

Соколова О.Є.

<https://orcid.org/0000-0001-6341-0195>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Борець І.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4477-4716>

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ВАНТАЖІВ В АЕРОПОРТОВОМУ ВУЗЛІ ІНТЕГРОВАНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Сучасні транспортно-логістичні процеси характеризуються підвищеними вимогами до швидкості, надійності та економічної ефективності перевезень вантажів при одночасному збереженні їх фізичних характеристик та мінімізації негативного впливу на довкілля. У цих умовах ключового значення набувають інтегровані транспортно-логістичні системи (ІТЛС), у межах яких аеропорт виступає системоутворювальним вузлом, що забезпечує узгодженість, синхронізацію та координацію взаємодії різних видів транспорту. Ефективність функціонування аеропортового вузла визначається збалансованістю економічних, часових та екологічних параметрів, що зумовлює необхідність застосування підходів до оптимізації процесів обробки вантажів. Встановлено, що існуючі наукові підходи переважно орієнтовані на окремі аспекти функціонування авіатранспортних систем та не забезпечують цілісної формалізації взаємодії різних видів транспорту в аеропортових вузлах.

У даній статті розроблено багатокритеріальну економіко-математичну модель оптимізації процесів взаємодії автомобільного, залізничного та авіаційного видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС з урахуванням економічних витрат, тривалості технологічних процесів обробки вантажів та екологічного навантаження. Модель побудована на основі поєднання методів багатокритеріальної оптимізації, теорії масового обслуговування та сценарного аналізу, що дозволяє оцінювати інтенсивність вантажопотоків, продуктивність вантажних фронтів, а також визначати параметри складської підсистеми в залежності від технологічних обмежень конкретного аеропортового вузла. Під час обчислювального експерименту встановлено, що зміна пріоритетів інтегрального критерію оптимізації суттєво впливає на структуру використання ресурсів системи обробки вантажів, тривалість технологічних операцій, економічні витрати та рівень екологічного навантаження. На основі Парето-аналізу визначено область найбільш ефективних рішень, що відповідає інтервалу витрат 18–26 тис. євро при середній тривалості обробки вантажів від 15 до 17 год.

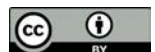
Отримані результати апробації запропонованого підходу підтверджують можливість використання розробленої моделі для визначення оптимальних параметрів процесів взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Подальшим напрямом наукового дослідження має стати розробка імітаційної моделі оптимізації взаємодії авіаційного та наземних видів вантажного транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС.

Ключові слова: інтегрована транспортно-логістична система, аеропортовий вузол, взаємодія видів транспорту, обробка вантажів, багатокритеріальна оптимізація, економіко-математична модель, сценарний аналіз.

Постановка проблеми. Інтеграційні процеси в транспортній сфері набувають особливої актуальності в умовах зростання обсягів перевезень, ускладнення просторово-часових характеристик логістичних операцій та підвищення вимог до техніко-технологічної узгодженості функціонування транспортних вузлів. Унаслідок цього відбувається

поступовий перехід від ізольованого функціонування окремих видів транспорту до формування інтегрованих транспортно-логістичних систем (ІТЛС), у межах яких забезпечується узгодженість інфраструктури, рухомого складу та потокових процесів. Формування ІТЛС відбувається на основі взаємопов'язаної мережі транспортних вузлів та



маршрутів, у якій розподіл вантажопотоків здійснюється у динамічному середовищі під впливом значної кількості факторів, серед яких ключове значення мають нерівномірність попиту, ресурсні обмеження, випадкові збої та невизначеність середовища, а також екологічні вимоги. За таких умов необхідним є встановлення стійких техніко-технологічних та організаційно-управлінських взаємозв'язків, що забезпечують зниження витрат, скорочення тривалості перевезень та мінімізацію екологічного навантаження на всіх етапах логістичного ланцюга.

Вузлові елементи ІТЛС виконують функції концентрації, перерозподілу та трансформації вантажопотоків, визначаючи ефективність функціонування всієї системи. При цьому, особливу роль виконують аеропортові комплекси, забезпечуючи інтеграцію авіаційного транспорту з наземними видами у глобальних мультимодальних ланцюгах постачання. Тому, від того, наскільки ефективно організовані процеси обробки вантажів та взаємодії видів транспорту в аеропорту безпосередньо залежать загальні витрати, тривалість логістичного циклу та екологічні показники функціонування всієї ІТЛС.

Залучення авіаційного транспорту до логістичних схем перевезень створює можливості для суттєвого прискорення переміщення вантажів на значні відстані та формування високошвидкісних міжнародних ланцюгів постачання. Але при цьому, така інтеграція змінює структуру потоків, впливає на рівень запасів, параметри обслуговування та величину сукупних витрат, що призводить до трансформації просторово-часової конфігурації системи. Завдяки цьому аеропортовий вузол виступає не лише інфраструктурним елементом, а й стає системоутворювальним компонентом, який визначає напрям розвитку ІТЛС.

Зростання інтенсивності перевезень із використанням авіаційного транспорту супроводжується підвищенням вимог до енергоефективності, ресурсозбереження та екологічної безпеки, що в поєднанні з активним впровадженням принципів сталого розвитку в транспортному секторі зумовлює необхідність забезпечення балансу між економічною ефективністю, соціальною відповідальністю та мінімізацією впливу на довкілля. У зв'язку з цим під час планування та оптимізації процесів обробки вантажів доцільно враховувати не лише вартісні та часові параметри, а й екологічні та ресурсні обмеження.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення методологічних підходів до

оптимізації процесів обробки вантажів в аеропортових комплексах із урахуванням часових характеристик, витрат, інфраструктурних обмежень та екологічних вимог, що обґрунтовує доцільність застосування багатокритеріального підходу для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування ІТЛС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам функціонування інтегрованих транспортно-логістичних систем та ролі аеропортів у їх структурі присвячено значну кількість наукових досліджень. Зокрема, у працях Полатера А., Тоєта А, Лі Х., Янга Х.М., Венглінського Б., Акімової Т.А. та інших науковців аеропортові комплекси розглядаються як ключові логістичні центри та мультимодальні транспортні хаби, що забезпечують інтеграцію різних видів транспорту та формування ефективних ланцюгів постачання з авіаційною складовою [1-7]. Значну увагу дослідники приділяють стратегічним аспектам розвитку аеропортових вузлів, підвищенню їх конкурентоспроможності та формуванню стійких транспортно-логістичних систем.

Питання планування та оптимального розміщення аеропортових хабів досліджуються такими вченими як Чжен Ю., Хатіпоглу С., Ватанабе Д., Чжоу С.С., Макнейра А.В. та ін. [8-12], праці яких спрямовані на вирішення задач щодо вибору місця розташування, формування транспортних мереж та інтеграції аеропортів у мультимодальні транспортні системи.

Вагоме місце у розв'язанні транспортних проблем займають дослідження, присвячені оптимізації та моделюванню основних процесів функціонування аеропортів. Зокрема, у роботах Ду Х., Цю Ц., П'єр Еролес М. [13-15] запропоновано інструменти координації транспортних потоків, а також визначення оптимальних параметрів роботи аеропортових комплексів за окремими видами його діяльності, зокрема із застосуванням імітаційного моделювання. Проте, зазначені наукові праці мають вузькоспеціалізований характер та не враховують особливостей взаємодії різних видів транспорту в межах аеропорту.

У контексті сталого розвитку та декарбонізації транспортної галузі особливого значення набувають екологічні аспекти функціонування транспортних систем та аеропортових комплексів. Аналіз наукових праць за цією тематикою свідчить, що більшість досліджень зосереджено переважно на оцінюванні впливу транспортної діяльності на довкілля, визначенні обсягів викидів забруднюючих речовин та розробці методичних

підходів щодо їх зменшення [16,17]. Разом з тим, інтеграція екологічних показників, з у комплексні моделі оптимізації процесів взаємодії видів транспорту залишається не достатньо вивченими.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу останніх наукових досліджень та публікацій встановлено, що вітчизняні та зарубіжні вчені зробили значний внесок у розвиток теоретичних основ управління транспортно-логістичними системами та потоками, формування мультимодальних ланцюгів постачання та забезпечення ефективності функціонування транспортно-логістичних вузлів, зокрема авіаційних. Але при цьому, питання щодо комплексного врахування економічних, часових та екологічних чинників у задачах оптимізації взаємодії видів транспорту в аеропортових вузлах мають фрагментарний характер, і тому потребують подальшого дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є удосконалення теоретико-методологічних положень багатокритеріальної оптимізації процесів обробки вантажів в умовах взаємодії наземного та авіаційного видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС на основі розроблення економіко-математичної моделі, що дозволяє мінімізувати вартісні, часові та екологічні показники його функціонування з урахуванням інфраструктурних та технологічних обмежень.

Виклад основного матеріалу. Аеропортовий вузол у структурі ІТЛС виступає ключовою ланкою мультимодального ланцюга, через яку здійснюється перерозподіл вантажопотоків між наземним та авіаційним транспортом, причому саме на його території відбувається концентрація, накопичення, обробка та підготовка вантажів до подальшого перевезення, що зумовлює системний характер наслідків будь-яких збоїв у його функціонуванні, які проявляються у зростанні витрат, збільшенні тривалості доставки та погіршенні екологічних показників у межах усього логістичного ланцюга. Ефективність функціонування такого вузла на практиці обмежується сукупністю взаємопов'язаних факторів, серед яких невідповідність технологічних параметрів різних видів транспорту, дисбаланс потужностей інфраструктурних об'єктів, неузгодженість графіків руху, нерівномірне завантаження складських зон, а також обмеженість ресурсів для виконання навантажувально-розвантажувальних робіт (НРР), що призводить до формування «вузьких місць», уповільнення руху вантажів та зниження ефективності як окремих ланцюгів постачання, так і системи в цілому.

Стохастичний характер надходження вантажів у поєднанні з варіативністю тривалості технологічних операцій зумовлює випадковість процесів їх обробки в аеропортовому вузлі, що обґрунтовує доцільність застосування відповідного математичного апарату для їх формалізації, зокрема теорії систем масового обслуговування (СМО), у межах якої аеропортовий вузол може бути розглянутий як багатоканальна система з очікуванням, параметри якої визначаються інтенсивністю надходження вантажів, швидкістю їх обробки та кількістю каналів обслуговування.

Представлення аеропортового вузла у вигляді багатоканальної СМО дозволяє формалізувати процес надходження вантажів через інтенсивність вхідного потоку λ (середня кількість заявок або транспортних одиниць, що надходять до системи за одиницю часу); оцінювати та прогнозувати затримки в чергах, які виникають у разі невідповідності між інтенсивністю надходження λ та продуктивністю обслуговування μ , а також контролювати стійкість функціонування вузла через рівень завантаження каналів s [18-19].

Подальший аналіз параметрів функціонування аеропортового вузла здійснюється із застосуванням методів економіко-математичного моделювання, у межах якого задача багатокритеріальної оптимізації формалізується у вигляді моделі змішаного цілочисельного нелінійного програмування із заданою цільовою функцією та системою обмежень.

Початковим етапом постановки оптимізаційної задачі є формування вектора керованих змінних X , який відображає інтенсивності вантажопотоків та параметри ресурсного забезпечення вантажних фронтів різних видів транспорту в аеропортовому вузлі:

$$X = \{\lambda_{авт, i}, \lambda_{зал, i}, \lambda_{авіа, i}, n_{авт}, n_{зал}, n_{авіа}, n_{конт}\}; \quad (i=1, \dots, m), \quad (1)$$

де, $\lambda_{авт, i}, \lambda_{зал, i}$ – інтенсивність надходження до аеропортового вузла i -го виду вантажу автомобільним та залізничним транспортом відповідно, т/год.; $\lambda_{авіа, i}$ – інтенсивність завантаження i -го виду вантажу на повітряні судна (ПС), т/год.; – кількість механізованих навантажувально-розвантажувальних пунктів автомобільного транспорту; $n_{зал}$ – кількість механізованих вантажних фронтів залізничного транспорту; $n_{авіа}$ – кількість місць стоянок вантажних ПС, оснащених перонними засобами механізації; $n_{конт}$ – кількість механізованих контейнерних майданчиків.

Далі на основі вектора керованих змінних, формується цільова функція оптимізації, яка спрямована на мінімізацію інтегрального критерію

ефективності взаємодії різних видів транспорту в процесі обробки вантажів в аеропортовому вузлі ІТЛС, структура якого визначається економічною, часовою та екологічною складовими.

Враховуючи необхідність одночасного врахування витрат, тривалості обробки вантажів та екологічних наслідків, що виникають під час виконання технологічних операцій, задача оптимізації набуває багатокритеріального характеру, у зв'язку з чим для її практичного розв'язання узагальнений інтегральний критерій ефективності $F(X)$ подається у вигляді зваженої суми нормованих часткових показників:

$$F(X) = \omega_{\text{екол}} \tilde{f}_{\text{екол}}(X) + \omega_{\text{час}} \tilde{f}_{\text{час}}(X) + \omega_{\text{екол}} \tilde{f}_{\text{екол}}(X) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\tilde{f}_{\text{екол}}(X), \tilde{f}_{\text{час}}(X), \tilde{f}_{\text{екол}}(X)$ – нормовані в інтервалі $[0;1]$ часткові критерії, що характеризують відповідно економічну, часову та екологічну складові ефективності взаємодії різних видів транспорту у процесі обробки вантажів в аеропортовому вузлі ІТЛС; $\omega_{\text{екол}}, \omega_{\text{час}}, \omega_{\text{екол}}$ – вагові коефіцієнти пріоритетності часткових критеріїв, визначені за методом аналізу ієрархій Т. Сааті ($\sum_{j=1}^3 \omega_j = 1$); X – вектор керованих змінних моделі.

Сукупні витрати, що виникають у процесі обробки вантажів та взаємодії різних видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС, відображаються економічною складовою $f_{\text{екол}}(X)$ інтегрального критерію ефективності $F(X)$, що визначається за такою формулою:

$$f_{\text{екол}}(X) = \sum_{i=1}^m (C_{\text{оч,авт}} \lambda_{\text{авт},i} + C_{\text{оч,зал}} \lambda_{\text{зал},i}) + C_{\text{експл,авт}} n_{\text{авт}} + C_{\text{експл,зал}} n_{\text{зал}} + C_{\text{експл,авіа}} n_{\text{авіа}} + C_{\text{експл,конт}} n_{\text{конт}} + C_{\text{скл,зб}} \int_0^T Q_i(t) dt, \quad (3)$$

де $C_{\text{оч,авт}}, C_{\text{оч,зал}}$ – питомі витрати перебування автомобіля та вагона в системі очікування, грош. од./год.; $C_{\text{експл,авт}}, C_{\text{експл,зал}}, C_{\text{експл,авіа}}, C_{\text{експл,конт}}$ – вартість однієї години експлуатації наземних засобів механізації на автомобільному, залізничному, авіаційному та контейнерних вантажних фронтах аеропортового вузла; $C_{\text{скл,зб}}$ – питома вартість зберігання однієї тони вантажу на складі, грош.од./ (т/год); $Q_i(t)$ – обсяг і-го виду вантажу на складі в момент часу t , т; $\int_0^T Q_i(t) dt$ – запас і-го виду вантажу, що знаходиться на складі упродовж операційного періоду, т; T – тривалість операційного періоду зберігання вантажу на складі до моменту завершення формування авіаційної партії, год.

Часова складова $f_{\text{час}}(X)$ інтегрального критерію ефективності $F(X)$ характеризує сумарну тривалість перебування вантажів та транспортних засобів у системі обробки аеропортового вузла ІТЛС, що охоплює як виконання вантажних опе-

рацій, так і процеси взаємодії різних видів транспорту:

$$f_{\text{час}}(X) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{Q_{\text{парт},i}} \int_0^T Q_i(t) dt + \frac{Q_{\text{парт},i}}{P_{\text{ПС}}} \right) + \sum_{k=1}^4 (t_{\text{оч},k} + t_{\text{пр},k}), \quad (4)$$

де $t_{\text{оч},k}$ – середній час очікування транспортної одиниці в черзі на k -му вантажному фронті, год.; $t_{\text{пр},k}$ – середній час виконання НРР на k -му вантажному фронті, год.; $Q_{\text{парт},i}$ – обсяг і-го виду вантажу в одній авіаційній партії, т; $P_{\text{ПС}}$ – загальна пропускна спроможність фронту завантаження ПС, т/год. (обчислюється як сума продуктивностей окремих місць завантаження ПС, т/год.).

Значення екологічної складової $f_{\text{екол}}(X)$ інтегрального критерію ефективності $F(X)$ визначається на основі сумарного обсягу викидів забруднюючих речовин, що виникають унаслідок роботи транспортних засобів у режимі очікування, функціонування засобів механізації, задіяних у НРР, експлуатації складської інфраструктури, а також виконання операцій наземного обслуговування ПС на пероні, таким чином:

$$f_{\text{екол}}(X) = \sum_{i=1}^m (e_{\text{оч,авт}} \lambda_{\text{авт},i} + e_{\text{оч,зал}} \lambda_{\text{зал},i}) + e_{\text{пр}} (n_{\text{авт}} + n_{\text{зал}} + n_{\text{авіа}} + n_{\text{конт}}) + e_{\text{скл}} S_{\text{скл}} + e_{\text{пер}} \sum_{i=1}^m Q_{\text{парт},i}, \quad (5)$$

де $e_{\text{оч,авт}}, e_{\text{оч,зал}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин від роботи двигунів автомобільного транспорту та маневрових локомотивів в режимі очікування, кг/год.; $e_{\text{пр}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин від роботи одного механізму НРР (навантажувачів, тягачів та іншої техніки наземного обслуговування), кг/год.; $e_{\text{скл}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин, пов'язані із функціонуванням складської інфраструктури (енергоспоживання систем освітлення, вентиляції та клімат-контролю) кг/(м²/год.); $S_{\text{скл}}$ – площа складської зони аеропортового вузла ІТЛС, м²; $e_{\text{пер}}$ – питомі викиди забруднюючих речовин, що виникають під час наземного обслуговування ПС на пероні аеропорту, кг/рейс.

Формування вихідного вантажопотоку в межах складської підсистеми визначається співвідношенням інтенсивностей надходження та вибуття вантажів, що дозволяє формалізувати процес трансформації вхідних потоків у вихідні за допомогою рівняння матеріального балансу:

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = \lambda_{\text{авт},i}(t) + \lambda_{\text{зал},i}(t) - \lambda_{\text{авіа},i}(t), \quad (6)$$

де $\frac{dQ_i(t)}{dt}$ – швидкість зміни запасу і-го виду вантажу на складі, т/год.

Умови, що визначають початковий стан складської підсистеми та момент завершення формування авіаційної партії, задаються таким чином:

$$Q_i(0) = Q_{0,i}, \quad (7)$$

$$Q_i(T) = Q_{\text{парт},i}, \quad (8)$$

де, $Q_{0,i}$ – обсяг і-го виду вантажу, що перебуває на складі аеропортового вузла на початку розрахункового періоду, т; $Q_{\text{парт},i}$ – обсяг і-го виду вантажу в одній авіаційній партії, т

Перевірка відповідності моделі технологічним обмеженням системи проводиться шляхом зіставлення пропускної спроможності вантажних фронтів з інтенсивностями надходження транспортних одиниць, які визначаються через співвідношення інтенсивності вантажопотоку та середньої маси вантажу в одній транспортній одиниці:

$$\lambda_{\text{авт},i}^{\text{од}} = \frac{\lambda_{\text{авт},i}}{q_{\text{авт}}}, \quad (9)$$

$$\lambda_{\text{зал},i}^{\text{од}} = \frac{\lambda_{\text{зал},i}}{q_{\text{зал}}}, \quad (10)$$

$$\lambda_{\text{конт},i}^{\text{од}} = \frac{\lambda_{\text{конт},i}}{q_{\text{конт}}}, \quad (11)$$

де, $\lambda_{\text{авт},i}^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження автомобілів з вантажем і-го виду до автомобільного вантажного фронту аеропортового вузла, од./год.; $\lambda_{\text{зал},i}^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження рухомого складу з вантажем і-го виду до залізничного вантажного фронту аеропортового вузла, од./год.; $\lambda_{\text{конт},i}^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження контейнерів з вантажем і-го виду на механізовані контейнерні майданчики аеропортового вузла, од./год.; $q_{\text{авт}}, q_{\text{зал}}, q_{\text{конт}}$ – середня маса вантажу в одному автомобілі, вагоні та контейнері відповідно, т.

Розрахунок годинної продуктивності одного каналу виконання НРР μ_k та пропускної спроможності відповідного вантажного фронту P_k здійснюється за такими залежностями:

$$\mu_k = \frac{1}{t_{\text{пр},k}}, \quad (12)$$

$$P_k = n_k \mu_k q_k, \quad (13)$$

де $t_{\text{пр},k}$ – середній час виконання НРР на k -му вантажному фронті, год.; n_k – кількість механізованих каналів виконання НРР на k -му вантажному фронті ($n_{\text{авт}}, n_{\text{зал}}, n_{\text{конт}}$); q_k – середня маса вантажу, що припадає на одну транспортну одиницю, яка обробляється на k -му вантажному фронті, т; P_k – годинна пропускна спроможність k -го вантажного фронту за обсягом обробленого вантажу, т/год.

Вимога технологічної стійкості функціонування аеропортового вузла ІТЛС під час виконання вантажних операцій та взаємодії різних

видів транспорту передбачає, що коефіцієнт завантаження кожного вантажного фронту ρ_k не повинен перевищувати одиницю:

$$\rho_k = \frac{\lambda_k^{\text{од}}}{n_k \mu_k} < 1, \quad (14)$$

де $\lambda_k^{\text{од}}$ – інтенсивність надходження транспортних одиниць до k -го вантажного фронту, од./год.; – кількість механізованих каналів виконання НРР на k -му вантажному фронті ($n_{\text{авт}}, n_{\text{зал}}, n_{\text{конт}}$); μ_k – годинна продуктивність одного каналу виконання НРР, од./год.

Умова $\rho_k < 1$ забезпечує технологічну стійкість системи обробки вантажів, що досягається за перевищення інтенсивності обслуговування транспортних одиниць над інтенсивністю їх надходження до відповідного вантажного фронту.

Обчислення середнього часу очікування транспортної одиниці в черзі перед початком обслуговування на k -му вантажному фронті $t_{\text{оч},k}$ здійснюється за такою залежністю:

$$t_{\text{оч},k} = \frac{\rho_k \pi_{\text{чер},k}}{\lambda_k^{\text{од}} (1 - \rho_k)}, \quad (15)$$

де $\pi_{\text{чер},k}$ – ймовірність наявності черги у системі обслуговування k -го вантажного фронту аеропортового вузла.

Формування системи обмежень виконується на завершальному етапі моделювання та спрямоване на визначення допустимої області значень керованих змінних з урахуванням технологічних та просторових можливостей основних елементів аеропортового вузла ІТЛС, що забезпечують узгоджену взаємодію різних видів транспорту під час обробки вантажів:

$$X \in \Omega: \left\{ P_{\text{контр}} \geq \sum_{i=1}^m \lambda_{\text{авт},i}; L_{\text{фронт}} \geq n_k l_{\text{норм}}; \sigma \sum_{i=1}^m Q_i(t) \leq S_{\text{скл}}; \sum_{i=1}^m Q_{\text{парт},i} \leq G_{\text{ІТЛС}} \right\}, \quad (16)$$

де $P_{\text{контр}}$ – годинна пропускна спроможність зони безпекового та митного контролю вантажів аеропортового вузла ІТЛС, т/год; $L_{\text{фронт}}$ – загальна довжина вантажних фронтів аеропортового вузла ІТЛС, м; $l_{\text{норм}}$ – нормативна довжина вантажного фронту, необхідна для обслуговування однієї транспортної одиниці, м; σ – питомий норматив складської площі для зберігання однієї тони вантажу, м²/т.

З метою підтвердження науково-практичної цінності запропонованої моделі у даній роботі проведено експериментальні розрахунки інтегрального критерію ефективності взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів в аеропортовому вузлі ІТЛС у програмному середовищі MATLAB за трьома стратегіями розвитку (S1 – мінімізація витрат; S2 – мінімізація часу;

S3 – мінімізація екологічного навантаження) та при різних значеннях добової потужності – 120 т/добу, 240 т/добу та 480 т/добу). Вагові коефіцієнти ω_j , що відображають відносну важливість економічних, часових та екологічних складових інтегрального коефіцієнту ефективності, визначені експертним шляхом із застосуванням методу аналізу ієрархій Т. Саати [20-21].

На рис. 1 показано зміну значень інтегральної цільової функції $F(X)$ та її складових за різними сценаріями функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від його потужності.

Результати розрахунків свідчать, що зі зростанням пропускної спроможності аеропортового вузла ІТЛС від 120 до 480 т/добу відбувається збільшення кількості каналів виконання НРР на всіх вантажних фронтах, що забезпечує підвищення інтенсивності обробки вантажів, тоді як динаміка зміни середнього часу очікування транспортних засобів у системі істотно залежить від обраної стратегії оптимізації.

У межах стратегії мінімізації витрат збільшення потужності вузла та кількості каналів

обслуговування супроводжується скороченням середнього часу очікування транспортних засобів з 1,33 до 0,4 год, однак використання мінімально необхідного ресурсного забезпечення зумовлює зростання тривалості технологічного циклу при підвищенні інтенсивності вантажопотоку, що призводить до утворення черг, підвищення екологічного навантаження та погіршення значення інтегрального критерію ефективності $F(X)$, яке змінюється від 0,39 до 0,71.

Для стратегії мінімізації часу характерним є збільшення кількості каналів обслуговування з метою підвищення пропускної спроможності системи, що дозволяє суттєво скоротити тривалість логістичного циклу обробки вантажів і зменшити середній час перебування транспортних засобів у системі з 26,36 до 11,50 год, проте супроводжується зростанням експлуатаційних витрат майже на 38% (з 18446 до 25459 євро) внаслідок використання додаткової техніки, тоді як скорочення часових параметрів за сценаріями S2.1–S2.3 забезпечує покращення значення інтегрального критерію $F(X)$ з 0,47 до 0,34.

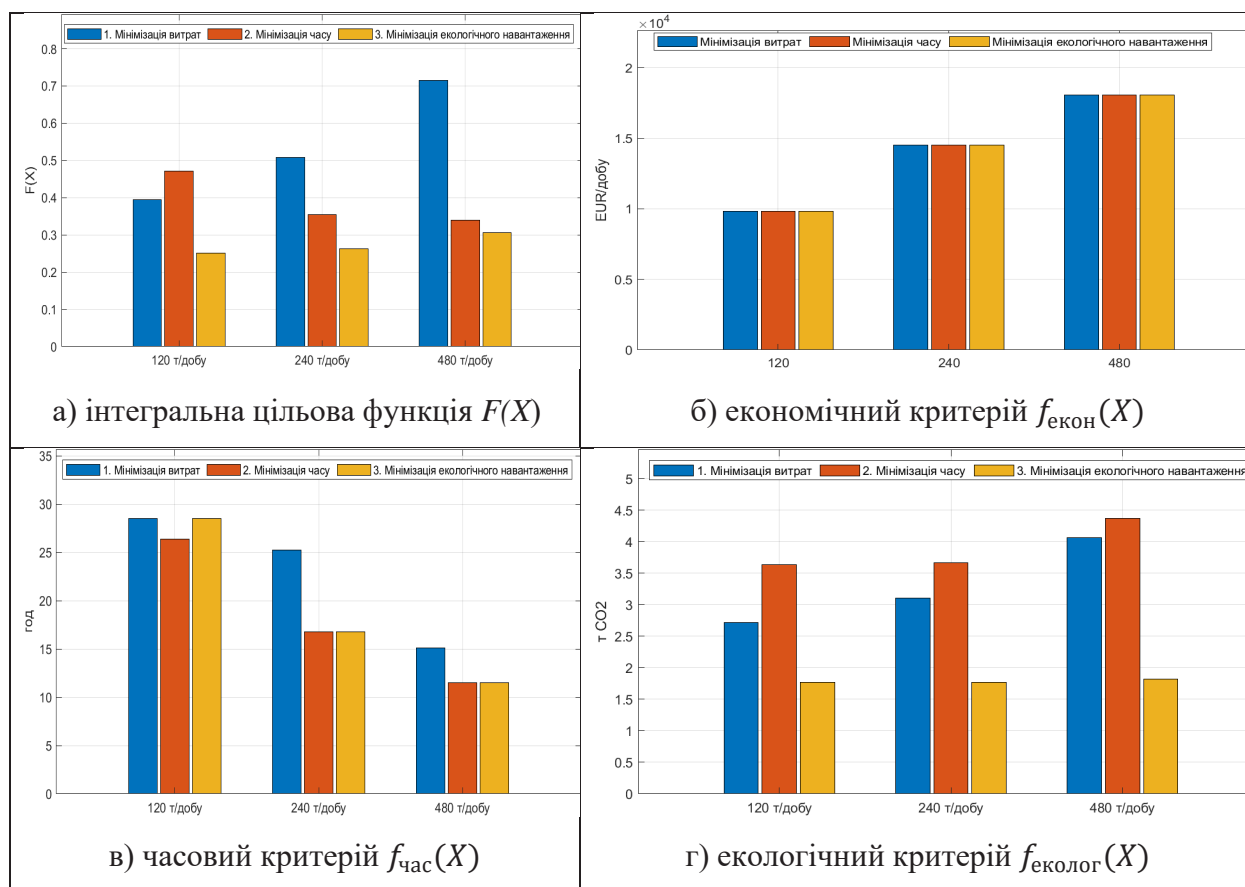


Рис. 1. Значення інтегральної цільової функції $F(X)$ та її складових за різними сценаріями функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від його потужності

Стратегія мінімізації екологічного навантаження дозволяє майже вдвічі скоротити тривалість технологічного циклу та забезпечити більш стабільний і нижчий рівень викидів CO₂ порівняно з іншими стратегіями. Разом з цим, запровадження екологічно орієнтованих рішень потребує додаткових інвестицій, що зумовлює зростання витрат з 11610 до 33773 євро, однак значення інтегрального критерію ефективності $F(X)$ змінюється відносно повільно – від 0,25 до 0,31, що свідчить про більш збалансований характер розвитку системи.

З метою встановлення ступеня відносного впливу економічної, часової та екологічної складових на формування інтегрального критерію ефективності функціонування аеропортового вузла побудовано діаграму Парето, що відображає сценарії взаємодії різних видів транспорту у процесі обробки вантажів та дозволяє наочно оцінити співвідношення витрат, тривалості обробки вантажів та рівня екологічного навантаження за різними стратегіями розвитку вузла, а також визначити область найбільш ефективних управлінських рішень (рис. 2).

Як показує діаграма Парето (рис. 2), розподіл сценаріїв в межах координат «витрати – час обробки вантажів» відображає різні підходи до забезпечення ефективності функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від обраної стратегії розвитку. Детальний аналіз діаграми дозволив виділити область найбільш ефективних рішень, яка відповідає інтервалу витрат 18–26 тис. євро при середній тривалості обробки вантажів 15–17 год. До цієї області належать сценарії S1.3 (мінімізація витрат, потужність 480 т/добу), S2.2 та S2.3

(мінімізація часу, потужність 240–480 т/добу), а також S3.2 (мінімізація екологічного навантаження, потужність 240 т/добу), що забезпечують найбільш збалансоване співвідношення витрат, часових параметрів та рівня екологічного впливу.

Отже, проведені розрахунки підтверджують доцільність вибору режимів функціонування аеропортового вузла в межах визначеної області ефективних рішень та демонструють практичну значущість запропонованого багатокритеріального підходу.

Таким чином, на основі узагальнення отриманих даних обчислювального експерименту та сценарного аналізу встановлено закономірності взаємозв'язків між економічними, часовими та екологічними показниками функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від обраної стратегії розвитку, що обґрунтовує можливість використання запропонованої моделі для оптимізації процесів взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів на базі аеропортових комплексів.

Висновки. Інтегрована транспортно-логістична система (ІТЛС) являє собою складну соціотехнічну систему, в межах якої аеропорт виступає ключовим вузловим елементом, забезпечуючи організаційно-технологічну узгодженість між різними видами транспорту, синхронізацію та координацію потокових процесів, а також формування високого рівня сталості, гнучкості й адаптивності до впливу зовнішнього та внутрішнього середовища, тоді як ефективність функціонування такого вузла визначається збалансованістю часових, економічних, ресурсних та екологічних параметрів його діяльності.

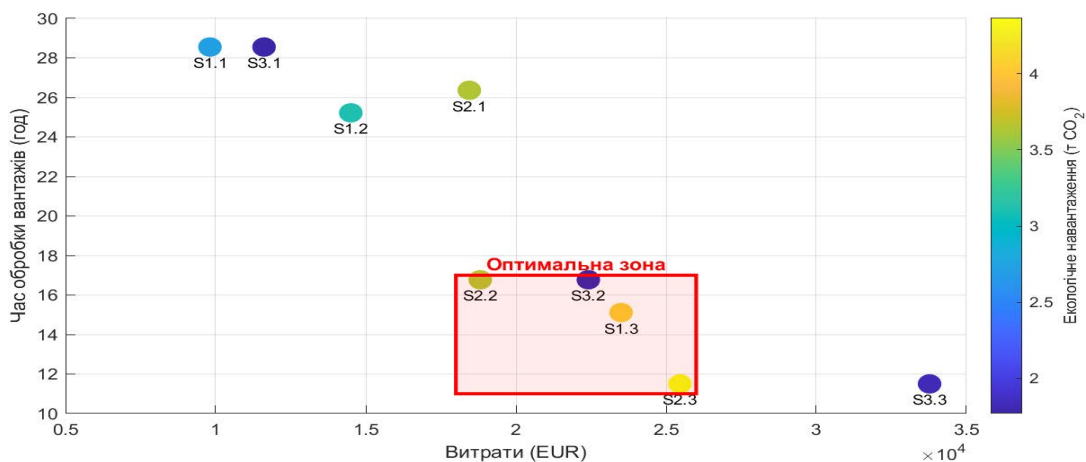


Рис. 2. Діаграма Парето сценаріїв взаємодії видів транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС в процесі обробки вантажів

Аналіз існуючих наукових підходів показав, що переважна кількість досліджень спрямовані або на оптимізацію окремих технологічних операцій, або на стратегічних аспектах розвитку інфраструктурних об'єктів без комплексної формалізації взаємозв'язків між різними видами транспорту в аеропортових вузлах як системоутворювальних елементах ІТЛС, унаслідок чого відсутність цілісного економіко-математичного інструментарію для формалізації та оцінювання взаємовпливів між відповідними параметрами знижує обґрунтованість управлінських рішень щодо організації взаємодії авіаційного та наземного транспорту.

Розроблена багатокритеріальна економіко-математична модель надає можливість оптимізувати процеси взаємодії автомобільного, залізничного та авіаційного транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС з урахуванням економічних витрат, тривалості технологічних циклів та екологічних наслідків, що виникають під час обробки вантажів, поєднуючи методи багатокритеріальної оптимізації, теорії масового обслуговування та сценарного аналізу, а також дозволяє оцінювати інтенсивність надходження вантажопотоків, продуктивність вантажних фронтів, параметри складської підсистеми та враховувати технологічні обмеження конкретного аеропортового вузла.

За результатами сценарного аналізу встановлено, що зміна пріоритетів інтегрального кри-

терію оптимізації суттєво впливає на структуру використання ресурсів системи обробки вантажів, тривалість технологічних операцій, економічні витрати та рівень екологічного навантаження.

Для оцінювання відносного впливу економічної, часової та екологічної складових на формування інтегрального критерію ефективності функціонування аеропортового вузла побудовано діаграму Парето, що дало змогу визначити співвідношення витрат, тривалості обробки вантажів та рівня екологічного навантаження за різними стратегіями розвитку вузла та виокремити область найбільш ефективних рішень, яка відповідає інтервалу витрат 18–26 тис. євро при середній тривалості обробки вантажів 15–17 год.

Апробація запропонованого підходу дозволила встановити закономірності взаємозв'язків між економічними, часовими та екологічними показниками функціонування аеропортового вузла ІТЛС залежно від обраної стратегії розвитку, що обґрунтовує можливість використання розробленої моделі для визначення оптимальних параметрів взаємодії різних видів транспорту під час обробки вантажів та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Подальший розвиток дослідження доцільно спрямувати на створення імітаційної моделі оптимізації взаємодії авіаційного та наземних видів вантажного транспорту в аеропортовому вузлі ІТЛС.

Список літератури:

1. Polater A. Airports' role as logistics centers in humanitarian supply chains: A surge capacity management perspective. *Journal of Air Transport Management*. 2020. Vol. 83. 101765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101765>.
2. Toet A. Themes for an airport hub in the transition towards a multimodal transport hub – an embedded researcher's perspective. *IASDR 2023: Life-Changing Design*. 2023. URL: <https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.272>.
3. Toet A., Boersma K., Kuijk J. V. Reimagining the role of hub airports as multimodal transport hubs in a sustainable future. *Journal of Airport Management*. 2025. Vol. 19, no. 3. P. 206. URL: <https://doi.org/10.69554/owdx1327>.
4. Lee H., Yang H. M. Strategies for a global logistics and economic hub: Incheon International Airport. *Journal of Air Transport Management*. 2003. Vol. 9, no. 2. P. 113–121. URL: [https://doi.org/10.1016/s0969-6997\(02\)00065-0](https://doi.org/10.1016/s0969-6997(02)00065-0).
5. Węglinski B. Central transport hub in Poland's airport system. *Journal of Modern Science*. 2025. Vol. 62, no. 2. P. 739–759. URL: <https://doi.org/10.13166/jms/207574>.
6. Akimova T. A., Nadutenko T. V., Moiseeva N. O. Strategies for future development of hub airport in Ukraine. *Science-based Technologies*. 2013. Vol. 20, no. 4. URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.20.5692>.
7. Van Asch T. et al. Air cargo and airport competitiveness. *Journal of Air Transport Studies*. 2019. Vol. 10, no. 2. P. 48–75. URL: <https://doi.org/10.38008/jats.v10i2.142>.
8. Zheng Y., Huang Y., Wang H. Integrated hub airport location and fleets planning for airline-alliance-oriented freight transport system. *Journal of Air Transport Management*. 2026. Vol. 130. 102889. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102889>.
9. Hatipoğlu S., Ergül H., Yazıcı E. Selection of secondary hub airport location based on connectivity and green airport solutions. *Networks and Spatial Economics*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11067-024-09622-6>.
10. Watanabe D. et al. Hub airport location in air cargo system. *SICE 2008 – 47th Annual Conference*. 2008. URL: <https://doi.org/10.1109/sice.2008.4654791>.
11. Zhou C. C., Hu D. D. Location optimization of airport emergency firefighting system. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 779–780. P. 985–990. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.779-780.985>.

12. McNair A. W., Kwon K. Cargo airport planning: Discerning spatial distributions of freight development in airport-adjacent communities. *Transportation Research Record*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1177/03611981231178808>
13. Du H., Tu M., Wang Z. Coordination assessment and optimization of airport hubs and integrated transportation networks. *ICTETS 2024*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1117/12.3054938>.
14. Qiu J., Zhang K., Tang M. Dynamic optimization strategy of large airport cargo location based on virus evolutionary genetic algorithm. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2022. Vol. 70, no. 1. P. 73–83. URL: <https://doi.org/10.46904/eea.22.70.1.1108008>
15. Piera Eroles M. À., Ramos J. J., Robayna Fernandez E. Airport logistics operations. In: *Simulation-Based Case Studies in Logistics*. London, 2009. P. 209–228. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-84882-187-3_12.
16. Kang X., Chen L. Quantifying the environmental benefits of green development: A carbon emission reduction analysis of air logistics in airport-type national logistics hub cities. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1002/ep.14572>.
17. Fu Y. et al. Carbon emission prediction of hub airport under dual carbon background: Take a hub airport in southwest China as an example. *Advances in Computer and Engineering Technology Research*. 2024. Vol. 1, no. 4. P. 158. URL: <https://doi.org/10.61935/acetr.4.1.2024.p158>.
18. Sun, S., & Kamath, M. (2025). Applications of queueing models to improve airport operations. *Queueing Models and Service Management*, 8(1), 51–82. URL: <http://qmsm.nchu.edu.tw/index.php/qmsm/article/view/100/95>.
19. Jain, R., Bedekar, H., Jayakrishna, K., Vimal, K. E. K., & Vijaya Kumar, M. (2020). Analysis and optimization of queueing systems in airports—Discrete event simulation. In H. Voruganti, K. Kumar, P. Krishna, & X. Jin (Eds.), *Advances in applied mechanical engineering* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1201-8_125.
20. Saaty T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*. 1977. Vol. 15, no. 3. P. 234–281. URL: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
21. Saaty T. L. Priority Setting in Complex Problems. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Berlin, Heidelberg, 1983. P. 326–336. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-46473-7_32.

Sokolova O.Ye., Borets I.V. MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF CARGO HANDLING PROCESSES IN AN AIRPORT NODE OF AN INTEGRATED TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM

Modern transport and logistics processes are characterized by increasing requirements for speed, reliability, and economic efficiency of freight transportation, while ensuring cargo integrity and minimizing environmental impact. Under these conditions, integrated transport and logistics systems (ITLS) become increasingly important, where airports act as system-forming nodes that ensure coordination, synchronization, and integration of different modes of transport.

The efficiency of airport node operation is determined by the balance of economic, time, and environmental parameters, which necessitates the application of comprehensive approaches to optimizing cargo handling processes. It is established that existing scientific approaches are mainly focused on individual aspects of air transport systems and do not provide a comprehensive formalization of interactions between different modes of transport within airport nodes.

This study develops a multicriteria economic and mathematical model for optimizing the interaction processes of road, rail, and air transport within an airport node of an ITLS, taking into account economic costs, processing time, and environmental impacts. The model is based on a combination of multicriteria optimization methods, queueing theory, and scenario analysis, enabling the assessment of freight flow intensity, handling capacity of cargo terminals, and parameters of the warehouse subsystem under technological constraints of a specific airport node.

The results of the computational experiment show that changes in the priorities of the integrated optimization criterion significantly affect resource allocation, processing time, economic costs, and environmental performance of the cargo handling system. Based on Pareto analysis, a region of the most efficient solutions is identified, corresponding to cost values of EUR 18–26 thousand and an average cargo handling time of 15–17 hours.

The obtained results confirm the applicability of the proposed model for determining optimal parameters of multimodal interaction in airport cargo handling processes and for supporting informed decision-making. Further research is aimed at developing a simulation model for optimizing the interaction between air and ground freight transport within an airport node of an integrated transport and logistics system.

Keywords: integrated transport and logistics system, airport node, multimodal transport interaction, cargo handling, multicriteria optimization, economic and mathematical model, scenario analysis.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026