

УДК 656.13:004.9

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАЦІЙ КРОС-ДОКІНГУ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕННЯ СПІЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ГРАФІКІВ

Канд. техн. наук О. П. Калініченко, асп. В. В. Севідова

IMPROVING THE EFFICIENCY OF CROSS-DOCKING OPERATIONS IN INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION BASED ON THE DEVELOPMENT OF JOINT OPERATIONAL SCHEDULES

PhD (Tech.) O. P. Kalinichenko, postgraduate student V. V. Sevidova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336554>



Анотація. У статті досліджено проблему підвищення ефективності міжнародних автомобільних вантажних перевезень через удосконалення процесів управління на логістичних центрах (ЛЦ), що працюють за технологією крос-докінг. Проаналізовано основні проблемні аспекти, що виникають з обробленням дрібних партій вантажів, зокрема необхідність жорсткої синхронізації матеріальних потоків, обмеженість часових та інфраструктурних ресурсів, а також інформаційну непрозорість між учасниками ланцюга постачання.

Запропоновано підхід для розв'язання цих проблем, базований на розробленні та впровадженні спільних операційних графіків одночасної роботи транспортних засобів і навантажувально-розвантажувальних постів. Метою розроблення таких графіків є мінімізація непродуктивних простоїв усіх залучених ресурсів, скорочення загального циклу обробки вантажу та підвищення пропускної спроможності логістичного центру.

Описано інформаційну систему, реалізовану у вигляді програмного продукту, для автоматизованої побудови та оптимізації спільних операційних графіків. Продемонстровано основні функціональні можливості розробленого інструментарію: моделювання на основі дискретно-подієвого підходу, динамічне призначення завдань на ресурси, візуалізація розкладів у вигляді діаграм Ганта і розрахунок головних показників ефективності.

Ключові слова: транспортні технології, міжнародні перевезення, крос-докінг, спільний операційний графік, оптимізація.

Abstract. This article examines the important task of improving the operational efficiency of international road freight transport by optimising complex processes in cross-docking logistics centres. It provides an in-depth analysis of the inherent difficulties in handling less-than-truckload shipments, focusing on three main obstacles: the need for precise coordination between incoming and outgoing freight flows, significant constraints imposed by available time and physical infrastructure (such as docking areas), and the widespread problem of information silos that hinder transparency in the supply chain. To overcome these obstacles, the study presents and validates a new methodological approach focused on the creation and execution of integrated joint operational schedules. This system is designed to coordinate the joint actions of all key resources, namely delivery vehicles and loading/unloading docks (LUB). The main goal of implementing this synchronised planning system is to significantly reduce unproductive downtime for both vehicles and terminal resources, significantly reduce the end-to-end cargo handling cycle, and significantly increase the overall throughput of the logistics centre. The developed software uses discrete event simulation to

model the dynamic environment of the logistics centre, allowing for dynamic resource and task allocation. Its main functions include the automatic creation of optimised schedules, the visualisation of these plans using dynamic Gantt charts for intuitive management, and the reliable calculation of key performance indicators such as vehicle downtime, LUB utilisation rate and total cargo handling time. This research provides a valuable practical tool to support decision-making for logistics managers, giving them advanced planning and control capabilities to build more sustainable, efficient and competitive international supply chains.

Keywords: *transport technologies, international transportation, cross-docking, joint operational schedule, optimisation.*

Вступ. В умовах глобалізації економіки та інтенсифікації міжнародної торгівлі ефективність управління ланцюгами постачання стає головним фактором конкурентоспроможності підприємств. Для міжнародних перевезень вантажів, як невід'ємна складова цих ланцюгів, характерна значна складність, зумовлена великими відстанями, необхідністю перетину державних кордонів, відмінностями в транспортній інфраструктурі та нормативно-правовому регулюванні різних країн. Автомобільний транспорт, незважаючи на свою гнучкість і можливість доставлення «від дверей до дверей», особливо чутливий до цих факторів.

Одним із найпрогресивніших методів оптимізації в логістиці є технологія крос-докінгу, яка передбачає швидке переміщення товарів через складський термінал із мінімальним або нульовим часом зберігання [1]. Ця стратегія особливо актуальна для міжнародних перевезень, де логістичні центри (ЛЦ) є основними вузлами для консолідації дрібних партій вантажів для подальшого відправлення магістральним транспортом або, навпаки, для деконсолідації великих партій для доставлення кінцевим споживачам.

Однак практична реалізація крос-докінгових операцій стикається з низкою суттєвих викликів. Необхідність жорсткої синхронізації вхідних і вихідних матеріальних потоків, обмеженість ресурсів (навантажувально-розвантажувальні пости, персонал, техніка) і вплив стохастичних факторів (затримки на митниці, зміни в

дорожній обстановці) часто призводять до виникнення «вузьких місць», простоїв транспортних засобів і, як наслідок, зниження ефективності та зростання витрат. У зв'язку з цим розроблення науково обґрунтованих методів та інструментів для координації і планування крос-докінгових операцій є надзвичайно актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективне функціонування логістичних центрів є критично важливим для забезпечення стійкості та конкурентоспроможності міжнародних ланцюгів постачань. Основним елементом операційної діяльності таких центрів є організація роботи навантажувально-розвантажувальних постів (НРП), де відбувається фізичне передавання вантажів між різними видами транспорту. Розроблення оптимальних графіків спільної роботи НРП дає змогу мінімізувати час простою транспортних засобів, скоротити операційні витрати, підвищити пропускну спроможність терміналу і, як наслідок, забезпечити своєчасність доставлення в рамках міжнародних перевезень.

Основою для розроблення ефективних графіків є математичне моделювання. Дослідники активно застосовують методи дослідження операцій для формалізації завдання. Часто проблема зведена до варіацій задачі планування для паралельних машин, де навантажувальні пости виступають у ролі «машин», а вантажівки, що прибувають, — у ролі «робіт», які необхідно виконати.

У роботах, присвячених оптимізації роботи крос-докінгових терміналів, що є невід'ємною складовою багатьох логістичних центрів для міжнародних перевезень, завдання ускладнено необхідністю синхронізації вхідних і вихідних потоків. Наприклад, автори досліджень [2, 3] пропонують моделі змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP), спрямовані на мінімізацію не лише часу, але й енергоспоживання та операційних витрат.

Інші дослідження [4, 5] сконцентровані на мінімізації загального часу завершення всіх операцій. Розглядають моделі, що враховують часові вікна прибуття і відправлення транспортних засобів, наявність різних типів постів (для різних видів вантажів або транспорту) та обмеження на ресурси (навантажувачі, персонал).

Більшість досліджень присвячена так званим системам попереднього запису для вантажівок (Truck Appointment Systems, TAS). Ці системи дають змогу транспортним компаніям заздалегідь бронювати часові слоти для прибуття на термінал. Це перетворює стохастичний процес прибуття транспорту на детермінований, що значно спрощує планування роботи НРП. Як зазначено в роботі [6], TAS є основним інструментом для згладжування пікових навантажень, зменшення заторів біля логістичних хабів і підвищення точності операційного планування. Ефективність таких систем безпосередньо залежить від алгоритмів, що розподіляють доступні слоти, ураховуючи пропускну спроможність постів і пріоритетність вантажів.

Для аналізу та оптимізації систем, де неможливо повністю уникнути випадковості, застосовують теорію масового обслуговування. Моделювання НРП як систем масового обслуговування дає змогу оцінити такі параметри, як середній час очікування в черзі, коефіцієнт завантаження постів та ймовірність відмови в обслуговуванні.

Новітнім трендом у логістиці є горизонтальна співпраця [7], коли кілька логістичних операторів або перевізників об'єднують ресурси для підвищення загальної ефективності. У контексті роботи НРП це може виражено у спільному використанні постів або координації графіків прибуття для оптимізації завантаження. Дослідження показують, що така співпраця, підкріплена симуляційним моделюванням, значно скорочує порожні пробіги та час простою. Упровадження спільних інформаційних платформ для обміну даними про заплановані перевезення в режимі реального часу є технологічною основою для такої координації. Це особливо актуально для міжнародних перевезень, де задіяно багато стейкхолдерів.

Ураховуючи складність і динамічність процесів у логістичних центрах, аналітичні методи не завжди здатні адекватно описати систему. Тому широкого розповсюдження набуло імітаційне моделювання [8, 9]. Створення цифрових моделей (або «цифрових двійників») термінала дає змогу тестувати різні сценарії та правила розроблення графіків без втручання в реальні операції [10]. Можна варіювати кількість задіяних постів, змінювати пріоритети обслуговування, тестувати різні політики реагування на збої (наприклад запізнення транспортного засобу). Роботи з імітаційного моделювання часто спрямовані на оптимізацію процесів навантаження шляхом зменшення часу очікування та підвищення пропускну спроможності.

Визначення мети та завдання дослідження. Головною метою дослідження є підвищення ефективності виконання міжнародних автомобільних перевезень вантажів шляхом вдосконалення процесів управління крос-докінговими операціями на логістичних центрах за рахунок розроблення та застосування інформаційної технології побудови спільних операційних графіків роботи.

Основна частина дослідження. Ефективна реалізація крос-докінгу як

складового елемента загального процесу міжнародної доставки вантажів (рис. 1) потребує злагодженості усіх учасників процесу від постачальників до кінцевих отримувачів. Центральним елементом такої координації є логістичний центр, а основним інструментом управління – спільний операційний графік. На противагу

хаотичній роботі (рис. 2), розроблення узгоджених графіків (рис. 3) передбачає призначення кожному транспортному засобу конкретного часового вікна («тайм-слоту») для прибуття і виконання операцій, що дає змогу синхронізувати прибуття перевізників дрібних партій вантажу з наявністю вільних НРП і графіком підготовки магістральних автомобілів.

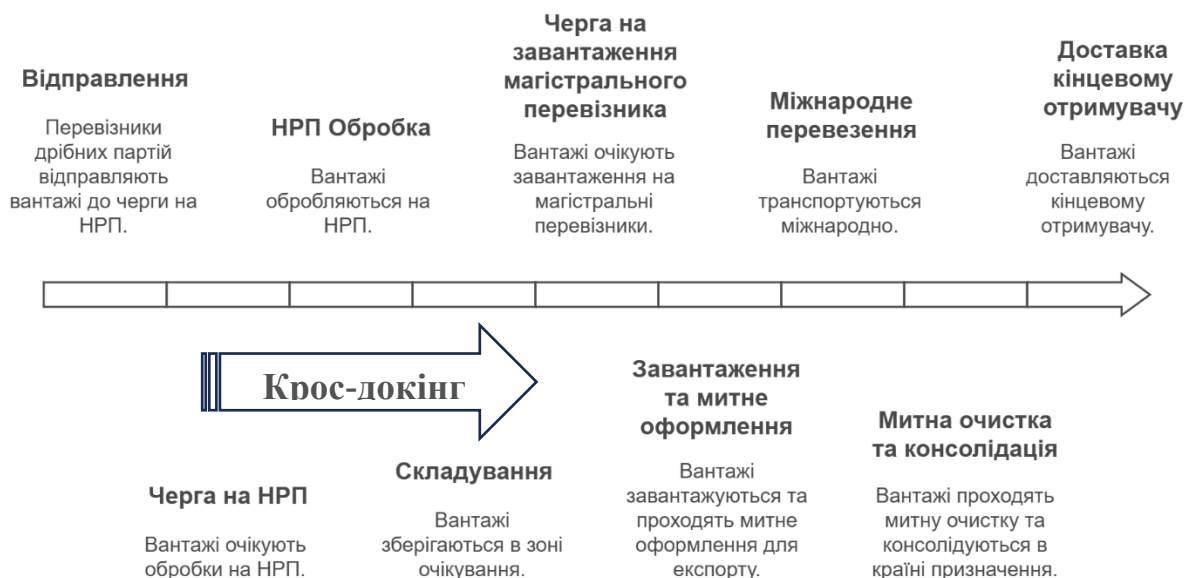


Рис. 1. Місце крос-докінгу в загальній системі міжнародного доставлення вантажів



Рис. 2. Схема незлагодженої роботи ЛЦ у разі крос-докінгу

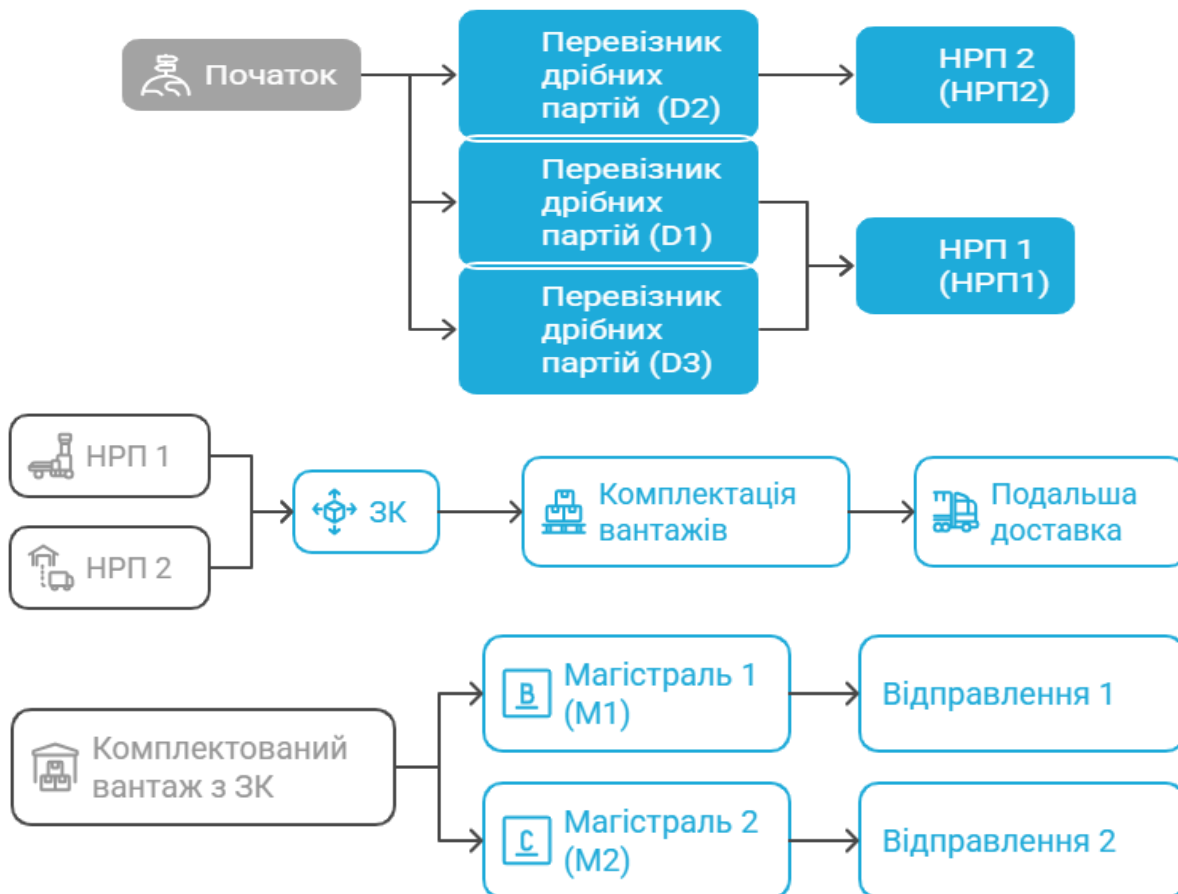


Рис. 3. Схема роботи за узгодженими операційними графіками

Переваги такого переходу від хаосу до порядку є комплексними та вимірними. Насамперед усунено довгі черги та простої транспорту, оскільки водії прибувають у точно визначений час, чим можна оптимізувати використання внутрішніх ресурсів хабу: персонал, навантажувачі та НРП не простоюють і не працюють в авральному режимі, а завантажені рівномірно протягом дня. Як наслідок, значно прискорено обробку вантажів, що критично для дотримання жорстких графіків відправлення магістрального

транспорту. Такий підхід дає змогу розв'язати головні проблеми, виявлені під час аналізу (табл. 1).

Для управління складними та динамічними процесами крос-докінгу потрібні високоточні інструменти координації. Узгоджені операційні графіки є тим центральним механізмом, що гармонізує роботу всіх елементів системи: від прибуття автомобілів, що доставляють дрібні партії, до своєчасного відправлення консолідованих вантажів магістральним транспортом.

Таблиця 1

Проблемні аспекти крос-докінгу та IT-орієнтовані напрями їх вирішення

Проблемний аспект крос-докінгу	Характеристика та потенційні негативні наслідки	Аспекти діяльності, що зазнають негативного впливу	Потенційні напрями вирішення за допомогою розроблюваної IT
Необхідність жорсткої синхронізації вхідних і вихідних матеріальних потоків	Потреба в чіткому часовому узгодженні прибуття ТЗ, що доставляють дрібні партії, і графіків підготовки/відправлення магістральних ТЗ	Час виконання операцій, ефективність використання транспорту, завантаженість ресурсів ЛЦ, вартість логістики	Розроблення модуля динамічного планування та оптимізації спільних операційних графіків; система автоматичних сповіщень про статус прибуття/відправлення ТЗ
	Простої ТЗ, зрив графіків відправлення, зниження пропускної спроможності ЛЦ, ризик накопичення вантажу		
Обмежений часовий ресурс на виконання операцій	Високі вимоги до швидкості виконання всіх технологічних операцій (розвантаження, ідентифікація, сортування, комплектація, завантаження) в умовах мінімального буферного часу	Продуктивність праці, пропускна спроможність НРП, якість обслуговування (швидкість), операційні витрати (персонал, обладнання)	Модуль оптимального розподілу завдань між НРП; інструменти моніторингу продуктивності в реальному часі; підтримка ухвалення рішень для диспетчера щодо пріоритизації операцій
	Необхідність високої продуктивності НРП і персоналу, ризик затримок за пікових навантажень		
Висока точність операцій сортування та комплектації	Необхідність безпомилкової ідентифікації, сортування та переміщення численних дрібних партій від різних відправників для різних одержувачів	Якість логістичного сервісу, репутація ЛЦ, фінансові втрати (компенсації, повернення), ефективність використання складського простору (зони сортування)	Інтеграція з системами автоматичної ідентифікації (штрих-коди, RFID); модуль контролю відповідності вантажу та документації; ведення електронного обліку всіх операцій
	Висока вартість помилки (неправильне відправлення, втрати), потреба в надійних системах контролю		

Принцип функціонування полягає в переході від реактивного управління

(«обслуговування за фактом прибуття») до проактивного планування. Замість

формування стихійних черг система на основі вхідних даних про плановані поставки та відправлення розраховує оптимальну послідовність дій для кожного ресурсу (автомобіля та НРП) і резервує для них часові слоти. Основні переваги впровадження графіків:

- мінімізація простоїв – це найбільш очевидний і значущий ефект. Графік усуває ситуацію, коли автомобіль прибув, але всі НРП зайняті, або НРП вільний, але ще нема автомобіля для обслуговування. Скорочення простоїв призводить до прямої економії пального, зменшення витрат на амортизацію та оплату праці водіїв за час очікування;

- рівномірне завантаження ресурсів. Хаотичне прибуття вантажів призводить до періодів пікового навантаження, що чергуються з періодами простою. Графіки дають змогу «вирівняти» це навантаження протягом робочої зміни, забезпечуючи ритмічність виконання операцій і підвищуючи коефіцієнт використання обладнання та персоналу. Це наочно

демонструє порівняльний графік завантаження НРП (рис. 4). Запровадження графіка підвищує середнє завантаження постів з 53.1 до 76.2 %, що визначено як відношення часу роботи до загального часу, що включає час простою НРП (в ідеальних умовах рівень завантаження складає 100 %) та усуває екстремальні піки і провали;

- скорочення загального циклу обробки вантажу. Загальний час обробки на ЛЦ складається з послідовно-паралельних операцій. Розроблення узгоджених графіків спрямовано на мінімізацію часу очікування магістральним автомобілем та оптимізацію паралельності виконання операцій, що призводить до скорочення загального часу;

- підвищення пропускної спроможності ЛЦ є інтегральним результатом попередніх переваг. Із підвищенням коефіцієнта використання НРП і зниження середнього часу обробки логістичний центр може обробити більший обсяг вантажу за ту саму одиницю часу, що безпосередньо впливає на його прибутковість.

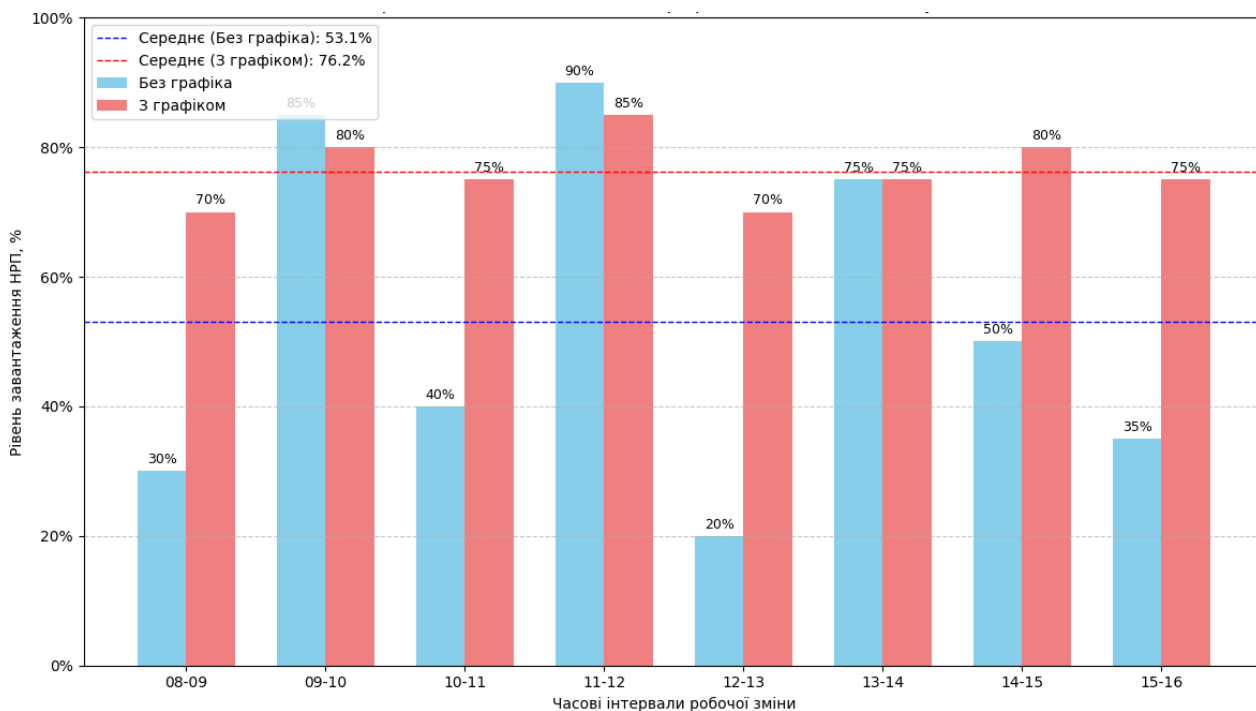


Рис. 4. Порівняння завантаження НРП за різних підходів для планування

Для автоматизації процесу планування було розроблено програмний продукт для координації роботи учасників транспортного процесу. Він є цифровим ядром, що дає змогу реалізувати узгоджену роботу всіх учасників транспортного процесу – від дрібних перевізників до персоналу складу та магістральних

перевізників. Мета розробленої програми – надати логістам і диспетчерам інструмент для моделювання, складання та аналізу ефективності операційних графіків спільної роботи учасників транспортного процесу. Програма реалізована мовою Python і має графічний інтерфейс користувача (рис. 5).

Вхідні дані

Кількість авто-доставників:	12
Кількість НРП (постів):	5
Початок роботи (ГГ:ХХ):	08:00
Горизонт план., хв:	480
Час завант. магістрал. партії (20т), хв:	60
Вартість простою доставника (грн/хв):	3
Вартість простою магістрал. вантажу (грн/хв):	5
Вартість простою НРП (грн/хв):	0.5
К-ть маршрутів доставників:	10

Дані по маршрутах доставників

№ Маршруту	Час оборту, хв	Сер. вантаж, т	К-ть їздок	ID Магістрала (0-загал)
1	60	2.5	12	1
2	80	3.0	18	1
3	45	4.0	23	2
4	90	1.5	7	2
5	110	1.0	14	2

Розрахувати та Оптимізувати

Новий розрахунок

Експорт розкладів в Excel

Зберегти діаграму Ганта

Рис. 5. Інтерфейс запропонованого цифрового рішення для введення вхідних даних

Основні функціональні можливості:

– введення та управління вхідними даними. Користувач вводить параметри системи: кількість автомобілів-доставників, кількість НРП, час початку і тривалість зміни, нормативи часу на операції, вартісні

показники простоїв, а також детальні дані з кожного маршруту доставлення (час оборту, середня вага, кількість рейсів, прив'язка до магістрального відправлення);

– побудова та оптимізація розкладів. В основі лежить алгоритм дискретно-

подієвого моделювання. Система моделює послідовність подій на ЛЦ (прибуття автомобілів, звільнення НРП, завершення операцій) і динамічно призначає завдання на вільні ресурси, мінімізуючи час очікування;

– візуалізація та аналіз результатів.

Програма генерує детальні текстові розклади для кожного ресурсу (автомобілів, НРП) і візуалізує загальний графік спільної

роботи у вигляді діаграми Ганта (рис. 6). Це дає змогу наочно побачити періоди зайнятості та простою, виявити конфлікти і «вузькі місця»;

– розрахунок показників ефективності. Автоматично розраховано сумарний час і вартість простоїв для кожної категорії ресурсів, а також загальну вартість невиробничих втрат.

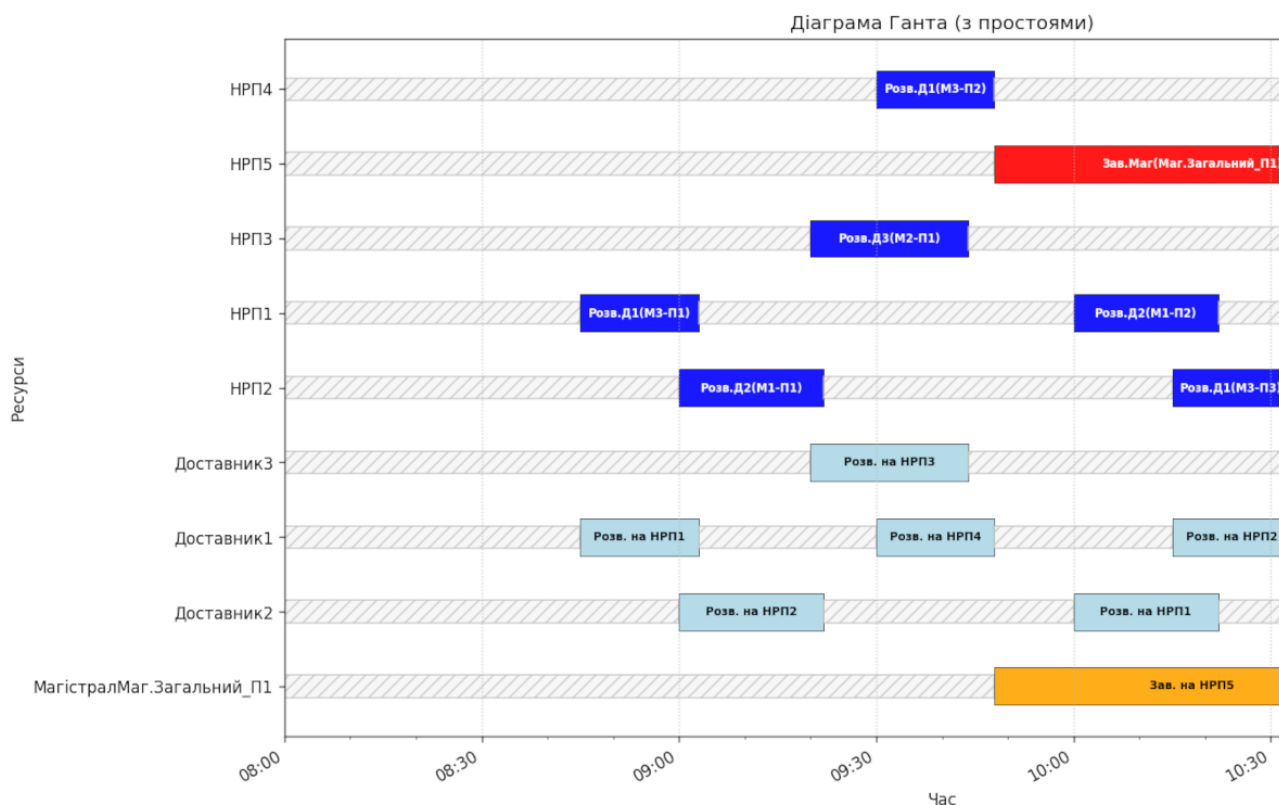


Рис. 6. Фрагмент згенерованої діаграми Ганта

Діаграма Ганта (рис. 6) є основним інструментом візуалізації. На ній по осі ординат відкладені ресурси (НРП1, НРП2, магістральні автомобілі М1, автомобілі-доставники Д2, Д3), а по осі абсцис – час. Кольорові блоки показують виконання певних операцій (бірюзовий – прибуття, сірий – очікування, синій – розвантаження, помаранчевий – завантаження, зелений – відправлення). Це дає змогу диспетчеру

миттєво оцінити поточний стан і динаміку роботи всього логістичного центру.

Застосування розробленої інформаційної технології дає змогу перейти від інтуїтивного, реактивного управління до проактивного планування, що базовано на об'єктивних розрахунках і моделюванні.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що головною проблемою для організації міжнародних перевезень із

використанням технології крос-докінг є недостатня координація та синхронізація роботи численних учасників і ресурсів логістичного центру. Це призводить до значних непродуктивних простоїв, зниження пропускної спроможності та збільшення операційних витрат.

1. Запропоновано ефективний підхід для розв'язання цієї проблеми, що полягає в розробленні та впровадженні спільних операційних графіків роботи. Доведено, що такий підхід дає змогу суттєво підвищити коефіцієнт використання навантажувально-розвантажувальних постів, скоротити загальний цикл обробки вантажу та мінімізувати простой транспортних засобів.

2. Розроблено програмний продукт для автоматизації процесу побудови та оптимізації таких графіків. Інструментарій,

базований на методі дискретно-подієвого моделювання, дає змогу враховувати динаміку процесів, обмеженість ресурсів і технологічні залежності між операціями.

3. Наочна візуалізація розкладів у вигляді діаграм Ганта і автоматичний розрахунок основних показників ефективності перетворюють розроблений продукт на дієву систему підтримки ухвалення рішень для диспетчерів і логістів.

4. Упровадження запропонованого підходу на практиці дасть змогу логістичним центрам досягти значного економічного та операційного ефекту: знизити собівартість обробки вантажів, підвищити надійність і своєчасність доставлення і, як наслідок, зміцнити свої конкурентні позиції на ринку міжнародних транспортних послуг.

Список використаних джерел

1. Kalinichenko O., Sevidova V. Determining the number of vehicles for cross-docking in conditions of uncertainty and limited resources. *Municipal economy of cities*. 2025. Vol. 1, no. 189. P. 475–481. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-475-481>.
2. Scheduling trucks and storage operations in a multiple-door cross-docking terminal considering multiple storage zones / T. Chargui et al. *International Journal of Production Research*. 2020. P. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1853843>.
3. Shahmardan A., Sajadieh M. S. Truck scheduling in a multi-door cross-docking center with partial unloading – Reinforcement learning-based simulated annealing approaches. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 139. P. 106134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106134>.
4. Methodology for the early analysis and evaluation of the resource efficiency of process chains for manufacturing hybrid structures / C. Symmank et al. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 33. P. 430–437. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.053>.
5. A modified particle swarm optimization algorithm for a batch-processing machine scheduling problem with arbitrary release times and non-identical job sizes / H. Zhou et al. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 123. P. 67–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.018>.
6. Optimization for a Multi-Constraint Truck Appointment System Considering Morning and Evening Peak Congestion / B. Xu et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 3. P. 1181. URL: <https://doi.org/10.3390/su13031181>.
7. Abdelmagid A. M., Gheith M., Eltawil A. Scheduling External Trucks Appointments in Container Terminals to Minimize Cost and Truck Turnaround Times. *Logistics*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 45. URL: <https://doi.org/10.3390/logistics6030045>.

8. Захаров Д. С. Економічні переваги імітаційного моделювання транспортних коридорів в системах VISSIM та VISUM. *Український економічний часопис*. 2024. № 3. С. 38–41. URL: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2023-3-6>.

9. Імітаційне моделювання процесів логістичного забезпечення на основі транспортної задачі / D. Kotov та ін. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2024. Т. 14, № 1. С. 218–228. URL: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.18>.

10. Самостян В. Ефективне використання підходів для імітаційного моделювання логістичних процесів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. Т. 2, № 15. С. 127–133. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.400>.

Калініченко Олександр Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-9024-3668. Тел.: +38 (099) 046-55-95. E-mail: kttkap@gmail.com.

Севідова Вікторія Віталіївна, аспірант кафедри транспортних технологій, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-4806-4743. Тел.: +38(050)605-07-13. E-mail: v.i.k.y.s.y.a067@gmail.com.

Kalinichenko Oleksandr, PhD (Tech). Associate Professor, department of transport technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-9024-3668. Tel.: +38 (099) 046-55-95. E-mail: kttkap@gmail.com.

Sevidova Viktoriia, postgraduate student, department of transport technologies, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-4806-4743. Tel.: +38(050)605-07-13. E-mail: v.i.k.y.s.y.a067@gmail.com.

Статтю прийнято 19.06.2025 р.