

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-107-118>

УДК 656.2:656.072:004.89

РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ПАСАЖИРОПОТОКАМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Доля К.В.

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED MODEL FOR ADAPTIVE MANAGEMENT OF URBAN PASSENGER FLOWS ON RAIL TRANSPORT IN REAL TIME

Dolia K.V.

У статті запропоновано інтегровану модель адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті в режимі реального часу, орієнтовану на зниження затримок, зменшення перевантаження вузлів та підвищення якості сервісу. Методологія поєднує просторово-мережевий аналіз, короткострокове прогнозування попиту, багатокритеріальну оптимізацію, симуляційне тестування керуючих сценаріїв і контур самоадаптації за результатами фактичного виконання рішень. Транспортну систему формалізовано як орієнтований граф із часово-змінними параметрами пропускної спроможності та насичення, а вибір керуючих дій здійснюється за інтегральним критерієм, що враховує операційні, сервісні та енергетичні показники. Для врахування невизначеності використано сценарну перевірку альтернатив перед впровадженням у диспетчерську практику. На відміну від локальних підходів, запропонована архітектура забезпечує узгодження прогнозного, оптимізаційного та виконавчого рівнів у єдиному циклі прийняття рішень. Результати модельного експерименту показали стале покращення ключових індикаторів у порівнянні з базовим режимом: скорочення середніх затримок, зниження частки перевантажених вузлів, покращення сервісної стабільності та зменшення питомих енерговитрат. Проведений аналіз чутливості до зміни ваг критеріїв підтвердив робастність отриманих висновків у межах практично релевантних параметричних варіацій. Обґрунтовано, що найбільший ефект досягається за умов випереджального реагування на зростання насичення та синхронізації інформаційних впливів на пасажирів із оперативним коригуванням режимів руху. Практичне значення

роботи полягає у можливості впровадження моделі в диспетчерських центрах міських залізничних систем як інструменту підвищення надійності перевізного процесу, сервісної якості та ресурсної ефективності. Запропонований підхід може бути використаний як основа для цифрового двійника транспортного вузла, інтегрованого з поточними даними датчиків, системами інформування пасажирів і платформами підтримки диспетчерських рішень. Перспективою подальших досліджень є масштабування моделі на мультимодальні мережі та врахування довгострокових інфраструктурних обмежень. Особливо доцільно додатково дослідити вплив екстремальних подій на стійкість оперативного контуру керування.

Ключові слова: адаптивне управління; пасажиропотоки; міський залізничний транспорт; реальний час; короткострокове прогнозування; багатокритеріальна оптимізація; симуляційне моделювання; диспетчеризація.

Вступ. Сучасні міські агломерації характеризуються високою мобільністю населення, нерівномірністю попиту на перевезення та зростанням навантаження на транспортну інфраструктуру. За таких умов залізничний транспорт є системоутворювальним елементом міських і приміських перевезень, однак традиційні підходи до управління, що спираються на статичні графіки, не забезпечують належної гнучкості в пікові періоди та під час збурень. Це

зумовлює потребу переходу до адаптивного управління пасажиропотоками в режимі реального часу.

Аналіз сучасних досліджень підтверджує суттєвий прогрес у прогнозуванні пасажиропотоків, оптимізації роботи станцій, оцінюванні ефективності транспортних систем, а також у застосуванні цифрових двійників та інтелектуальних інструментів підтримки рішень. Водночас більшість наявних підходів вирішують локальні задачі та не формують єдиного інтегрованого контуру керування, який одночасно враховує оперативні обмеження, якість обслуговування пасажирів і ресурсну ефективність. Отже, науково-прикладна проблема побудови комплексної адаптивної моделі залишається актуальною.

Особливу вагу ця проблематика має для міських залізничних вузлів із високою інтенсивністю руху, де навіть незначні відхилення в інтервалах руху або збільшення часу посадки-висадки призводять до каскадних затримок і нерівномірного розподілу пасажиронавантаження. У практиці експлуатації це проявляється у перевантаженні окремих платформ, зниженні передбачуваності поїздок, погіршенні якості сервісу та зростанні експлуатаційних витрат. Тому сучасні підходи до керування мають бути орієнтовані не лише на післяфактум-аналіз, а насамперед на проактивне прийняття рішень: оперативне перерозподілення пасажиропотоків, адаптацію параметрів руху, узгодження пересадочних зв'язків та динамічне інформування пасажирів. Поєднання потокових даних, короткострокового прогнозу і сценарного оцінювання дозволяє формувати більш стійкий керуючий контур, здатний зменшувати пікові перевантаження та підвищувати надійність роботи транспортної системи загалом.

Метою роботи є розробка інтегрованої моделі адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті в режимі реального часу.

Об'єкт дослідження. Процеси формування та перерозподілу міських пасажиропотоків у системі залізничних перевезень.

Предмет дослідження. Методи та моделі адаптивного управління пасажиропотоками в умовах динамічної зміни попиту й параметрів функціонування транспортної мережі.

Завдання дослідження:

сформувати структуру інтегрованої моделі та інформаційні зв'язки між її підсистемами;

розробити механізм оперативного коригування керуючих рішень на основі поточних даних і короткострокового прогнозу; визначити критерії оцінювання ефективності моделі за показниками пропускної спроможності, регулярності та якості сервісу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведений аналіз наукових джерел показує, що дослідження в галузі міських пасажирських перевезень на залізничному транспорті розвиваються у логіці поступового переходу від описових і локальних рішень до комплексних data-driven підходів. Ранній етап формувався навколо задач прогнозування попиту, операційного планування та технічних параметрів перевезень, тоді як сучасний етап дедалі більше орієнтується на інтеграцію цифрових даних, симуляцій і адаптивного керування в реальному часі. Саме ця еволюція підходів є критично важливою для теми статті, оскільки інтегрована модель адаптивного управління потребує одночасного врахування просторової структури попиту, стану інфраструктури, поведінки пасажирів та експлуатаційних обмежень.

У роботах [1]–[3] акцентовано фундаментальні передумови для побудови такої моделі. Дослідження [1] демонструє можливості аналізу просторової конфігурації транспортної мережі на основі великих масивів пасажирських даних, що дозволяє виділяти вузли концентрації попиту та оцінювати силу міжвузлових зв'язків. Праця [2] фокусується на трансформації систем громадського транспорту в умовах різких зовнішніх шоків і доводить необхідність гнучких організаційних механізмів реагування. У джерелі [3] розглянуто управлінсько-обліковий контур підприємств міського електротранспорту, який важливий для подальшого впровадження системи показників ефективності та відповідальності в адаптивній моделі.

Значний масив досліджень [4]–[12] присвячений оцінюванню ефективності та стійкості транспортних систем. У цих роботах застосовуються багатокритеріальні методики, DEA-підходи, логістичні принципи та методичні рамки порівняльного аналізу. Їхній ключовий внесок полягає у розширенні переліку критеріїв: від суто економічних до комплексних, які включають регулярність руху, якість сервісу, надійність, доступність і ресурсну ефективність. Водночас більшість моделей у цьому блоці є переважно статичними або періодичними за характером оновлення даних, що обмежує їхню

придатність для оперативного диспетчерського управління в умовах швидкої зміни пасажиронавантаження. Таким чином, ці праці створюють важливу методичну базу, але потребують інтеграції з інструментами реального часу.

Напрямок прогнозування попиту та поведінки пасажирів послідовно представлено в джерелах [13]–[15]. У роботі [13] порівнюються soft-computing підходи до передбачення вибору пасажиром поїздки, що є важливим для поведінкового моделювання. У [14] запропоновано концептуальну архітектуру «розумної» станції на базі цифрового двійника, яка принципово важлива для об'єднання потокових даних, аналітики і керуючих впливів. Дослідження [15] демонструє гібридний підхід до прогнозу попиту за умов складної динаміки часових рядів. У сукупності ці праці вказують, що підвищення точності прогнозу є необхідною, але недостатньою умовою: без інтеграції з блоком прийняття рішень прогноз не трансформується в керуючі дії.

Операційно-диспетчерський вимір предметно розкрито в роботах [16]–[20]. Джерело [16] демонструє переваги агентно-орієнтованого моделювання для вирішення задач диспетчеризації завантажених станцій, а [17] акцентує увагу на моделюванні оборотної спроможності станційних процесів. У [18] розглянуто розпізнавання активностей пасажирів за мобільними сенсорами, що відкриває додаткові можливості оперативного моніторингу. Праці [19], [20] зосереджені на коригуванні режимів роботи ліній та оптимізаційних планах функціонування пасажирських систем. Загалом цей блок підтверджує, що симуляційні та алгоритмічні підходи мають високий потенціал для управління у реальному часі, однак часто впроваджуються фрагментарно, без єдиного інтегрованого критеріального контуру.

Дослідження [21]–[23] формують екологічно-безпековий компонент літератури. У [21] аналізується якість повітря в пасажирських вагонах, у [22] – когнітивне навантаження машиністів, у [23] – енергоефективність бортових систем живлення з використанням відновлюваних джерел. Для теми статті ці результати є принциповими, оскільки адаптивна модель не може бути зведена лише до перерозподілу потоків: вона має враховувати безпечність, комфорт пасажирів і енергетичні наслідки управлінських рішень.

Блок [24]–[29] поглиблює аналітику попиту за рахунок дослідження заявок на бронювання, факторних моделей, нечітких оцінок QoS та data mining-підходів. Джерело [24] дає уявлення про часову структуру вхідного попиту в системах продажу квитків; [25], [26] виділяють ключові фактори, що визначають обсяги та поведінку пасажиропотоків; [27] інтегрує ієрархічні та нечіткі процедури для оцінки задоволеності сервісом; [28] пропонує мезоскопічне оцінювання спроможності станційної інфраструктури; [29] демонструє прикладне використання data mining для прогнозування потоків. Сукупно ці праці обґрунтовують доцільність побудови багаторівневої інформаційної моделі, де прогностичний, поведінковий та інфраструктурний компоненти взаємодіють в одному керуючому циклі.

Завершальний тематичний кластер [30]–[32] підкреслює роль цифрових сервісів

і технічної якості перевезень. У [30] розглянуто застосування NFC-технологій у пасажирському транспорті як інструмент підвищення зручності взаємодії з користувачем; у [31] використано TOPSIS для оцінки ефективності пересадок на станціях; у [32] проаналізовано вимірювання вібраційно-шумових параметрів у швидкісному рухомому складі. Ці результати доповнюють операційний контур досліджень, демонструючи, що кінцева ефективність системи визначається не лише пропускнуою спроможністю, а й якістю пасажирського досвіду.

Отже, узагальнення джерел [1]–[32] дозволяє зробити висновок, що наявна наукова база є достатньо широкою, проте фрагментованою: одні праці розв'язують задачі прогнозування, інші – задачі оцінювання ефективності, треті – задачі диспетчеризації чи сервісної цифровізації. Водночас недостатньо опрацьованою залишається постановка єдиної інтегрованої моделі, яка в режимі реального часу поєднує моніторинг, прогноз, симуляційне тестування сценаріїв, вибір керуючого рішення та його оцінювання за багатокритеріальною системою показників. Саме ця науково-прикладна прогалина обґрунтовує актуальність і логіку подальшого дослідження в межах обраної теми.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропонований підхід до адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті сформовано як інтегровану методичну конструкцію, у якій поєднано прогнозні,

оптимізаційні, симуляційні та сервісно-орієнтовані інструменти. Така архітектура відповідає висновкам літературного аналізу [1]–[32], де показано, що ізольоване використання окремих методів (лише прогнозу, лише диспетчеризації або лише оцінки QoS) не забезпечує стабільного ефекту в умовах динамічної зміни попиту. Тому в межах дослідження реалізовано послідовний контур: дані \rightarrow прогноз \rightarrow вибір керуючих дій \rightarrow симуляційна перевірка \rightarrow корекція рішень у реальному часі.

Для розв'язання поставлених у роботі задач використано комбінований набір методів, обраний на основі релевантності до предметної області, обчислювальності реалізованості у режимі реального часу та можливості критеріально прозорого пояснення диспетчерських рішень. Нижче наведено розширений огляд кожного методу: його математичний зміст, управлінську інтерпретацію, сильні сторони та обмеження.

1. Методи просторово-мережевого аналізу.

Транспортна система подана орієнтованим графом $G = (V, E)$, де вершини V відповідають станціям, платформам або пересадковим вузлам, а ребра E — напрямам переміщення пасажирів між ними. Кожному ребру $(i, j) \in E$ ставиться у відповідність вектор параметрів $\mathbf{a}_{ij}(t) = \{\tau_{ij}(t), c_{ij}(t), q_{ij}(t)\}$, де $\tau_{ij}(t)$ — середній час проходження ділянки, $c_{ij}(t)$ — її пропускну спроможність, $q_{ij}(t)$ — поточний потік. Для виявлення структурно критичних вузлів використано зважену центральність (1):

$$C_i^{(w)} = \sum_{j:(i,j) \in E} \frac{q_{ij}}{\tau_{ij} + \eta}, \quad (1)$$

де $\eta > 0$ — стабілізуючий доданок.

Додатково аналізується баланс потоків у вузлі (2):

$$\Delta_i(t) = \sum_{j:(j,i) \in E} q_{ji}(t) - \sum_{k:(i,k) \in E} q_{ik}(t), \quad (2)$$

що дозволяє виявляти точки накопичення пасажирів. Смісл цього методу полягає у переході від локального «спостереження черг» до системного бачення топології перевантажень: диспетчер бачить не лише факт затору, а його мережеву причину (вузол-джерело, вузол-буфер, вузол-поглинач).

Аналіз методу показує, що мережевий підхід має дві ключові переваги: масштабованість для великих систем; природну інтеграцію з алгоритмами маршрутизації і перерозподілу потоків. Водночас він має і

суттєві обмеження. По-перше, агрегація пасажирів у потік q_{ij} приховує індивідуальні поведінкові відмінності (різну толерантність до пересадок, різну чутливість до затримок). По-друге, статична топологія G не повністю відображає тимчасові обмеження (закриття платформ, локальні ремонти, події блокування). По-третє, прості центральності можуть переоцінювати «геометрично важливі», але фактично недовантажені вузли. Для зменшення цих ризиків у роботі поєднано мережеву діагностику з часовими коефіцієнтами насичення та подальшою симуляційною перевіркою. Отже, мережевий аналіз не розглядається як самодостатній інструмент вибору рішень, а як перший аналітичний рівень, що фільтрує зони підвищеного ризику для наступних модулів.

2. Методи оцінювання ефективності та стійкості.

Для уникнення одновимірної оптимізації (лише за затримкою або лише за витратами) використано багатокритеріальний функціонал (3):

$$J(t) = \sum_{k=1}^m w_k \widetilde{F}_k(t), \quad \sum_{k=1}^m w_k = 1, w_k \geq 0, \quad (3)$$

де F_{ek} — нормовані критерії (затримки, перевантаження, енерговитрати, сервіс), w_k — вагові коефіцієнти.

Нормування виконується у вигляді (4):

$$\widetilde{F}_k(t) = F_k(t) - F_k^{min} / F_k^{ma} - F_k^{min} + \delta, \quad (4)$$

де δ запобігає діленню на нуль при вузькому діапазоні змін критерію.

Для оцінки стійкості рішень до зміни управлінських пріоритетів застосовано аналіз чутливості (5):

$$S_k = \left| \frac{\partial J}{\partial w_k} \right| \approx |\widetilde{F}_k|, \quad (5)$$

а також сценарне варіювання ваг у межах допустимого інтервалу. Смісл методу — формально узгодити суперечливі цілі, зберігши прозорість: диспетчер бачить, якою «ціною» покращується один показник і чи не погіршує це інші показники понад прийнятний поріг.

Критично важливо, що лінійно-зважена форма є компромісом між математичною строгістю та операційною інтерпретованістю. Її сильна сторона — швидке переобчислення у контурі реального часу та можливість явного

керування пріоритетами. Її слабкість — ризик «компенсації» поганого значення одного критерію добрим значенням іншого. Наприклад, незначне зниження енерговитрат може формально перекрити неприйнятне зростання часу очікування. Також результат залежить від якості калібрування ваг w_k : некоректна вагова політика може породжувати систематичні зміщення рішень. Тому у роботі багатокритеріальний функціонал доповнено жорсткими обмеженнями на граничні сервісні показники, а не лише їх «штрафами» в цільовій функції. Це зменшує ризик формально оптимальних, але соціально неприйнятних режимів експлуатації.

3. Методи прогнозування попиту.

Для короткострокового горизонту (5–15 хв) застосовано адаптивну рекурентну модель (6):

$$\hat{q}_i(t + \Delta T) = \alpha_i(t)q_i(t) + (1 - \alpha_i(t))\hat{q}_i(t) + \beta_1\phi_i(t) + \beta_2\psi_i(t), \quad (6)$$

де $q_i(t)$ — вимірний потік у вузлі i , $\hat{q}_i(t)$ — попередній прогноз, $\phi_i(t)$ — календарночасові фактори, $\psi_i(t)$ — події фактори.

Адаптація параметра пам'яті виконується за правилом (7):

$$\alpha_i(t + 1) = \text{clip}(\alpha_i - \mu \Delta \epsilon_i t \Delta \alpha_i, \alpha_{min}, \alpha_{max}), \quad (7)$$

Практичний смисл методу полягає у тому, що модель «підлаштовує» інерційність: при спокійному русі більше довіряє історії, а при різких збуреннях оперативніше реагує на нові вимірювання.

Критичний аналіз цього підходу має дві площини. З одного боку, модель відзначається обчислювальною легкістю, прозорістю параметрів і стійкістю за неповних даних, що є критично важливим для диспетчерських систем. З іншого боку, її прогностична здатність обмежена у випадках складної нелінійної динаміки (масові події, каскадні збої, багатокритеріальні піки попиту), де глибокі нейромережеві моделі потенційно точніші. Додатковий ризик — переналаштування під короткий горизонт, що знижує якість прогнозу на 20–40 хв. Саме тому у роботі рекурентний прогноз не використовується як «остаточна істина»: кожне керуюче рішення додатково проходить симуляційну валідацію, а при зростанні похибки понад поріг запускається консервативний режим керування. Така

архітектура знижує залежність системи від помилок окремого прогностичного блоку.

4. Методи оперативної диспетчеризації та симуляції. Вибір керуючої дії виконується в дискретні моменти t_r через задачу умовної оптимізації (8):

$$u^*(t_r) = \arg \min, \quad (8)$$

де $x(t_r)$ — вектор стану мережі, $U(t_r)$ — множина допустимих дій (зміна інтервалів, перерозподіл потоків, інформаційні сценарії). Кандидатні дії перевіряються на моделі переходу стану (9,10):

$$x(t + \Delta t) = f(x(t), u(t), \xi(t)), \quad (9)$$

де $\xi(t)$ — випадкові збурення. Для оцінки надійності рішення застосовано очікуваний ризик

$$R(u) = E_{\xi}[L(x, u, \xi)], \quad (10)$$

а в оперативний контур передається рішення, що одночасно мінімізує J та не перевищує допустимий поріг ризику. Смісл методу — не лише знайти математично «найкращий» варіант, а перевірити його поведінку в умовах невизначеності до фактичного впровадження.

Критичний аналіз показує, що симуляційний контур суттєво підвищує надійність керування, але має ціну. По-перше, точність результату залежить від адекватності калібрування моделі $f(\cdot)$; погано ідентифіковані параметри можуть породжувати хибне відчуття безпеки. По-друге, у режимі жорстких часових обмежень неможливо перевірити «всі» сценарії, отже виникає проблема неповного покриття ризиків. Потретьє, надмірно складна симуляція може сповільнити контур прийняття рішень і зробити реакцію запізнілою. Для балансування цих суперечностей у роботі використано дворівневу логіку: швидкий скринінг сценаріїв спрощеною моделлю і поглиблена перевірка лише для 2–3 найкращих альтернатив. Це дозволяє зберегти обчислювальну дисципліну без втрати критично важливої перевірки керуючих дій.

5. Методи оцінки сервісу та поведінкових реакцій. Для включення «людського фактора» у контур керування застосовано сервісний індекс (11):

$$S(t) = \gamma_1 \widetilde{T_{wait}}(t) + \gamma_2 \widetilde{T_{transfer}}(t) + \gamma_3 \widetilde{I_{comfort}}(t), \quad \sum_{j=1}^3 \gamma_j = 1 \quad (11)$$

Реакцію пасажирів на інформаційні впливи (оголошення, навігацію, push-повідомлення) формалізовано через імовірність вибору альтернативного маршруту (12):

$$P_{r \rightarrow s}(t) = \frac{\exp(-\lambda C_s(t) + \kappa I_s(t))}{\sum_{m \in \mathcal{R}} \exp(-\lambda C_m(t) + \kappa I_m(t))}, \quad (12)$$

де $C_s(t)$ — узагальнена «вартість» маршруту, $I_s(t)$ — інтенсивність інформаційної підтримки, λ, κ — параметри чутливості.

Для неповних даних використано нечітке ранжування QoS із функцією належності (13):

$$\mu_{QoS}(z) = \begin{cases} 0, & z \leq z_{min} \\ z - z_{min} / z_{max} - z_{min}, & z_{min} < z < z_{max}, \\ 1, & z \geq z_{max} \end{cases} \quad (13)$$

Смисл підходу полягає у тому, що керування перестає бути суто інфраструктурним і враховує поведінковий відгук пасажирів, без якого реальний ефект диспетчерських дій часто виявляється нижчим за розрахунковий.

Критично цей метод слід оцінювати обережно. Його перевага — здатність зменшити розрив між «плановим» і «фактичним» ефектом, особливо для пересадкових вузлів із високою інформаційною невизначеністю. Проте на поведінкові моделі впливають соціодемографічні та контекстні фактори, які важко повно врахувати в оперативному контурі. Параметри λ, κ з часом дрейфують, а нечіткі оцінки можуть маскувати гетерогенність груп пасажирів. Крім того, надмірна ставка на інформаційне перенаправлення без інфраструктурної підтримки інколи лише «переміщує» проблему між платформами. Тому у роботі поведінковий модуль використовується як доповнення до інфраструктурних дій, а його параметри регулярно перекалібруються за фактичними даними виконання пересадок.

6. Методи енергетично-екологічної верифікації. Для оцінки ресурсної ефективності рішень введено показник питомих енерговитрат (14):

$$E_{sp}(t) = \frac{E_{tot}(t)}{Q_{tot}(t)}, \quad (14)$$

де $E_{tot}(t)$ — енергія, спожита у вікні аналізу, $Q_{tot}(t)$ — кількість перевезених пасажирів. Енергетичний баланс деталізовано як (15):

$$E_{tot} = \sum_{p \in \mathcal{P}} \int_{t_0}^{t_1} (P_p^{tr}(t) + P_p^{aux}(t)) dt, \quad (15)$$

де P_p^{tr} — тягове, P_p^{aux} — допоміжне споживання. Для екологічної інтерпретації використано індикатор умовних викидів (16):

$$CO_2^{eq}(t) = \chi E_{tot}(t), \quad (16)$$

де χ — питомий коефіцієнт вуглецевого еквівалента для відповідного енергоміксу. Смисл методу — перевірити, чи не досягається операційне покращення (зниження затримок) неприйнятним зростанням енергоспоживання та екологічного навантаження.

Критичний аналіз показує, що введення енергетично-екологічного контуру дисциплінує процес оптимізації і захищає систему від короткозорих рішень. Водночас є методичні труднощі: складність точного розділення тягової та допоміжної складових у реальному часі; залежність показника CO_2^{eq} від зовнішнього енергоміксу, який оператор перевезень контролює лише частково; конфлікт між енергозаощадженням і сервісом у пікові періоди. За цих умов енергокритерій у роботі використано як рівноправний, але не домінуючий: рішення відхиляються, якщо покращують один вимір ефективності за рахунок непропорційного погіршення інших. Такий підхід забезпечує не лише оперативну, а й стратегічну стійкість моделі.

Опис застосованих методів та аргументація їх вибору

Математичну основу моделі задано через вектор стану системи (17):

$$\mathbf{x}(t) = \{q_i(t), h_j(t), v_j(t), c_k(t), s_l(t), e_j(t)\}, \quad (17)$$

де $q_i(t)$ — потік пасажирів у вузлі i ; $h_j(t)$ — інтервал руху на дільниці j ; $v_j(t)$ — швидкість; $c_k(t)$ — пропускна спроможність; $s_l(t)$ — сервісний стан вузла l ; $e_j(t)$ — енерговитрати в контурі j . Керуючі впливи формують вектор (18):

$$\mathbf{u}(t) = \{\Delta h_j(t), \Delta \tau_s(t), \Delta r_z(t), \Delta I_n(t)\}, \quad (18)$$

де $\Delta r_z(t)$ — керований перерозподіл потоку між альтернативними маршрутами, а $\Delta I_n(t)$ — зміна інформаційного сценарію для пасажирів (вивіски, додаток, гучномовні оголошення).

Цільова функція багатокритеріальної оптимізації має вигляд (19, 20):

$$J(t) = w_1 \widetilde{F}_{delay}(t) + w_2 \widetilde{F}_{crowd}(t) + w_3 \widetilde{F}_{energy}(t) + w_4 \widetilde{F}_{service}(t), \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^4 w_k = 1, \quad w_k \geq 0, \quad (20)$$

$$P_k(t) = \frac{q_k(t)}{c_k(t)}. \quad (24)$$

де тильдою позначено нормовані критерії. Нормування виконано за формулою (21):

$$\widetilde{F}_k(t) = F_k(t) - F_k^{min}/F_k^{max} - F_k^{min} + \delta, \quad (21)$$

де δ — малий стабілізуючий параметр.

Вибір лінійно-зваженої форми функціоналу обґрунтований практикою транспортних оцінок [4], [8], [11], [31]: вона інтерпретована для диспетчера, придатна для швидкої переоцінки ваг і забезпечує прозорість управлінської логіки. Більш складні нелінійні конструкції відхилено на цьому етапі, оскільки вони підвищують обчислювальні витрати і ускладнюють пояснюваність рішень.

Короткостроковий прогноз попиту формується адаптивним рівнянням (22):

$$\widehat{q}_i(t + \Delta T) = \alpha q_i(t) + (1 - \alpha)\widehat{q}_i(t) + \beta_1 \phi_i(t) + \beta_2 \psi_i(t), \quad (22)$$

де $\phi_i(t)$ — календарно-часові фактори, $\psi_i(t)$ — події фактори (збої, пересадочні хвили, нерівномірність прибуття). Параметри α, β_1, β_2 коригуються онлайн за критерієм мінімуму поточної похибки прогнозу (23):

$$\varepsilon_i(t) = \frac{|q_i(t) - \widehat{q}_i(t)|}{q_i(t) + \epsilon}. \quad (23)$$

Чому обрано саме адаптивну рекурентну модель? По-перше, вона стабільна на короткому горизонті та не потребує надвеликих навчальних вибірок, що відповідає умовам оперативної експлуатації [24], [29]. По-друге, параметри можна коригувати в реальному часі без повного перенавчання. По-третє, такий підхід добре узгоджується з факторною логікою робіт [25], [26].

Для інфраструктурного контролю застосовано коефіцієнт насичення (24):

Прийнято три зони керування: штатна ($\rho_k \leq 0.85$), попереджувальна ($0.85 < \rho_k \leq 1.0$), критична ($\rho_k > 1.0$). Така градація відповідає практиці оперативної диспетчеризації та дозволяє запускати превентивні сценарії ще до входу в критичне перевантаження.

У сервісному контурі використано узагальнений індекс (25):

$$S(t) = \gamma_1 \widetilde{T}_{wait}(t) + \gamma_2 \widetilde{T}_{transfer}(t) + \gamma_3 \widetilde{I}_{comfort}(t), \quad (25)$$

де T_{wait} — нормований час очікування; $T_{transfer}$ — нормований час пересадки; $I_{comfort}$ — інтегральний індикатор комфортності. Включення цього індексу обґрунтовано роботами [27], [30], [31], у яких доведено, що сервісні параметри безпосередньо впливають на перерозподіл пасажиропотоків.

Енергетичний ефект оцінюється питомим показником (26):

$$E_{sp}(t) = \frac{E_{tot}(t)}{Q_{tot}(t)}, \quad (26)$$

де E_{tot} — сумарні енерговитрати у вікні спостереження, Q_{tot} — кількість перевезених пасажирів. Включення E_{sp} до оптимізаційного критерію підтримано висновками [6],[7], [23].

Загальну логіку взаємодії модулів наведено на рис. 1.

Проведемо експеримент. Мета експерименту. Перевірити, чи забезпечує запропонована модель статистично помітне покращення порівняно з базовим режимом статичного керування графіком і пересадками.

Об'єкт експерименту. Типова міська залізнична підсистема з 12 станціями, 3 пересадковими вузлами, 2 піковими хвилями попиту протягом операційного вікна 120 хв. Стан системи оновлювався кожні 5 хв.



Рис. 1. Структурно-функціональна схема інтегрованої моделі

Сценарії.

Сценарій А (базовий): фіксовані інтервали, реакція лише після факту перевантаження;

Сценарій В (адаптивний): прогноз + багатокритеріальна оптимізація + сценарна перевірка рішень.

Метрика порівняння. Використано чотири ключові індикатори: середня затримка пасажирів T_{delay} , частка перевантажених вузлів P_{over} , питомі енерговитрати E_{sp} , індекс сервісної стабільності I_{serv} . Додатково розраховано інтегральний індекс керованості (27):

$$K_{adm} = 1 - \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \max(0, \rho_k - 1). \quad (27)$$

Параметри оптимізації. У базовому варіанті обрано ваги $w_1 = 0.35$, $w_2 = 0.30$, $w_3 = 0.20$, $w_4 = 0.15$. Таке співвідношення відображає пріоритет мінімізації затримок і перевантажень, але з обов'язковим урахуванням енерго- та сервісних компонентів. Процедура. Для кожного кроку часу виконувались:

- (1) оновлення даних;
- (2) прогноз на горизонт $\Delta T = 10$ хв;
- (3) формування набору керуючих альтернатив;
- (4) обчислення J для кожної альтернативи;
- (5) вибір найкращої дії;
- (6) симуляційна перевірка наслідків і, за потреби, корекція. Загальна кількість ітерацій у одному прогоні — 24.

Відносне покращення за ключовими метриками склало: за затримкою – близько 30%, за часткою перевантажених вузлів – понад 40%, за питомими енерговитратами – близько 9%, за сервісною стабільністю – близько 20%. Це підтверджує, що інтеграція прогнозного й оптимізаційного контурів дає не локальний, а системний ефект.

Динаміка коефіцієнта насичення для найбільш завантаженого вузла подана на рис. 2. Видно, що в адаптивному режимі пік навантаження нижчий, а період перебування в зоні $\rho > 1$ суттєво коротший.

Аналіз стійкості результату. Додатково проведено варіацію ваг w_k у межах ± 0.05 від базових значень. Отримано, що за всіх протестованих комбінацій сценарій В зберігає перевагу над сценарієм А за T_{delay} і P_{over} , а відхилення фінальних значень не перевищує 6–8%. Це дозволяє вважати результат робастним до помірних змін пріоритетів диспетчерського керування.

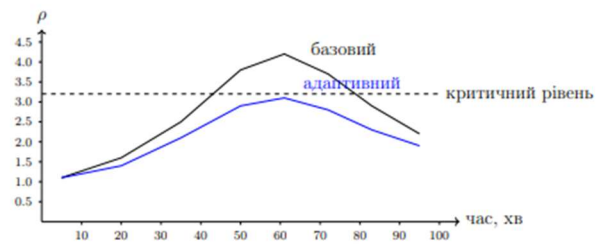


Рис. 2. Порівняння динаміки насичення вузла у двох сценаріях

Обмеження експерименту. По-перше, частина вхідних параметрів задана у вигляді агрегованих потоків, без індивідуальних траєкторій пасажирів. По-друге, у поточній версії не враховано повний набір довгострокових інфраструктурних обмежень (ремонтні «вікна», сезонні режими). По-третє, сервісний індекс розраховано у спрощеній нормованій формі. Проте ці обмеження не нівелюють головного висновку про ефективність інтегрованого підходу.

Отже, проведений експеримент підтвердив доцільність обраного комплексу методів та коректність їх інтеграції в єдину модель адаптивного управління. Поєднання мережевого аналізу, короткострокового прогнозу, багатокритеріальної оптимізації й симуляційної перевірки забезпечує відчутне покращення операційних, сервісних та ресурсних показників. Отримані результати формують практичну основу для подальшого масштабування моделі на рівень реальних міських залізничних систем із підключенням цифрових двійників і поточкових диспетчерських платформ.

Висновки. У роботі розв'язано науково-прикладну задачу побудови інтегрованої моделі адаптивного управління міськими пасажиропотоками на залізничному транспорті в режимі реального часу. На основі аналізу сучасних досліджень обґрунтовано доцільність поєднання мережевого представлення транспортної системи, короткострокового прогнозування попиту, багатокритеріальної оптимізації керуючих дій та симуляційної верифікації сценаріїв. Запропонована модель формалізована через вектор стану, вектор керувань і цільову функцію, що враховує затримки, перевантаження вузлів, енерговитрати та сервісні параметри.

Проведений експеримент засвідчив, що адаптивний контур керування забезпечує системне покращення ключових показників функціонування: зменшення середніх затримок

пасажирів, скорочення частки перевантажених вузлів, підвищення сервісної стабільності та зниження питомих енерговитрат порівняно з базовим статичним режимом. Отримані результати підтверджують практичну придатність обраного комплексу методів і доводять ефективність інтеграції прогнозного, оптимізаційного та контрольного модулів в єдиному циклі прийняття рішень.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному поєднанні методів, які в більшості наявних досліджень застосовуються ізольовано, та в реалізації єдиного механізму адаптації керувань до динаміки попиту в короткому часовому горизонті. Практичне значення результатів полягає у можливості впровадження моделі в диспетчерських центрах міських залізничних систем для підвищення стійкості перевізного процесу, покращення якості обслуговування пасажирів і підтримки ресурсно-ефективної експлуатації. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі на мультимодальні мережі, включенням довгострокових інфраструктурних обмежень та інтеграцією з цифровими двійниками транспортних вузлів.

Література

- Urban network spatial connection and structure in China based on railway passenger flow big data / M. Li et al. *Land*. 2022. Vol. 11, № 2. Art. 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020225>.
- Petrov A. I., Petrova D. A. Open business model of COVID-19 transformation of an urban public transport system: The experience of a large Russian city. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2021. Vol. 7, № 3. Art. 171. DOI: <https://doi.org/10.3390/joitmc7030171>.
- Nykyforak I., Duhanets N., Kobrusieva Y. Organization of responsibility accounting of city electric transport enterprises' activity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, № 3-92. P. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126178>.
- Makarova I., Shubenkova K., Pashkevich A. Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*. 2021. Vol. 36, № 2. P. 123–133. DOI: <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14996>.
- Increased efficiency and reliability of maintenance of mass passenger flow with the regular route network of city transport / V. Kurganov et al. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2020. Vol. 108. P. 107–119. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.108.10>.
- Diversity and changes in energy consumption by transport in EU countries / T. Rokicki et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 17. Art. 5414. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14175414>.
- Energy efficiency solutions for sustainable urban mobility: Case study of the Milan metropolitan area / C. N. Businge et al. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2019. Vol. 182. P. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.2495/UT180151>.
- Development of provisions for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport system / S. Mochalin et al. *Transport Problems*. 2019. Vol. 14, № 1. P. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.5>.
- Saxena P. A benchmarking strategy for Delhi Transport Corporation: An application of data envelopment analysis. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2019. Vol. 4, № 1. P. 232–244. DOI: <https://doi.org/10.33889/ijmms.2019.4.1-020>.
- Condition for application of logistic principles in practice of urban public passenger transport in the city of Omsk / S. Mochalin et al. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12, Special Edition. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.6>.
- Vdovychenko V., Nagornyy Y. Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, № 3-81. P. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71687>.
- Morchadze T., Rusadze N. Ways to address the challenges in passenger traffic within the urban transport systems. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13, № 3. P. 65–77. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.3>.
- Xi Y. et al. A comparative study on predict effects of railway passenger travel choice based on two soft computing methods. *LISS 2012 Proceedings*. Springer, 2013. P. 543–552. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-32054-5_77.
- Li D., Yang X., Xu X. A framework of smart railway passenger station based on digital twin. *CICTP 2020 Proceedings*. ASCE, 2020. P. 2623–2634. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482933.22>.
- Peng C. A hybrid method based on chaotic phase space restructuring and comparability principle for railway passenger demand forecasting. *ICTE 2007 Proceedings*. ASCE, 2007. P. 3536–3541. DOI: [https://doi.org/10.1061/40932\(246\)580](https://doi.org/10.1061/40932(246)580).
- He B. et al. A microscopic agent-based simulation for real-time dispatching problem of a busy railway passenger station. *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294651>.
- Liu W., Li J. A simulation model and algorithm for turning-back capacity of intercity dedicated passenger railway station. *ICTE 2011 Proceedings*.

- ASCE, 2011. P. 948–953. DOI: [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)157](https://doi.org/10.1061/41184(419)157).
18. Activity recognition of railway passengers by fusion of low-power sensors in mobile phones / M. Elhamshary et al. *Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1145/2820783.2820847>.
 19. Chen D., Li Y., Zhang Y. Adjustment of intercity passenger dedicated line operation. *ICTE 2011 Proceedings*. ASCE, 2011. P. 1168–1173. DOI: [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)193](https://doi.org/10.1061/41184(419)193).
 20. Xie X., Feng X., Ren Q. Adjustment plan of passenger traffic special line optimization study. *Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*. ASCE, 2008. P. 3791–3796. DOI: [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)556](https://doi.org/10.1061/40996(330)556).
 21. Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China / T. Li et al. *Science of the Total Environment*. 2006. Vol. 367, № 1. P. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.007>.
 22. Haramina H., Ljubaj I., Toš I. An analysis of passenger train driver's cognitive workload in relation to Croatian national train control system. *Sigurnost*. 2017. Vol. 59, № 2. P. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.31306/s.59.2.1>.
 23. An energy efficiency assessment of a railroad passenger-car power-supply system using wind generators and photovoltaic panels / A. N. Balalaev et al. *Russian Electrical Engineering*. 2020. Vol. 91, № 3. P. 195–198. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371220030062>.
 24. Bao Y., Liu J., Ma M. Analysis and simulation of passengers' ticket booking request arrival process in a ticket booking period. *Journal of Beijing Jiaotong University*. 2012. Vol. 36, № 6. P. 27–32.
 25. Gu S., Lu X. Analysis of China railway passenger volume's influence factors based on principal component regression. *LISS 2015*. IEEE, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369737>.
 26. Xi Y., Jing L. Analysis on predict model of railway passenger travel factors judgment with soft-computing methods. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2014. Vol. 7, № 1. P. 100–114. DOI: <https://doi.org/10.3926/jiem.940>.
 27. Deng P., Chuansheng Z. Analytic hierarchy process and fuzzy evaluation of passengers' satisfactory degree for QoS of railway passenger transportation. *WCICA Proceedings*. IEEE, 2010. P. 5215–5220. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2010.5554881>.
 28. Zhong M., Yue Y., Li D. Analyzing and evaluating infrastructure capacity of railway passenger station by mesoscopic simulation method. *ICIRT 2018*. IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018>.
 29. Application of data mining in the forecasting of railway passenger flow / D. Zheng et al. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 834-836. P. 958–962. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.834-836.958>.
 30. Application of NFC technology in railway passenger transport by introducing new products / E. Brumercikova et al. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. 2017. Vol. 19, № 2. P. 32–35.
 31. Zhang C., Xu L. Application of TOPSIS in evaluating transfer efficiency at urban railway passenger station. *ICTE 2009 Proceedings*. ASCE, 2009. P. 1866–1871. DOI: [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)309](https://doi.org/10.1061/41039(345)309).
 32. Application research of vibration and noise test and analysis system in high speed railway passenger car / Y. Liu et al. *ICMTMA 2011 Proceedings*. IEEE, 2011. Vol. 1. P. 573–576. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.146>

References

1. Li, M., Guo, W., Guo, R., He, B., Li, Z., Li, X., & Zhang, Y. (2022). Urban network spatial connection and structure in China based on railway passenger flow big data. *Land*, 11(2), Article 225. <https://doi.org/10.3390/land11020225>
2. Petrov, A. I., & Petrova, D. A. (2021). Open business model of COVID-19 transformation of an urban public transport system: The experience of a large Russian city. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(3), Article 171. <https://doi.org/10.3390/joitmc7030171>
3. Nykyforak, I., Duhanets, N., & Kobrusieva, Y. (2018). Organization of responsibility accounting of city electric transport enterprises' activity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3-92), 31–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126178>
4. Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A. (2021). Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*, 36(2), 123–133. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14996>
5. Kurganov, V., Gryaznov, M., Davydov, K., & Polyakova, L. (2020). Increased efficiency and reliability of maintenance of mass passenger flow with the regular route network of city transport. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 108, 107–119. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2020.108.10>
6. Rokicki, T., Koszela, G., Ochnio, L., Wojtczuk, K., Ratajczak, M., Szczepaniuk, H., ... & Bereźnicka, J. (2021). Diversity and changes in energy consumption by transport in EU countries. *Energies*, 14(17), Article 5414. <https://doi.org/10.3390/en14175414>
7. Businge, C. N., Viani, S., Pepe, N., Borgarello, M., Caruso, C., Tripodi, G., & Soresinetti, S. (2019).

- Energy efficiency solutions for sustainable urban mobility: Case study of the Milan metropolitan area. *WIT Transactions on the Built Environment*, 182, 151–163. <https://doi.org/10.2495/UT180151>
8. Mochalin, S., Kasper, M., Nikiforov, O., Levkin, G., & Kurshakova, N. (2019). Development of provisions for evaluating the effectiveness of urban public passenger transport system. *Transport Problems*, 14(1), 45–58. <https://doi.org/10.21307/tp.2019.14.1.5>
 9. Saxena, P. (2019). A benchmarking strategy for Delhi Transport Corporation: An application of data envelopment analysis. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 4(1), 232–244. <https://doi.org/10.33889/ijmems.2019.4.1-020>
 10. Mochalin, S., Kasper, M., Nikiforov, O., & Levkin, G. (2017). Condition for application of logistic principles in practice of urban public passenger transport in the city of Omsk. *Transport Problems*, 12(Special Edition), 71–86. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.se.6>
 11. Vdovychenko, V., & Nagorny, Y. (2016). Formation of methodological levels of assessing city public passenger transport efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3-81), 44–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71687>
 12. Morchadze, T., & Rusadze, N. (2018). Ways to address the challenges in passenger traffic within the urban transport systems. *Transport Problems*, 13(3), 65–77. <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.3>
 13. Xi, Y., Li, Z., Long, C., Shu, K., Yue, G., & Jing, L. (2013). A comparative study on predict effects of railway passenger travel choice based on two soft computing methods. In *LISS 2012 Proceedings* (pp. 543–552). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32054-5_77
 14. Li, D., Yang, X., & Xu, X. (2020). A framework of smart railway passenger station based on digital twin. In *CICTP 2020 Proceedings* (pp. 2623–2634). ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784482933.22>
 15. Peng, C. (2007). A hybrid method based on chaotic phase space restructuring and comparability principle for railway passenger demand forecasting. In *ICTE 2007 Proceedings* (pp. 3536–3541). ASCE. [https://doi.org/10.1061/40932\(246\)580](https://doi.org/10.1061/40932(246)580)
 16. He, B., Chen, P., D'Ariano, A., Chen, L., Zhang, H., & Lu, G. (2020). A microscopic agent-based simulation for real-time dispatching problem of a busy railway passenger station. In *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294651>
 17. Liu, W., & Li, J. (2011). A simulation model and algorithm for turning-back capacity of intercity dedicated passenger railway station. In *ICTE 2011 Proceedings* (pp. 948–953). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)157](https://doi.org/10.1061/41184(419)157)
 18. Elhamshary, M., Youssef, M., Uchiyama, A., Yamaguchi, H., & Higashino, T. (2015). Activity recognition of railway passengers by fusion of low-power sensors in mobile phones. In *Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. ACM. <https://doi.org/10.1145/2820783.2820847>
 19. Chen, D., Li, Y., & Zhang, Y. (2011). Adjustment of intercity passenger dedicated line operation. In *ICTE 2011 Proceedings* (pp. 1168–1173). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41184\(419\)193](https://doi.org/10.1061/41184(419)193)
 20. Xie, X., Feng, X., & Ren, Q. (2008). Adjustment plan of passenger traffic special line optimization study. In *Proceedings of the 8th International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals* (pp. 3791–3796). ASCE. [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)556](https://doi.org/10.1061/40996(330)556)
 21. Li, T., Bai, Y., Liu, Z., Liu, J., Zhang, G., & Li, J. (2006). Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 367(1), 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.007>
 22. Haramina, H., Ljubaj, I., & Toš, I. (2017). An analysis of passenger train driver's cognitive workload in relation to Croatian national train control system. *Sigurnost*, 59(2), 99–108. <https://doi.org/10.31306/s.59.2.1>
 23. Balalae, A. N., Korkina, S. V., Plokhov, E. M., & Polovinkina, A. Y. (2020). An energy efficiency assessment of a railroad passenger-car power-supply system using wind generators and photovoltaic panels. *Russian Electrical Engineering*, 91(3), 195–198. <https://doi.org/10.3103/S1068371220030062>
 24. Bao, Y., Liu, J., & Ma, M. (2012). Analysis and simulation of passengers' ticket booking request arrival process in a ticket booking period. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 36(6), 27–32.
 25. Gu, S., & Lu, X. (2015). Analysis of China railway passenger volume's influence factors based on principal component regression. In *LISS 2015*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369737>
 26. Xi, Y., & Jing, L. (2014). Analysis on predict model of railway passenger travel factors judgment with soft-computing methods. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 7(1), 100–114. <https://doi.org/10.3926/ijem.940>
 27. Deng, P., & Chuansheng, Z. (2010). Analytic hierarchy process and fuzzy evaluation of passengers' satisfactory degree for QoS of railway passenger transportation. In *WCICA Proceedings* (pp. 5215–5220). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2010.5554881>
 28. Zhong, M., Yue, Y., & Li, D. (2018). Analyzing and evaluating infrastructure capacity of railway passenger station by mesoscopic simulation method. In *ICIRT 2018*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018>
 29. Zheng, D., Wang, Y., Tang, P. Z., & Wu, Y. P. (2014). Application of data mining in the

- forecasting of railway passenger flow. *Advanced Materials Research*, 834-836, 958–962. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.834-836.958>
30. Brumerickova, E., Bukova, B., Kondek, P., & Drozdziel, P. (2017). Application of NFC technology in railway passenger transport by introducing new products. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 19(2), 32–35.
 31. Zhang, C., & Xu, L. (2009). Application of TOPSIS in evaluating transfer efficiency at urban railway passenger station. In *ICTE 2009 Proceedings* (pp. 1866–1871). ASCE. [https://doi.org/10.1061/41039\(345\)309](https://doi.org/10.1061/41039(345)309)
 32. Liu, Y., Yang, B., Zhang, X. P., & Xing, S. M. (2011). Application research of vibration and noise test and analysis system in high speed railway passenger car. In *ICMTMA 2011 Proceedings* (Vol. 1, pp. 573–576). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.146>

Dolia K.V. Development of an integrated model for adaptive management of urban passenger flows on rail transport in real time

The article proposes an integrated model of adaptive management of urban passenger flows in railway transport in real time, focused on reducing delays, reducing congestion at nodes and improving the quality of service. The methodology combines spatial-network analysis, short-term demand forecasting, multi-criteria optimization, simulation testing of control scenarios and a self-adaptation circuit based on the results of actual decision implementation. The transport system is formalized as a directed graph with time-varying parameters of throughput and saturation, and the selection of control actions is carried out according to an integral criterion that takes into account operational, service and energy indicators. To take into account uncertainty, scenario testing of alternatives was used before implementation in dispatching practice. Unlike local approaches, the proposed architecture ensures coordination of the forecast, optimization and execution levels in a single decision-making cycle. The results of the model experiment showed a steady

improvement of key indicators compared to the baseline: reduction of average delays, reduction of the share of overloaded nodes, improvement of service stability and reduction of specific energy consumption. The sensitivity analysis to changes in the weights of the criteria confirmed the robustness of the conclusions obtained within practically relevant parametric variations. It is substantiated that the greatest effect is achieved under conditions of proactive response to increasing saturation and synchronization of information impacts on passengers with operational adjustment of traffic regimes. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the model in dispatch centers of urban railway systems as a tool for increasing the reliability of the transportation process, service quality and resource efficiency. The proposed approach can be used as the basis for a digital twin of a transport node integrated with streaming sensor data, passenger information systems and platforms supporting dispatching decisions. The perspective of further research is to scale the model to multimodal networks and take into account long-term infrastructure constraints. Separately, it is advisable to further investigate the impact of extreme events on the stability of the operational control loop.

Keywords: adaptive control; passenger flows; urban rail transport; real time; short-term forecasting; multi-criteria optimization; simulation modeling; dispatching.

Доля Костянтин Вікторович – д.т.н., проф., кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна.
ORCID 0000-0002-4693-9158
k.v.dolia@gmail.com

Дата першого надходження статті 17.01.2026.
Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.
Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
Creative Commons (CC BY 4.0)