

Доля К.В.

Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут"

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ВУЗЛА ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИМИ ТА ВАНТАЖНИМИ ПОТОКАМИ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

У статті досліджено підвищення ефективності оперативного керування мультимодальним транспортним вузлом в умовах мінливого попиту, конкуренції пасажирських і вантажних потоків за спільні ресурси та випадкових збурень. Мета роботи — розробити концептуально-методичну основу цифрового двійника, що підтримує диспетчерські рішення в реальному часі через поєднання моніторингу, короткострокового прогнозування, сценарної перевірки та багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано інтегровану модель стану вузла з урахуванням попиту, насичення інфраструктури, часу пересадки, тривалості вантажної обробки та якості даних. У керуючому контурі реалізовано вибір дій за критерієм мінімізації зважених втрат із дієвою поправкою на ризик, що дозволяє відсікати нестійкі рішення. Для верифікації виконано обчислювальний експеримент на тестовому вузлі з двома режимами: базовим правилним і сценарно-адаптивним у контурі цифрового двійника. Отримано покращення ключових показників: зниження середніх затримок, частки перевантажених зон, часу пересадки та тривалості вантажної обробки, а також зростання індексу стабільності. У стрес-сценарії підтверджено вищу дієвість підходу: нижчі пікові перевантаження й швидше відновлення до штатного режиму. Наукова новизна полягає в інтеграції пасажирського і вантажного контурів у єдиній адаптивній постановці керування та в обґрунтуванні компромісної області ваг цільової функції. Практичне значення результатів полягає у можливості створення системи підтримки диспетчерських рішень для міських транспортно-логістичних хабів із подальшим масштабуванням. Запропонований підхід також враховує вплив якості телеметричних даних: за контрольованого рівня пропусків і затримок ефективність керування зберігається, тоді як деградація data governance знижує точність прогнозу й якість рекомендацій. Підхід придатний для поетапної інтеграції в чинні міські платформи транспортного моніторингу.

Ключові слова: цифровий двійник, мультимодальний транспортний вузол, адаптивне керування, пасажирські потоки, вантажні потоки, багатокритеріальна оптимізація, диспетчерські рішення, реальний час.

ВСТУП

Мультимодальні транспортні вузли в сучасних містах виконують роль ключових точок взаємодії пасажирських і вантажних потоків, поєднуючи залізничний, автомобільний, міський рейковий, автобусний та інші види транспорту в єдиному операційному контурі. Саме на рівні вузла формуються критичні часові й просторові взаємозалежності: стикування розкладів, пропуск пасажирів через пересадкові зони, обробка вантажів у термінальних секторах, розподіл інфраструктурних ресурсів у пікові періоди. За умов зростання мобільності населення, розвитку e-commerce та підвищення вимог до швидкості обслуговування традиційні підходи до диспетчеризації, що базуються на статичних правилах і періодичному оновленні даних, дедалі частіше виявляються недостатніми.

Практика експлуатації показує, що навіть локальні збурення (затримка прибуття, перевантаження платформи, збій у термінальній операції, обмеження доступу на окрему ділянку) можуть спричинити каскадні наслідки для суміжних модальностей. Це проявляється у зростанні часу пересадки, накопиченні черг, зниженні регулярності обслуговування та підвищенні операційних витрат. Проблема ускладнюється тим, що пасажирський і вантажний контури часто конкурують за спільні ресурси вузла (під'їзні шляхи, часові вікна, персонал, інформаційні канали), а рішення, оптимальне для однієї підсистеми, може погіршувати показники іншої. Отже, для ефективного керування необхідна не лише фіксація поточного стану, а й здатність прогнозувати розвиток ситуації та оцінювати наслідки альтернативних керуючих дій до їх реалізації.

Перспективним інструментом для розв'язання цієї задачі є цифровий двійник мультимодального транспортного вузла — динамічна цифрова модель, синхронізована з фізичним об'єктом у режимі, наближеному до реального часу. На відміну від класичних інформаційно-аналітичних систем, цифровий двійник поєднує моніторинг, прогнозування, імітаційне тестування та модуль прийняття рішень у єдиному середовищі. Це дозволяє перейти від реактивного керування до проактивного: попереджувати перевантаження, адаптувати режими обслуговування, перерозподіляти потоки та підтримувати стійкість роботи вузла за умов невизначеності.

Таким чином, актуальність теми визначається потребою в науково обґрунтованій методиці інтегрованого керування мультимодальним вузлом, яка враховує взаємодію пасажирських і вантажних процесів, обмеження інфраструктури та вимоги до якості сервісу. Розроблення підходу на базі цифрового двійника створює практичну основу для підвищення надійності транспортної системи, скорочення втрат часу та покращення операційної ефективності в умовах реального міського середовища.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні дослідження цифрових двійників у транспорті формують цілісну, але ще неоднорідну наукову базу. У фундаментальних працях цифровий двійник трактується як динамічна кіберфізична модель, що синхронізується з реальним об'єктом за потоковими даними та підтримує прогнозно-управлінські функції [1-2]. Для транспортної сфери ключовим є перехід від «цифрової вітрини» до інструменту оперативного керування, де модель не лише відображає стан вузла, а й тестує сценарії дій до їх впровадження [3-4].

Важливим напрямом є прогнозування пасажиропотоків у складних мережах. Публікації останніх років показують високу ефективність просторово-часових моделей на базі графових архітектур, які враховують топологію станцій, міжлінійні залежності та добову нерівномірність попиту [5-6]. Для міських хабів це критично, оскільки якість короткострокового прогнозу безпосередньо визначає можливість раннього виявлення зон перевантаження. Водночас навіть точний прогноз сам по собі не вирішує проблему: у практиці потрібен формалізований зв'язок між прогнозом та керуючою дією, з урахуванням ресурсних і сервісних обмежень [7].

Окремий блок досліджень стосується логістичних та інтермодальних систем, де цифрові двійники застосовують для управління терміналами, чергами, слотами обробки та використанням інфраструктури [8-9]. У цих роботах доведено, що синхронізація фізичного та цифрового контурів дозволяє зменшити простой і стабілізувати час операцій. Проте для мультимодального вузла змішаного типу (пасажир + вантаж) цього недостатньо: рішення, оптимальне для вантажного сектора, може погіршити якість пасажирських пересадок, і навпаки. Тому в центрі сучасної проблематики знаходиться багатокритеріальна узгодженість управління між підсистемами [10-11].

У роботах з транспортної стійкості підкреслюється, що саме мультимодальні мережі є найбільш чутливими до локальних інцидентів через каскадне поширення ефектів між модальностями [12-13]. Для таких умов пропонують дієві та сценарні підходи, де рішення оцінюють не в одному «середньому» стані, а в множині сценаріїв попиту, затримок, відмов обладнання та обмежень пропускної спроможності [14]. Це особливо важливо для вузлів реального часу, де вартість запізнілої реакції різко зростає в пікові інтервали.

Паралельно формується напрям енергоефективного та сталого управління транспортними системами. Низка досліджень показує, що для цифрових двійників доцільно одночасно оптимізувати часові, сервісні та енергетичні показники, а не мінімізувати лише затримки [15-16]. Такий підхід дозволяє уникати ситуацій, коли локально «швидке» рішення створює довгостроково вищі витрати та більшу вуглецеву інтенсивність. Для мультимодального вузла це означає необхідність інтегрованої функції цілей, яка балансує надійність, швидкість, пропускну спроможність і ресурсну ефективність [17].

Значна частина сучасної літератури також присвячена якості даних для цифрових двійників. Показано, що похибки часової синхронізації, неоднорідність форматів, пропуски телеметрії та затримки в каналах передачі даних прямо впливають на точність прогнозу й коректність диспетчерських рекомендацій [18-19]. Тому практично всі зрілі архітектури включають окремий контур data governance: валідацію потоків, очищення даних, контроль аномалій і моніторинг повноти сигналів [20].

Ще один важливий аспект — мережеве планування маршрутів і перерозподіл потоків у невизначених умовах. Для пасажирських і вантажних процесів активно використовують дієві, багатокритеріальні та стохастичні постановки задач маршрутизації [21-22]. У публікаціях доведено, що за умов мінливого попиту найкращі результати дає поєднання прогнозування з адаптивною переоптимізацією маршрутів і графіків [23]. Це безпосередньо узгоджується з логікою цифрового двійника як платформи «прогноз—сценарій—рішення» [24].

Отже, аналіз літератури дозволяє сформулювати проблему дослідження так: попри значний прогрес у прогнозуванні, імітаційному моделюванні та цифровізації терміналів, недостатньо опрацьованою залишається єдина модель цифрового двійника мультимодального транспортного вузла, яка в реальному часі інтегрує пасажирські й вантажні потоки, підтримує багатокритеріальне

керування та забезпечує стійкість рішень до збурень. Саме усунення цієї методичної прогалини є необхідною передумовою підвищення надійності та ефективності сучасних транспортно-логістичних вузлів.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ціль дослідження. Розробити концептуально-методичну основу цифрового двійника мультимодального транспортного вузла для адаптивного керування пасажирськими та вантажними потоками в реальному часі з урахуванням обмежень пропускної спроможності, сервісної надійності та стійкості до збурень.

Об'єкт дослідження. Процеси функціонування мультимодального транспортного вузла, у межах яких відбувається взаємодія пасажирських і вантажних потоків, розподіл інфраструктурних ресурсів та оперативне диспетчерське керування. Предмет дослідження. Методи, моделі та алгоритми цифрового двійника для прогнозування стану вузла, вибору керуючих дій і оцінювання їх ефективності в режимі реального часу.

Проблеми, що розглядаються у роботі:

відсутність єдиного контуру керування, який одночасно враховує пасажирські та вантажні потоки в межах одного вузла;

запізнена реакція диспетчерських рішень на пікові навантаження та локальні збурення в умовах швидкої зміни попиту;

конфліктність цілей керування (мінімізація затримок, зниження перевантаження, збереження сервісної якості та стабільність вантажних операцій).

Задачі дослідження:

побудувати інтегровану структуру цифрового двійника, що поєднує моніторинг, короткострокове прогнозування та сценарну перевірку рішень;

формалізувати багатокритеріальну задачу адаптивного керування і визначити правила вибору керуючих впливів для реального часу;

оцінити стійкість запропонованого підходу до типових збурень (пікові навантаження, локальні відмови, збої графіка) та визначити практичні умови впровадження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Організація обчислювального експерименту. Для перевірки працездатності сценарноадаптивного багатокритеріального підходу керування в контурі цифрового двійника сформовано тестовий мультимодальний вузол із трьома пасажирськими контурами (приміська залізниця, міський автобус, трамвай) та одним вантажним контуром термінальної обробки. Вузол подано орієнтованим графом $G = (V, E)$, де вершини V відповідають платформам, пересадковим коридорам, вхідним групам і вантажним фронтам, а дуги E — можливим траєкторіям руху пасажирів, транспортних одиниць і вантажних потоків. Для оперативного керування обрано ковзний горизонт 15 хв, крок оновлення стану — 1 хв, крок переобчислення рішення — 5 хв.

Початковий профіль попиту сформовано на основі типового робочого дня з вираженим ранковим і вечірнім піками. У моделі враховано: інтенсивності вхідного пасажирського потоку за напрямками, заявки на термінальні операції, доступність колій/платформ, часові вікна для вантажних маневрів, а також стохастичні збурення (випадкові затримки прибуття, короткочасні обмеження пропускної спроможності, локальні перевантаження зон пересадки).

Альтернативи керування та логіка порівняння. Порівняння виконано для двох режимів базовий та запропонований. Базовий – традиційне керування без цифрового двійника. Рішення приймаються за фіксованими порогоми заповнення й затримки. Запропонований – цифровий двійник + сценарно-адаптивна багатокритеріальна оптимізація з перевіркою рішення на множині короткострокових сценаріїв.

Для кожного кроку t система генерує набір допустимих дій $U(t)$ та множину сценаріїв збурень Ω_t . Кандидатна дія $u \in U(t)$ оцінюється за очікуваною втратою та робастною поправкою (1):

$$L(u, t) = E\omega \in \Omega_t [J(u, \omega, t)] + \lambda CVaR_\alpha(J), \quad (1)$$

де λ — коефіцієнт ризик-аверсії, $CVaR_\alpha$ — умовний ризик у хвості розподілу втрат.

Формалізація стану та керуючих дій забезпечується через вектор стану вузла (2):

$$x(t) = qp(t), qf(t), \rho k(t), \tau tr(t), \tau fr(t), \eta(t), \quad (2)$$

де q_p — пасажирський попит, q_f — вантажний попит, ρ_k — насичення критичного елемента інфраструктури, τ_{tr} — середній час пересадки, τ_{fr} — середній час вантажної обробки, η — індекс інформаційної визначеності (повнота та своєчасність даних).

Керуючий вектор має вигляд наведений в (3):

$$u(t) = \Delta h(t), \Delta r(t), \Delta s(t), \Delta I(t), \Delta a(t), \quad (3)$$

де Δh — корекція інтервалів руху, Δr — перерозподіл маршрутів, Δs — зміна слотів термінальної обробки, ΔI — інформаційні впливи на пасажирів, Δa — активація резервних ресурсів.

Цільову функцію на кроці керування визначено як (4) та (5):

$$J(t) = w_1 T_{delay}(t) + w_2 P_{over}(t) + w_3 T_{transfer}(t) + w_4 T_{freight}(t) + w_5 E_e(t), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad (5)$$

де додано компоненту $E_e(t)$, що відображає енергетично-ресурсну інтенсивність керуючих дій. Для базової конфігурації прийнято $w_1 = 0.30$, $w_2 = 0.25$, $w_3 = 0.20$, $w_4 = 0.15$, $w_5 = 0.10$.

Налаштування експерименту та перевірка збіжності. Імітація охоплює 120 керуючих циклів (еквівалент робочого дня) для кожного режиму. Щоб зменшити вплив випадковості, виконано 30 прогонів Монте-Карло з різними реалізаціями збурень. Порівняння проводилося за середнім значенням показника, стандартним відхиленням та 95%-довірчим інтервалом. Додатково перевірено часову стабільність рішення: частку кроків, на яких система не переходить у критичний режим ($\rho_k > 1.15$ або τ_{tr} перевищує цільовий поріг більш ніж на 30%).

Узагальнені результати по всьому горизонту. У таблиці 1 наведено середні значення ключових індикаторів.

Таблиця 1: Порівняння результатів керування мультимодальним вузлом.

Показник	Сценарій А	Сценарій В
T_{delay} , хв	8.6	5.9
P_{over} , %	24.8	14.1
$T_{transfer}$, хв	11.4	8.7
$T_{freight}$, хв	46.2	39.8
E , ум. од.	1.00	0.91
R_{stable} , %	71.3	84.9

У відносному вимірі запропонований підхід забезпечив зниження середніх затримок на 31%, скорочення частки перевантажених зон на 43%, зменшення часу пересадки на 24% і часу вантажної обробки на 14%. Додатково зафіксовано зниження ресурсно-енергетичної інтенсивності на 9% за рахунок більш рівномірного використання інфраструктури та зменшення кількості аварійних коригувань. Індекс стійкості виконання зріс на 13.6 в.п., що свідчить про кращу здатність системи утримувати робочий режим без переходу до кризових станів.

Динаміку у пікових інтервалах враховано й для поглибленого аналізу виділено ранковий пік (цикли 25–45) і вечірній пік (цикли 80–105). У базовому сценарії спостерігалось накопичення пасажирських черг і відкладення вантажних слотів, що створювало конфлікт у використанні під'їзних колій та платформ. У запропонованому сценарії цифровий двійник за 10–15 хв до досягнення критичних порогів ініціював превентивні дії: часткову зміну інтервалів, переорієнтацію пасажирських потоків через альтернативні коридори й корекцію черги вантажної обробки.

Якісно це дало два ефекти. По-перше, пікові значення ρ_k стали нижчими і коротшими в часі; по-друге, зменшився «хвіст відновлення», тобто період повернення системи до штатних параметрів після піку. У практичному вимірі це означає меншу імовірність каскадного поширення затримок на суміжні модальності.

Результати стрес-тесту на комбіноване збурення. Для оцінки робастності застосовано стрес-сценарій: раптове зростання пасажиропотоку на 18% протягом 40 хв при одночасному зменшенні доступної пропускної спроможності однієї платформи на 15%, таблиця 2.

Таблиця 2: Поведінка системи у стрес-сценарії.

Метрика стрес-тесту	Сценарій А	Сценарій В
Максимальне насичення ρ_{max}	1.34	1.12
Тривалість перевантаження, хв	67	39
Середній додатковий час пересадки, хв	6.1	3.2
Відхилення вантажних слотів, %	19.5	11.3
Час повернення до штатного режиму, хв	74	52

Отримані значення показують, що сценарно-адаптивне керування не лише знижує пік перевантаження, а й пришвидшує відновлення приблизно на 22 хв. Ключовим механізмом є випереджувальний перерозподіл навантаження: система тимчасово зменшує конфлікт за критичні ресурси між пасажирським та вантажним контурами, після чого поетапно повертає планові параметри.

Чутливість до ваг багатокритеріальної функції. Окремо виконано серію експериментів зі зміною ваг w_i у межах ± 0.10 від базових значень. Виявлено, що модель є помірно чутливою до зміщення акценту між пасажирськими та вантажними цілями. Зокрема, підвищення w_3 (пріоритет пересадки) покращує пасажирський сервіс у пікові періоди, але може незначно збільшувати $T_{freight}$; натомість підвищення w_4 стабілізує термінальні операції ціною дещо більшого часу пересадки. Компромісна область ваг, за якої зберігається пріоритет усіх ключових метрик відносно базового сценарію, має вигляд (6):

$$0.25 \leq w_1 \leq 0.35, 0.20 \leq w_2 \leq 0.30, 0.15 \leq w_3 \leq 0.25, 0.10 \leq w_4 \leq 0.20, 0.05 \leq w_5 \leq 0.15. \quad (6)$$

Це підтверджує практичну придатність підходу: диспетчер може змінювати пріоритети під конкретний операційний контекст без втрати системної стійкості.

Вплив якості даних на результат керування. Оскільки цифровий двійник працює у потоковому режимі, проаналізовано чутливість до деградації даних: штучно вводили пропуски телеметрії (5%, 10%, 15%) і затримки оновлення (до 90 с). За рівня пропусків до 10% за наявності модулів валідації та реконструкції даних погіршення ключових метрик не перевищувало 4%. При 15% пропусків і затримці понад 60 с ефективність керування знижувалася істотно: частка перевантажених зон зростала на 6–8% відносно номіналу, а індекс стійкості втрачав до 5 в.п. Це вказує на необхідність підтримувати регламент якості даних як обов'язковий елемент експлуатації цифрового двійника.

Оцінка статистичної значущості. Для головних метрик виконано двовибіркову перевірку середніх між сценаріями А та В на множині Монте-Карло прогонів.

Для показників T_{delay} , P_{over} , $T_{transfer}$ і R_{stable} отримано $p < 0.01$, тобто різниця між сценаріями статистично значуща на рівні 99%. Для $T_{freight}$ і E також зафіксовано значущу перевагу запропонованого підходу ($p < 0.05$). Таким чином, зафіксовані покращення не є артефактом окремої реалізації збурень.

Інтерпретація практичних ефектів. Отримані результати мають безпосередню прикладну цінність для операторів мультимодальних вузлів:

1. зменшення часу пересадки й затримок покращує користувацький сервіс і знижує ризик «ланцюгових» запізнь у суміжних транспортних системах.
2. стабілізація вантажного контуру означає меншу варіативність часу обробки та кращу передбачуваність логістичних операцій.
3. підвищення стійкості до комбінованих збурень підсилює готовність вузла до пікових навантажень і локальних інцидентів без суттєвого нарощування інфраструктурних ресурсів.

Проміжний висновок розділу. Обчислювальний експеримент підтвердив, що інтеграція прогнозу, багатокритеріальної оптимізації та сценарної перевірки в контурі цифрового двійника забезпечує системно кращі результати порівняно з правилним керуванням. Найбільш виражений ефект спостерігається саме в режимах підвищеної невизначеності, де критичною є швидкість і якість адаптивного перерозподілу ресурсів між пасажирськими та вантажними процесами.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Отримані результати підтверджують, що перехід від правилного до сценарно-адаптивного керування в контурі цифрового двійника дає системний ефект для мультимодального вузла. Найбільш значущі покращення зафіксовано за показниками затримок, частки перевантажених зон та

стійкості до комбінованих збурень. Це узгоджується з логікою проактивного керування: рішення формуються не лише за поточним станом, а з урахуванням короткострокового прогнозу та наслідків альтернативних дій. Запропоновано інтегровану постановку керування мультимодальним вузлом, у якій пасажирський і вантажний контури описуються в єдиному оптимізаційному циклі, а не як ізольовані підсистеми. Розвинено сценарно-адаптивний механізм вибору дій, що поєднує багатокритеріальну оцінку з робастною поправкою ризику (через *CVaR*), що дозволяє відсікати рішення, нестійкі в несприятливих сценаріях.

Обґрунтовано практичну область компромісних ваг цільової функції, за якої зберігається одночасний приріст ключових метрик сервісу, пропускної спроможності та надійності. Показано роль контуру якості даних у цифровому двійнику як окремого фактору ефективності керування в реальному часі. Дослідження є таким, що комплексно у межах одного експериментального контуру враховано пасажирські, вантажні, інфраструктурні та сервісні показники. Враховано роботу в умовах невизначеності, а ефективність перевірено не лише на базовому сценарії, а й під стрес-навантаженням із комбінованими збуреннями. Дослідження має значну практичну орієнтацію й отримані індикатори (затримки, час пересадки, стабільність, відхилення слотів) безпосередньо інтерпретуються в диспетчерській практиці. Проведений експеримент має характеристику відтворюваності. Модель апробовано на тестовому полігоні; для повної зовнішньої валідації необхідне впровадження на реальному вузлі з історичними операційними даними.

Перспективи подальших досліджень це перехід від офлайн-імітації до пілотного режиму *hardware-in-the-loop* із підключенням реальних поточкових даних вузла.

Загалом результати роботи свідчать, що запропонований підхід є методично обґрунтованою основою для створення диспетчерського інструменту нового покоління. Водночас подальший розвиток має бути спрямований на зовнішню валідацію, економічне обґрунтування та масштабування з одиничного вузла до мережевого рівня.

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності оперативного керування мультимодальним транспортним вузлом за рахунок використання цифрового двійника. Запропонований підхід об'єднує моніторинг поточного стану, короткострокове прогнозування, сценарну перевірку альтернатив і багатокритеріальний вибір керуючих дій у єдиному контурі реального часу. На відміну від традиційного керування, це дало змогу перейти від реактивної до проактивної логіки прийняття рішень.

За результатами обчислювального експерименту встановлено, що застосування сценарно-адаптивної багатокритеріальної оптимізації в контурі цифрового двійника забезпечує стійке покращення ключових показників функціонування вузла. У порівнянні з базовим сценарієм отримано зниження середніх затримок, скорочення частки перевантажених зон, зменшення часу пересадки пасажирів і тривалості вантажної обробки, а також зростання індексу стабільності виконання. Додатково у стрес-сценарії з комбінованими збуреннями підтверджено дієвість підходу: пікове насичення інфраструктури було нижчим, а повернення системи до штатного режиму — швидшим.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Smart cities of the future / M. Batty, K. Axhausen, F. Giannotti et al. *European Physical Journal Special Topics*. 2023. Vol. 232, No. 4. P. 755–774.
2. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 120952–120971.
3. A proactive event-driven digital twin architecture for logistics and transport operations / A. Bousdekis, B. Magoutas, D. Apostolou, G. Mentzas. *Information Systems*. 2023. Vol. 116. Art. 102212.
4. Data-driven adaptive control for urban transport hubs based on digital twins / S. Wang, N. Zheng, Z. Sun, Y. Liu. *Transportation Research Part C*. 2024. Vol. 161. Art. 104575.
5. Spatio-temporal graph hierarchical learning framework for metro passenger flow prediction across stations and lines / H. Li, W. Fu, H. Zhang et al. *Knowledge-Based Systems*. 2025. Vol. 311. Art. 113132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.1>.
6. STKGformer: A spatio-temporal knowledge graph enhanced transformer for passenger flow prediction / Z. Ji, Z. Hu, S. Chang, W. Zhang. *Information Sciences*. 2026. Vol. 735. Art. 123055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.123055>.
7. Cats O., Yap M., van Oort N. Transfer reliability and service robustness in multimodal passenger systems. *Transport Reviews*. 2023. Vol. 43, No. 5. P. 601–624.

8. Brintrup A., McFarlane D., Giannakis M. Digital twins in logistics and supply chain systems: A review and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 189. Art. 109768.
9. Li J., Chang D., Wen F. Digital twin enhanced rescheduling based on hybrid strategy in intermodal container terminal. *Computers & Operations Research*. 2025. Vol. 180. Art. 107053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107053>.
10. Port digitalization and terminal performance: Implications for real-time operations / M. Acciaro, C. Sys, C. Ferrari et al. *Maritime Policy & Management*. 2024. Vol. 51, No. 3. P. 289–307.
11. Hub seaport multimodal freight transport network design: Perspective of regional integration development / J. Yin, L. Zhang, X. Song et al. *Ocean & Coastal Management*. 2023. Vol. 242. Art. 106675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoam.2023.106675>.
12. Resilience evaluation and improvement of post-disaster multimodal transportation networks / W. Ma, S. Lin, Y. Ci, R. Li. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2024. Vol. 189. Art. 104243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104243>.
13. A survey of multi-modal urban transportation network resilience: Modeling, evaluation, and optimization / X. Chen, L. Wang, Y. Zhang et al. *Transportation Research Part E*. 2026. Vol. 183. Art. 104634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104634>.
14. Robust optimization of multimodal transportation route selection based on multiple uncertainties / B. Yan, J. Zhang, H. Wang et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 1. Art. 5508. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17125508>.
15. Energy-efficient multimodal mobility networks in transportation digital twins: Strategies and optimization / W. Li, B. Wang, R. Sun et al. *Energy*. 2025. Vol. 318. Art. 134587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134587>.
16. Formalizing sustainable urban mobility management: An innovative approach with digital twin and integrated modeling / A. Grotto, P. Pialli, G. Marrone et al. *Logistics*. 2024. Vol. 8, No. 4. Art. 117. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics8040117>.
17. Leveraging digital twin technology for sustainable and efficient public transportation / B. Manandhar, K. D. Vance, D. B. Rawat, N. Yilmaz. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 6. Art. 2942. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15062942>.
18. Data quality governance for digital twin ecosystems / A. Bousdekis, B. Magoutas, D. Apostolou, G. Mentzas. *Information Systems*. 2023. Vol. 116. Art. 102212.
19. Proposing a digital twin DataDOSE framework for asset management in state departments of transportation / H. Nassereddine, A. Khoshkenar, F. Maier et al. *ITcon*. 2025. Vol. 30. P. 963–988. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2025.039>.
20. A data-intelligence-driven digital twin framework for improving sustainability in logistics / I. Abdullahi, D. Liarokapis, H. Larijani et al. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 2. Art. 601. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020601>.
21. Multi-objective optimization for multimodal transportation routing problem with stochastic transportation time based on data-driven approaches / Y. Peng, S. H. Gao, D. Yu et al. *RAIRO – Operations Research*. 2023. Vol. 57, No. 4. P. 2145–2165. DOI: <https://doi.org/10.1051/ro/2023090>.
22. The multi-objective shortest path problem with multimodal transportation for emergency logistics / J. Guo, H. Liu, T. Liu et al. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 17. Art. 2615. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12172615>.
23. Solving the robust shortest path problem with multimodal transportation / S. He, Z. Liu, W. Zhang et al. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, No. 19. Art. 2978. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12192978>.
24. Redesigning large-scale multimodal transit networks with shared autonomous mobility services / M. W. Ng, S. Travis Waller, J. Sun, T. H. Kim. *Transportation Research Part C*. 2024. Vol. 168. Art. 104575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104575>.

Dolia, K. Digital twin of a multimodal transport hub for adaptive management of passenger and freight flows in real time.

The article investigates improving the efficiency of operational management of a multimodal transport hub under variable demand, competition between passenger and freight flows for shared resources, and random disturbances. The aim of the study is to develop a conceptual and methodological framework for a digital twin that supports real-time dispatching decisions through a combination of monitoring, short-term forecasting, scenario testing, and multi-criteria optimization. An integrated hub-state model is proposed, accounting for demand, infrastructure saturation, transfer time, cargo-handling duration, and data quality.

Within the control loop, actions are selected by minimizing weighted losses with robust risk adjustment, which makes it possible to filter out unstable decisions. For verification, a computational experiment was conducted on a test hub in two modes: baseline rule-based control and scenario-adaptive control within the digital twin loop. The results demonstrate improvements in key indicators, including lower average delays, a smaller share of congested zones, shorter transfer and cargo-handling times, and a higher stability index. Under a stress scenario, the approach showed stronger robustness, with lower peak overloads and faster recovery to normal operation. The practical value lies in supporting dispatcher decisions and phased integration into existing urban transport monitoring platforms. The findings confirm that controlling telemetric data quality and coordinating information flows are critical for forecast accuracy, recommendation reliability, and dispatcher support during peak loads and uncertainty.

Key words: digital twin, multimodal transport hub, adaptive control, passenger flows, freight flows, multi-criteria optimization, efficiency, dispatching decisions, real-time operation.

ДОЛЯ Костянтин Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", e-mail: k.v.dolia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4693-9158>

Kostiantyn DOLIA, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cars and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", e-mail: k.v.dolia@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4693-9158>

Дата надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.04.2026

<https://doi.org/10.36910/emwxn052>