доставляє контейнер у потрібну зону, а кран перевіряє чи зазначений контейнер міститься в цій зоні. Це зменшує залежність потоків один від одного. Транспортний потік наповнює буфер (зону очікування), а крани зчитують з нього завдання.

Судно розділене на секції. Два крани не можуть працювати в одній секції одночасно, оскільки це призведе до зіткнення стріл. Для уникнення цього використовують семафор.

У нашій системі зв'язок між краном та баластом не є прямим. Будь-яка спроба змінити стан системи проходить через контролюючий потік. Якщо робота крану змінює вагу в деякій точці судна на стільки, що параметри остійності наближаються до критичних, то система контролю активізує баластну систему і блокує дії крану. Кран залишається у стані очікування, поки система контролю не отримає від баластного потоку сигнал про досягнення безпечних параметрів. Крани не з'ясовують остійність, вони лише виконують команди. Це спрощує код виконавчих потоків. Система контролю гарантує, що операція завантаження або виконується повністю в безпечних умовах, або не починається зовсім. Вона може керувати чергою запитів від різних кранів, визначаючи, чий рух є безпечнішим у даний момент часу, запобігаючи хаосу в спільній пам'яті.

Варто зауважити, що одночасне завантаження важких контейнерів на один із бортів декількома кранами без координації швидко може призвести до перевищення допустимого кута нахилу. Доцільно планувати рівномірне навантаження на обидва борти. Тоді відпадатиме потреба активувати баластну систему. Це задача логістичної системи.

Таким чином, потоки не можуть працювати ізольовано. Проте пряма взаємодія між ними створила б занадто жорстке зчеплення, що зробило б систему вразливою. Ми впроваджуємо архітектуру з посередником. Будь-яка взаємодія відбувається за наступним протоколом:

- Логічний блок заповнює чергу завдань для кранів. Він не чекає виконання, що дозволяє йому готувати наступні етапи завантаження паралельно.

- Коли кран хоче виконати дію, він звертається до системи контролю. Цей зв'язок є блокуючим.
- Система контролю перевіряє виконання умов безпеки. Якщо параметри дозволяють дію, то видає дозвіл на виконання операції.
- Якщо ні, то кран переходить у стан очікування і розпочинається робота з усунення загроз (в залежності від ситуації працює припортова техніка, баластна система тощо).
- Як тільки параметри стабілізуються, система контролю розблоковує роботу крану.

Найцікавіше починається, коли система стає динамічною. Тут проявляються класичні проблеми розподілених систем.

Гонка станів проявляється, якщо два крани намагаються одночасно встановити контейнери в один і той же штабель (стек) або два крани одночасно подають запит на встановлення важких контейнерів на один і той самий борт. Система контролю повинна обробити ці запити атомарно. Спільний ресурс має бути захищений м'ютексом.

Взаємні блокування виникають, якщо, наприклад, кран №1 тримає зону вивантаження і чекає на вантажівку, але вантажівка заблокована краном № 2, який чекає на команду для завершення операції краном № 1 для оновлення плану. Це ілюструє необхідність алгоритмів виявлення таких ситуацій.

Мультипортовий маршрут вимагає суворої черговості операцій. Ми не можемо дозволити кранам змінювати порядок завантаження на власний розсуд, навіть якщо це здається їм ефективнішим. Порядок операцій у розподіленій черзі має бути детермінованим та узгодженим.

Побудована модель у формі опису процесу вантажних робіт дозволяє встановити функціональну повноту системи та базову стійкість алгоритмів синхронізації. Проте постає питання про економічну ефективність цього процесу, враховуючи конфліктні критерії окремих потоків, оскільки в розподілених системах локальна оптимізація одного вузла часто призводить до зниження загальної продуктивності.

Наша цільова функція – це інтегральний критерій узгодженості роботи всієї системи. Оскільки ми оперуємо п'ятьма декомпованими процесами, загальна функція мінімізації витрат постає як адитивна модель, де кожен доданок описує вузьке місце або ресурсне обмеження конкретного потоку. Мінімізація витрат у нашій моделі – це пошук оптимального балансу між експлуатаційними показниками (час, енергоспоживання) та системними ризиками (втрата остійності).

Загальна функція витрат C може бути представлена у вигляді:

$$C = C(\text{time}) + C(\text{energy}) + C(\text{penalty}) + C(\text{risk}). \quad (8)$$

Мінімізація вартості часових затримок $C(\text{time})$ є основним показником для логічного потоку та транспорту. Факторами впливу виступають час очікування кранів та час під'їзду вантажівок.

Вартість енергетичних витрат $C(\text{energy})$ пов'язана з роботою кранів та баластної системи. Їх можна пов'язати з кількістю переміщень крана та об'ємом перекачаної води насосами. Кожне вмкання потужного насоса баластної системи призводить до витрат палива. Якщо логічний блок складе поганий план, судно буде постійно хитатися, і баластна система працюватиме без зупину.

Витрати на переміщення $C(\text{penalty})$ розглядають у розрізі мультипортових маршрутів. Їх можна оцінити за кількістю випадків, коли треба зняти верхній контейнер (порт Б), щоб дістати нижній (порт А).

Вартість ризику пов'язана з відхиленням метацентричної висоти судна від оптимальної. Чим більше відхилення, тим більша ймовірність аварії. Складову $C(\text{risk})$ можна розглядати як штрафну функцію.

Оптимальність такого балансу ми можемо представити, подавши цільову функцію у вигляді зваженої суми параметрів:

$$C = \alpha T + \beta E + \gamma N + P(\Delta h), \quad (9)$$

де T – загальний час завантаження, E – затрачена енергія (електроенергія чи паливо), N – кількість непродуктивних рухів, $P(\Delta h)$ – штрафна функція за відхилення центру ваги, α, β, γ – вагові коефіцієнти.

Висновки. Ми використовуємо декомпозицію та технології синхронізації не тому, що це правильно з точки зору програмування, а тому, що це єдиний спосіб керувати об'єктом, де події відбуваються паралельно та незалежно і час реакції має критичне значення. Швидкість та узгодженість роботи потоків становить основу формування багатопотокової системи організації процесу розвантаження / завантаження контейнеровозу.

Основна проблема існуючих моделей полягає в тому, що для зниження обчислювальної складності вони часто не враховують одночасно, наприклад, динаміку та темпоральні обмеження портових операцій.

Ефективність сучасних розподілених систем завантаження визначається не локальною продуктивністю окремих механізмів, а якістю їхньої синхронізації в умовах конфліктуючих цільових функцій. Впровадження інтелектуальних систем контролю дозволяє трансформувати процес управління з реактивного виконання команд у проактивну оптимізацію ресурсів, гарантуючи при цьому критичний рівень безпеки судна.

Список використаних джерел:

1. Бень А. П., Соколов А. В. Система підтримки прийняття рішень з формування вантажних планів контейнеровозів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Вип. 1 (28). С. 175-184. DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.175-184>.
2. Власенко Е. А. Допустимая загрузка контейнеровоза. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2018. Vol. VI (22). Issue 186. P. 87-94. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22-23>.

3. Власенко Е. А., Цымбал Н. Н. Некоторые особенности составления грузового плана контейнеровозов. *Судовождение*: сб. научн. трудов. Одесса: ИздатИИ-форм, 2018. Вып. 28. С. 35-41. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.35-41.
4. Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» зі змінами від 18.11.2021. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1644-14>.
5. Каменев К. И., Каменева А. В., Цымбал Н. Н. Разработка математической модели для задачи бей-плана с учетом очередности загрузки контейнеров *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика»*. 22.11.2022-23.11.2022. Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 34-45. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.34-45.
6. Каменева А. В., Каменев К. І. Використання адитивного алгоритма для розміщення небезпечних вантажів на контейнерному судні. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика»* 22.11.2022-23.11.2022. Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 70-76. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.70-77.
7. Кузнецов С. А., Шумилов Ю. А., Давидчук А. Н. и др. Перевозка опасных грузов: уч. пособ. Одесса: Издательство ОНМА, 2006. 32 с.
8. Міжнародна конвенція про безпечні контейнери. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_013#top
9. Нікольський В. В., Накул Ю. А., Стовманенко В. О. Система контролю завантаження контейнеровозів. *Судовождение*: сборник научных трудов. 2017. Вып. 27. 2017. С. 127-136.
10. Цимбал М. М. Розробка методу рейсового планування оптимального завантаження контейнеровозу: дис. ... канд. техн. наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.13 – навігація та управління рухом (271 – Річковий та морський транспорт. Одеса, 2021. 183 с. URL: <http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Dyssertatsyya-TSymbal-Maryu.pdf>
11. Skaf A., Lamrous S., Hammoudan Z., Manier M.-A. Mixed-integer linear programming models for the simultaneous unloading and loading processes in a maritime port. *Advances in Software Engineering, Education, and e-Learning*. 2021. P. 533-544.
12. Ambrosino D., Sciomachen A., Tanfani E. Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. Vol. 38 (2). P. 81-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.09.002>.
13. Sciomachen A., Tanfani E. The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem. *IMA Journal of Management Mathematics*. 2003. Vol. 14. P. 251-269. DOI: 10.1093/imaman/14.3.251.
14. Cargo Securing Manual. URL: <https://www.scribd.com/document/426199871/-Cargo-Securing-Manual>.
15. Dean D., Chow M. K. Container ship cargo scheduling: a heuristic algorithm to reduce the number of changes. *Eur. J. Oper. Res.* 2015. Vol. 246 (1). P. 242-249. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.044.
16. Pylypiuk T., Shchyrba V. Multi-stream process modeling. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*: зб. наук. праць / Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка; [редкол.: О.М.Хіміч (відп. ред.) та ін.]. Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2025. Вып. 28. С. 71-83. DOI: 10.32626/2308-5916.2025-28.71-83.

17. Yating Duan, Hongxiang Ren, Fuquan Xu, Xiao Yang, Yao Meng. Bi-Objective Integrated Scheduling of Quay Cranes and Automated Guided Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*. 2023. Vol. 11 (8). Art. 1492. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11081492>.

References:

1. Ben A. P., Sokolov A. V. Systema pidtrymky pryiniattia rishen z formuvannia vantazhnykh planiv konteinerovoziv. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. Vol. 1 (28). P. 175-184. DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.175-184>
2. Vlasenko E. A. Dopustymaia zahruzka konteinerovoza. Science and Education a New Dimension. *Natural and Technical Sciences*. 2018. Vol. VI (22). Issue 186. P. 87-94. DOI: <https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22-23>
3. Vlasenko E. A., Tsymbal N. N. Nekotorye osobennosti sostavleniya hruzovoho plana konteinerovozov. *Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov*. Odessa: YzdatYnform, 2018. Vol. 28. P. 35-41. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.35-41.
4. Zakon Ukrainy «Pro perevezennia nebezpechnykh vantazhiv» zi zminamy vid 18.11.2021. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1644-14>.
5. Kamenev K. Y., Kameneva A. V., Tsymbal N. N. Razrabotka matematyche-skoj modely dlia zadachy bei-plana s uchedom ocherednosti zahruzky konteinerov. *Materialy mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka»*. 22.11.2022-23.11.2022. Odesa: NU «OMA», 2023. P. 34-45. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.34-45.
6. Kamienieva A. V., Kamieniev K. I. Vykorystannia adytyvnoho alhorytma dlia rozmishchennia nebezpechnykh vantazhiv na konteineromu sudni. *Materialy mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii «Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka»*. 22.11.2022-23.11.2022. Odesa: NU «OMA», 2023. P. 70-76. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.70-77.
7. Kuznetsov S. A., Shumylov Yu. A., Davydochuk A. N. y dr. Perevozka opasnykh hruzov: uch. posob. Odessa: Yzdatelstvo ONMA, 2006. 32 p.
8. Mizhnarodna konventsiiia pro bezpechni konteinery. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_013#top.
9. Nikolskyi V. V., Nakul Yu. A., Stovmanenko V. O. Systema kontroliu zavantazhennia konteinerovoziv. *Sudovozhdenye: sbornyk nauchnykh trudov*. 2017. Vol. 27. 2017. P. 127-136.
10. Tsymbal M. M. Rozrobka metodu reisovoho planuvannia optymalnogo zavantazhennia konteinerovozu: dys. ... kand. tekhn. nauk (doktora filosofii) za spetsialnistiu 05.22.13 – navihatsiia ta upravlinnia rukhom (271 – Richkovyi ta morskyy transport. Odesa, 2021. 183 p. URL: <http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Dyssertatsyya-TSymbal-Maryy.pdf>.
11. Skaf A., Lamrous S., Hammoudan Z., Manier M.-A. Mixed-integer linear programming models for the simultaneous unloading and loading processes in a maritime port. *Advances in Software Engineering, Education, and e-Learning*. 2021. P. 533-544.
12. Ambrosino D., Sciomachen A., Tanfani E. Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. Vol. 38 (2). P. 81-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.09.002>.
13. Sciomachen A., Tanfani E. The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem. *IMA*

- Journal of Management Mathematics*. 2003. Vol. 14. P. 251-269. DOI:10.1093/imaman/14.3.251.
14. Cargo Securing Manual. URL: <https://www.scribd.com/document/426199871/Cargo-Securing-Manual>.
15. Dean D., Chow M. K. Container ship cargo scheduling: a heuristic algorithm to reduce the number of changes. *Eur. J. Oper. Res.* 2015. Vol. 246 (1). P. 242-249. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.044.
16. Pylypiuk T., Shchyrba V. Multi-stream process modeling. *Matematychna ta kompiuterne modeliuвання. Seriya: Tekhnichni nauky: zb. nauk. prats / Instytut kibernetiky imeni V. M. Hlushkova Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, Kamianets-Podilskyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Ohienka; [redkol.: O.M.Khimich (vidp. red.) ta in.]. Kamianets-Podilskyi: Kamianets-Podilskyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Ohienka, 2025. Vol. 28. P. 71-83. DOI: 10.32626/2308-5916.2025-28.71-83.*
17. Yating Duan, Hongxiang Ren, Fuquan Xu, Xiao Yang, Yao Meng. Bi-Objective Integrated Scheduling of Quay Cranes and Automated Guided Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering (JMSE)*. 2023. Vol. 11 (8). Art. 1492. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11081492>.

APPLICATION OF DISTRIBUTED SYSTEMS TECHNOLOGIES IN CONTAINER SHIP LOADING

The paper proposes a comprehensive approach to modeling cargo operations on a modern container ship as a complex distributed system operating in real time. The authors present an original decomposition of the process into five functional flows: logical planning, cranes, port transport, ballast system, and control module. This approach allows for a detailed consideration of the mechanisms of synchronization and message exchange between subsystems with conflicting target settings.

Particular attention is paid to the genesis of scientific thought in the field of maritime logistics. The authors analyze the transition from static «3D-packaging» models of the early 2000s [13] to modern dynamic systems of integrated planning and multi-stream modeling [11, 15, 16]. The integration of domestic scientific experience is important: from regulatory security of dangerous goods [7] to the development of intelligent decision-making support systems and voyage planning [1, 3, 5, 9].

The central scientific message is the justification of the transition from descriptive description of processes to the construction of an optimization model. Through the formalization of the additive objective cost function, methods for finding a Pareto-efficient balance between the speed of ship processing, energy costs for stabilization and compliance with the physical invariants of the system (stability, metacentric height) are demonstrated. The work forms the understanding of the ship not as a static object, but as a dynamic digital environment, where efficiency is achieved through complex cooperation of distributed computing processes.

Key words: *cargo placement planning, multi-stream system, multi-criteria optimization, heuristic algorithms, software synchronization, atomicity.*