
Розрахунок та оптимізація роботи транспортного вузла

Наталія Кобріна

Кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна

ORCID: 0000-0001-9499-2079

Костянтин Доля

Кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

ORCID: 0000-0002-4693-9158

Анотація: Робота присвячена розрахунку та оптимізації роботи транспортного вузла як критичного елемента міської/регіональної мережі, у межах якого відбуваються пересадки пасажирів між маршрутами та видами транспорту, формуються локальні черги та затримки, що впливають на надійність перевезень у цілому. Метою є отримання кількісної оцінки параметрів функціонування вузла (інтенсивності потоків, завантаження елементів, часи переміщення та очікування) і обґрунтування заходів оптимізації, спрямованих на скорочення часу пересадки, підвищення пропускної здатності та стабільності обслуговування. Актуальність теми визначається зростанням пасажиропотоків, інтеграцією сервісів «першої/останньої милі», а також потребою підвищувати ефективність без значних капітальних вкладень. У роботі узагальнено сучасні підходи до аналізу вузлів: теорію масового обслуговування для оцінки черг, дискретно-подійну та агент-орієнтовану мікросимуляцію для відтворення просторово-часової динаміки потоків, математичне програмування для синхронізації розкладів і задач призначення платформ/посадкових місць, а також дано-орієнтовані методи прогнозування попиту. Обрано комбіновану методику, що поєднує розрахункову оцінку «вузьких місць» із сценарною оптимізацією на основі імітаційної моделі. Проведено експеримент з порівнянням базового режиму роботи та альтернативних організаційних рішень (синхронізація прибуттів, перерозподіл платформ/посадкових місць, керування вхідними потоками) і виконано оцінку ефективності за показниками середнього/квантильного часу пересадки та завантаження критичних елементів.

Наукова новизна полягає в запропонованій структурі інтегрованого розрахунку, що дозволяє узгоджувати рішення «розклад–пересадка–пропускна здатність» та формувати практичні рекомендації для підвищення якості обслуговування пасажирів. Отримані результати можуть бути використані при модернізації існуючих вузлів і в подальших дослідженнях, пов’язаних із адаптивним управлінням на основі даних.

Ключові слова: транспортний вузол; пересадка; час пересадки; теорія масового обслуговування; черги; дискретно-подійне моделювання; мікросимуляція; синхронізація розкладів; оптимізація.

1. Вступ

Транспортний вузол (пересадочний /інтермодальний хаб) є ключовим елементом транспортної системи міста та регіону, оскільки саме в ньому концентруються потоки пасажирів і транспортних засобів, відбуваються пересадки між видами транспорту та формуються затримки, що «розповсюджуються» на суміжні лінії й маршрути. За умов зростання попиту на мобільність, ускладнення структури поїздок і появи нових сервісів (DRT,

мікромобільність, каршеринг) роль вузлів як точок інтеграції підсилюється, а вимоги до їх пропускної здатності, безпеки та зручності пересадки стають визначальними для якості транспортного обслуговування [1, 2, 3].

Актуальність теми «розрахунок та оптимізація роботи транспортного вузла» зумовлена тим, що навіть за достатньої провізної спроможності лінійних ділянок мережі саме вузли часто виступають «вузькими місцями»: обмежена кількість платформ/перонів, конфліктні траєкторії руху, черги на касах/турнікетах/ескалаторах, нерівномірність прибуття пасажирів та дисбаланс між графіками суміжних маршрутів. У пікові періоди це призводить до зростання часу пересадки та накопичення натовпів, що погіршує безпеку та підвищує ризики інцидентів. Крім того, сучасне управління вузлом дедалі частіше розглядається як задача спільної оптимізації: інфраструктурні рішення (планувальна схема, розміщення сервісів), експлуатаційні рішення (розклади, платформація / призначення колій, диспетчеризація) та інформаційні рішення (керування потоками, навігація) мають узгоджуватися між собою [4, 5, 6].

З науково-практичної точки зору задача оптимізації роботи транспортного вузла охоплює: розрахунок параметрів попиту та інтенсивностей потоків; оцінку пропускної здатності елементів вузла (платформи, переходи, зали, турнікети, зупинкові пункти); моделювання «взаємодії» пасажирів і інфраструктури (черги, затори на вузьких місцях, обмеження швидкості руху); оптимізацію режимів роботи (розклад, розподіл платформ або посадкових місць, керування вхідними потоками), з урахуванням критеріїв часу, надійності, комфорту та витрат [7, 8].

У сучасних умовах додаткової актуальності набувають підходи, що спираються на дані (AFC/AVL/GPS, відео аналітика, сенсори) та інструменти прогнозування короткострокового попиту, оскільки вони дають змогу переходити від «середніх» розрахунків до адаптивного управління в реальному часі [9, 10]. Паралельно розвиваються методи оптимізації, які інтегрують поведінкові моделі вибору маршруту/пересадки з інженерними обмеженнями вузла, що є важливим для обґрунтування проєктних і управлінських рішень [2,6].

Отже, дослідження, спрямоване на розрахунок показників роботи транспортного вузла та обґрунтування заходів з оптимізації, є актуальним як для підвищення якості обслуговування пасажирів, так і для підвищення ефективності використання існуючої інфраструктури без надмірних капітальних витрат.

2. Аналіз джерел

У сучасній науковій літературі оптимізація транспортних вузлів розглядається на кількох взаємопов'язаних рівнях: стратегічному (вибір місць розташування та функцій вузлів у мережі), тактичному (планувальні рішення та організація пересадки), а також операційному (розклади, диспетчеризація, керування потоками та інцидентами).

2.1. Розташування та роль вузлів у мультимодальній мережі

Значний клас робіт присвячено задачам розміщення транспортних/мобільнісних хабів як елементів мультимодальної мережі з урахуванням витрат на пересадку та обмежень бюджету/місткості. У роботі [11] запропоновано кластерно-орієнтований підхід до задачі розміщення хабів у мультимодальній мережі з явним урахуванням витрат пересадки через «віртуальні» вузли та дуги. Подібні постановки, що інтегрують вибір хабів та конфігурацію зв'язків мережі, демонструють важливість врахування географічних і адміністративних особливостей при формуванні системи вузлів [12]. Для міських «mobility hubs» актуальними є підходи, що поєднують багатокритеріальне оцінювання та обмеження нових сервісів (наприклад, інтеграція з новими видами мобільності) [13], а також дво-рівневі моделі, де на верхньому рівні мінімізуються зовнішні витрати, а на нижньому моделюється вибір користувача [2].

Окремий напрям формується навколо оцінювання ефектів впровадження хабів (потенційний попит, зміни модального розподілу, ефект на VMT тощо) із використанням підходів «data fusion» та поведінкового моделювання [14]. Важливим висновком цих робіт є те, що оптимальне розташування хабів не гарантує ефективної роботи без узгодження операційних параметрів (розкладів, пропускну здатності елементів вузла) та управління пересадками.

2.2. Синхронізація розкладів і мінімізація часу пересадки

Пересадочні затримки є одним із головних джерел втрат часу у вузлах, тому значна увага приділяється синхронізації розкладів між лініями та видами транспорту. У [15] розглянуто задачу оптимізації синхронізації у мережі «метро–автобус» з двоетапною структурою (призначення пасажирів і складання розкладу), де метою є зменшення очікувань та підвищення рівня сервісу на ділянках. Ранні підходи до мінімізації часу очікування при пересадках у рейковому транспорті на основі MILP-моделей також показують, що коректне врахування принципу «наступного доступного поїзда» суттєво впливає на результат [16]. Для транспортних вузлів, де важливі не лише середні, а й надійні (robust) показники пересадки, перспективними є моделі, які явно враховують варіативність швидкостей/часів руху та прагнуть забезпечити пунктуальність підключених сервісів, зокрема DRT для «першої/останньої милі» [3].

Практичний висновок з наведених робіт полягає в тому, що оптимізація розкладів має бути інтегрована з пропускну здатністю інфраструктури вузла: зближення прибуттів може зменшити очікування, але водночас різко збільшити пікове навантаження на переходи та сервісні елементи.

2.3. Моделювання пасажиропотоків у вузлах, черги та «вузькі місця»

Для розрахунку та оптимізації роботи вузла критичною є адекватна модель просторово-часового розподілу пасажирів і процесів накопичення/розсіювання натовпу. У [4] запропоновано модель просторово-часового розподілу пасажиропотоку в межах хаба з урахуванням чергування у вузлах мережі переходів та сервісних точок; наголошено на необхідності динамічного оновлення розподілу пасажирів. На рівні системи рейкового транспорту істотне значення має правильна оцінка/прогнозування потоків по станціях, що використовується для планування режимів та обмежувальних заходів [9, 10, 17].

Паралельно розвиваються методи керування потоками в умовах обмеженої пропускну здатності, зокрема координація регулюючих дій на кількох станціях і з урахуванням пересадочних (transfer inbound) потоків [18]. У практиці великих вузлів також важливими є рішення щодо призначення платформ/колій: у [5] показано, що рішення про «платформацію» доцільно приймати із врахуванням пасажиропотоків, оскільки воно впливає на траєкторії руху груп пасажирів і локальні перевантаження.

2.4. Оптимізація експлуатації наземних елементів вузла (термінали, посадкові місця, диспетчеризація)

Для автобусних терміналіві BRT-станцій суттєвий вплив на ефективність має призначення посадкових місць/«docking bays» та організація обслуговування маршрутів. У [19] на основі мікросимуляції показано, що схема призначення «bays» визначає критичні частоти, за яких формуються черги автобусів, і впливає на оптимальні частоти руху. Перспективним напрямом є також «динамічне інтерлайнування» на спільному хабі (спільний парк для групи маршрутів), що може підвищувати надійність і зменшувати варіативність інтервалів відправлення [20]. Для систем, де потрібна адаптація випуску під прогноз попиту, застосовуються евристичні та MILP-орієнтовані підходи до диспетчеризації [21].

Окремо варто відзначити задачі управління вузлом у нестандартних режимах (збої, обмеження інфраструктури): інтегровані моделі «bus bridging» для заміщення ділянок

рейкового транспорту оптимізують маршрут(и) підвозу, частоти та призначення пасажирів одночасно [22], що є релевантним для вузлів як точок перерозподілу потоків у кризових ситуаціях.

2.5. Планувальні стратегії та функціональна класифікація хабів

Сучасні роботи також аналізують планувальні стратегії вузлів у полицентричних міських регіонах, де роль хабів відрізняється (міжміські/внутрішньо міські, різні функції пересадки), і пропонують підходи до їх функціональної класифікації [23]. Додатково, у дослідженнях, пов'язаних із TOD та впливом забудови/оточення, показано значущість факторів «built environment» і характеристик станції/вузла для формування попиту та патернів пасажиропотоків [24, 25].

2.6. Узагальнення та недостатньо розкриті аспекти

Аналіз публікацій дозволяє зробити такі висновки щодо стану досліджень:

- Добре розкриті аспекти: моделі розміщення хабів у мультимодальних мережах та оцінювання ефектів [11, 2, 14]; задачі синхронізації розкладів для зменшення часу очікування на пересадці [15, 16]; (с) прогнозування/оцінювання пасажиропотоків на станціях з використанням багатоджерельних даних і ML/DL [9, 10, 17].

- Не достатньо розкриті аспекти: інтеграція моделей синхронізації розкладів і з внутрішньою пропускнуою здатністю вузла (черги на переходах, турнікетах, платформах) в єдиній оптимізаційній постановці; систематичне врахування поведінкових реакцій пасажирів (зміна маршруту/місця пересадки) у відповідь на локальні обмеження вузла; переносимість моделей на різні типи вузлів (рейковий, автобусний, інтермодальний) за єдиною структурою показників.

- Актуальні напрями подальших досліджень: розроблення комбінованих моделей «прогноз попиту + розрахунок черг + оптимізація режимів» для підтримки адаптивного управління вузлом; оцінювання стійкості (robustness) рішень до коливань попиту та збоїв, включно з організацією заміщення/підвозу [22]; дано-орієнтована калібровка параметрів вузла (швидкості, пропускні здатності елементів) на основі AFC/AVL та спостережень.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження — виконати розрахунок показників роботи транспортного вузла та обґрунтувати комплекс заходів з оптимізації (інфраструктурних і/або організаційних), спрямованих на зменшення часу пересадки, підвищення пропускнуої здатності та надійності обслуговування пасажирів.

Об'єкт дослідження—процеси функціонування транспортного вузла як системи взаємодії пасажиропотоків, транспортних засобів та інфраструктурних елементів (платформи/зупинки, переходи, зали, сервісні точки).

Предмет дослідження — методи та моделі розрахунку пропускнуої здатності й параметрів пасажиропотоків у вузлі, а також методи оптимізації організації роботи вузла (синхронізація розкладів, розподіл платформ/посадкових місць, керування потоками) з урахуванням обмежень інфраструктури.

Задачі дослідження:

Описати транспортний вузол та його функціональну структуру: склад елементів, види пересадок, технологію обслуговування.

Зібрати та підготувати вихідні дані: інтенсивності прибуття пасажирів, параметри руху маршрутів/ліній, геометричні характеристики елементів вузла, нормативні/фактичні показники пропускнуої здатності.

Виконати розрахунок основних показників роботи вузла: пасажиропотоки по елементах, часи переміщення та пересадки, показники завантаження, наявність і параметри черг.

Визначити «вузькі місця» та причини перевантаження (конфліктні потоки, недостатня ширина проходів, несинхронізовані прибуття тощо).

Сформулювати та перевірити сценарії оптимізації (наприклад: зміна/синхронізація розкладів, перерозподіл платформ / посадкових місць, регулювання вхідних потоків, зміни навігації, локальні планувальні заходи).

Оцінити ефективність запропонованих заходів за критеріями: середній/квантильний час пересадки, рівень сервісу та завантаження елементів, надійність роботи, витрати впровадження.

5. Методи досліджень

Поставлені задачі (розрахунок потоків, виявлення «вузьких місць», оптимізація режимів роботи вузла) можуть розв'язуватися різними методами. Нижче узагальнено найбільш уживані підходи та їх придатність для задач транспортного вузла [4, 5, 15, 18, 19, 20].

5.1. Теорія масового обслуговування (черги) для елементів вузла

Для елементів, де відбувається обслуговування або пропуск через «канали» (турнікети, каси, вузькі проходи, ескалатори), широко застосовуються моделі СМО. Для прикладу, у моделі $M/M/s$ інтенсивність надходження λ , інтенсивність обслуговування одним каналом μ , кількість каналів s ; коефіцієнт завантаження визначається за формулою (1):

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} \quad 0 < \rho < 1, \quad (1)$$

де ρ — коефіцієнт завантаження системи; λ — інтенсивність надходження пасажирів (пас./хв); μ — інтенсивність обслуговування одним каналом (пас./хв); s — кількість паралельних каналів обслуговування.

Середній час очікування в черзі W_q і середня довжина черги L_q пов'язані співвідношенням Літгла (2):

$$L_q = \lambda W_q, \quad (2)$$

де L_q — середня довжина черги (пас.); W_q — середній час очікування в черзі (хв); λ — інтенсивність надходження (пас./хв).

Метод має такі сильні сторони: швидкі розрахунки, мінімальні вимоги до даних, зручні для скринінгу «вузьких місць». Слабкі сторони: слабо враховують просторову структуру, групові прибуття (пакети з поїздів/автобусів) і взаємодію потоків; точність падає для складних пересадок.

Не лінійний характер зростання черги при наближенні $\rho \rightarrow 1$ ілюструє рис. 1.

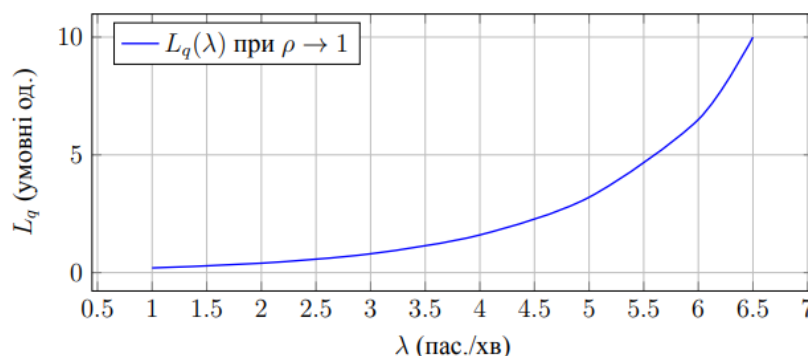


Рис. 1. Ілюстрація нелінійного зростання черги при збільшенні інтенсивності надходження.

4.2. Дискретно-подійна імітація (DES) процесів обслуговування

Дискретно-подійні моделі описують систему як послідовність подій (прибуття, початок/кінець обслуговування, зміна стану ресурсу). Узагальнено, стан системи $X(t)$ оновлюється в моменти подій t_k за співвідношенням (3):

$$X(t_k^+) = f(X(t_k^-), e_k, \theta), \quad (3)$$

де $X(t)$ — вектор стану системи в момент часу t ; t_k — момент k -ї події; t_k^- / t_k^+ — стан безпосередньо до/після події; e_k — тип події; θ — параметри моделі (місткість, швидкості, дисципліна черги).

Сильні сторони методу, це: добре відтворює черги та конфлікти ресурсів, дозволяє проводити сценарні експерименти. Слабкі сторони: потребує калібрування, результати чутливі до припущень; просторовий рух пасажирів часто задається спрощено.

4.3. Агент-орієнтована / пішохідна мікросимуляція (просторова динаміка натовпу)

Для вузлів із великими пересадочними потоками важливе моделювання руху у просторі. Швидкість пішоходів зазвичай є функцією щільності k (фундаментальна діаграма) і визначається формулою (4):

$$v(k) = v_0 \left(1 - \frac{k}{k_{\max}}\right), \quad 0 \leq k \leq k_{\max}, \quad (4)$$

де $v(k)$ — середня швидкість руху пішоходів за щільності k ; v_0 — швидкість у вільному потоці; k — щільність (осіб/м²); k_{\max} — гранична щільність, за якої рух практично зупиняється, а потік q дорівнює $q(k) = k v(k)$, що графічно узгоджується з поведінкою $v(k)$ на рис. 2. Сильні сторони: дозволяє аналізувати «вузькі місця» переходів і платформ, оцінювати безпеку та комфорт. Слабкі сторони: значні вимоги до геометрії та даних для калібрування, висока обчислювальна складність.

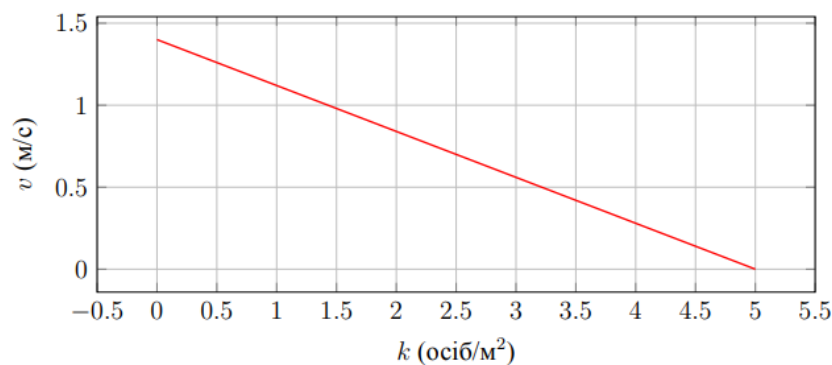


Рис. 2. Приклад фундаментальної залежності «швидкість–щільність» для пішохідного руху.

4.4. Оптимізація розкладів і пересадок (MILP/ILP).

Синхронізація розкладів у вузлі формулюється як задача оптимізації, де з мінними виступають моменти прибуття/відправлення та рішення щодо збереження/порушення пересадок. У спрощеній постановці мінімізується сумарне очікування (5):

$$\min \sum_{p \in P} w_p \left(t_{\pi(p)}^{\text{dep}} - t_p^{\text{arr}} \right), \quad (5)$$

де P — множина пасажирських груп/потоків, що виконують пересадку; w_p — ваговий коефіцієнт (кількість пасажирів або пріоритет потоку); t_p^{arr} — час прибуття потоку p у вузол; $t_{\pi(p)}^{\text{dep}}$ — час відправлення маршруту/лінії $\pi(p)$, на яку виконується пересадка.

Обмеження допустимих зсувів та мінімальних інтервалів задаються системою (6):

$$\left| t_l^{\text{dep}} - \overline{t_l^{\text{dep}}} \right| \leq \Delta_l, \quad t_{l+1}^{\text{dep}} - t_l^{\text{dep}} \geq h_{\min}. \quad (6)$$

де t_l^{dep} — оптимізований час відправлення l -го рейсу; $\overline{t_l^{\text{dep}}}$ — базовий (плановий) час; Δ_l — допустиме відхилення від базового розкладу; h_{\min} — мінімальний інтервал (headway) між відправленнями.

Сильні сторони: дає оптимальні/квазі оптимальні рішення за чітко заданих обмежень; зручно для обґрунтування синхронізації [15, 16]. Слабкі сторони: важко врахувати внутрішні черги та просторову динаміку без суттєвого ускладнення моделі.

4.5 Метод 5 - призначення платформ/посадкових місць (задачі призначення).

Організація обслуговування маршрутів у вузлі (платформи, bays) часто описується задачею призначення:

$$\min \sum \sum c_{ij} x_{ij}, \quad \sum x_{ij} = 1, \quad \sum x_{ij} \leq 1, \quad i \in I, j \in J, j \in J, i \in I \quad (7)$$

де I — множина маршрутів/ліній; J — множина платформ/посадкових місць; $x_{ij} \in \{0, 1\}$ — змінна призначення (1, якщо маршрут i закріплено за місцем j); c_{ij} — «вартість» призначення (наприклад, середня дистанція пересадки або штраф за конфліктність потоків).

Підхід ефективний для зменшення конфліктів пасажирських потоків і скорочення часу пересадки [5, 19].

Сильні сторони: прості постановки, чітка інтерпретація, зручність інтеграції з експлуатаційними обмеженнями. Слабкі сторони: статичність: без додаткових змінних слабо відображає часові піки та накопичення натовпу.

4.6. Багатокритеріальна оптимізація та еволюційні алгоритми

Оскільки вузол оптимізується одночасно за кількома цілями (час, надійність, комфорт, витрати), поширені багатокритеріальні постановки:

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{y}) = (F_1(\mathbf{y}), F_2(\mathbf{y}), \dots), \quad (8)$$

де \mathbf{y} — вектор керованих рішень (розклади, призначення ресурсів, правила управління потоками); F_1, F_2, \dots — часткові критерії (наприклад, середній час пересадки, 95%-квантиль часу, максимальна щільність, витрати впровадження).

Еволюційні алгоритми (GA/NSGA-II) добре працюють зі складними, не гладкими критеріями, що визначаються симуляцією. **Сильні сторони:** гнучкість і придатність для «симуляція + оптимізація». **Слабкі сторони:** немає гарантій глобального оптимуму; потрібні налаштування та значний час обчислень.

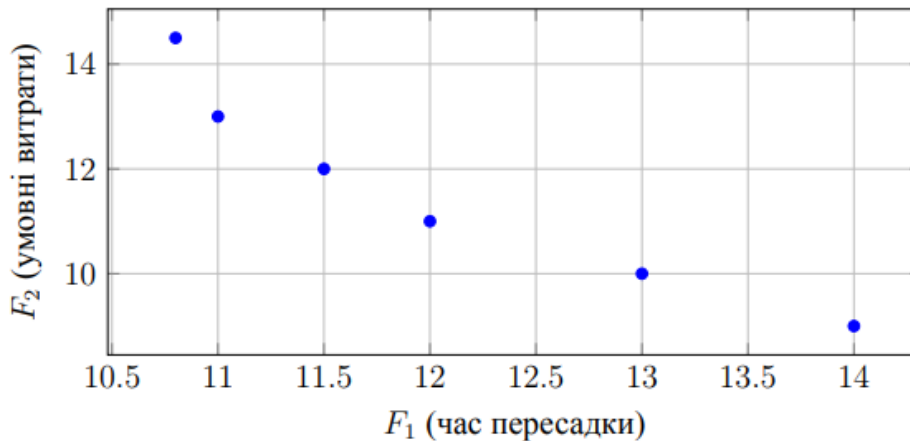


Рис. 3. Ілюстрація Парето-фронту в задачі багатокритеріальної оптимізації.

4.7 Вибір методик для даного дослідження

З огляду на поставлені задачі (одночасно *черги* в сервісних елементах, *просторова* динаміка пересадки та *організаційні* рішення щодо розкладів/платформ), найбільш обґрунтованим є комбінований підхід: (1) розрахункова оцінка завантаження критичних елементів.

(СМО) для швидкого виявлення «вузьких місць» (див. (1),(2)); (2) дискретно-подій на імітація вузла як основний інструмент експерименту (див. (3)); (3) оптимізація організаційних параметрів за сценаріями (синхронізація прибуттів, перерозподіл платформ/посадкових місць), що формально опирається на постановки MILP/задачі призначення (див. (5), (6), (7)) [4, 5, 15, 19]. Компроміси між критеріями можуть інтерпретуватися за допомогою Парето-фронту (див. рис. 3). Такий вибір зменшує ризик «перемодельовання» (надмірно складної математичної моделі) і водночас дозволяє кількісно оцінити ефект організаційних заходів у реалістичній динаміці.

5. Планування й проведення експерименту

5.1. План експерименту.

Експеримент виконано у вигляді імітаційного моделювання роботи транспортного вузла протягом пікової години. Досліджуються три сценарії:

S0(базовий)—поточні інтервали прибуття/відправлення та поточне призначення платформ/посадкових місць.

S1(синхронізація)—зменшення розриву між прибуттям підвізного маршруту та відправленням магістрального в межах допустимого зсуву Δ [15].

S2 (перерозподіл ресурсів) — призначення платформ/посадкових місць за критерієм мінімізації конфліктів потоків і дистанцій пересадки [5, 19].

Для оцінювання використано показники: середній час пересадки T_{tr}^- , 95%-квантиль $T_{tr}^{0.95}$, середня довжина черги на критичному елементі \bar{L}_q , максимальна щільність на переході k_{\max} .

5.2. Вихідні дані та припущення

Задано узагальнений вузол із одним критичним сервісним елементом (наприклад, турнікетна група) типу $M/M/s$ та одним критичним переходом. Прийнято: $\lambda = 5.5$ пас./хв, $\mu = 2.0$ пас./хв, $s = 3$; швидкість пішоходів описується залежністю $v(k)$, де $v_0 = 1.4$ м/с, $k_{\max} = 5$ осіб/м².

5.3. Результати експерименту

Результати порівняння сценаріїв наведено в табл. 1 та на рис. 4.

Таблиця 1. Порівняння сценаріїв експерименту

Сценарій	T_{tr}^- (хв)	$T_{tr}^{0.95}$ (хв)	L^-q	k_{max} (осіб/м ²)
S0 (базовий)	12.4	21.0	6.5	3.8
S1 (синхронізація)	10.9	18.2	5.8	3.6
S2 (ресурси)	10.6	17.5	5.1	3.3

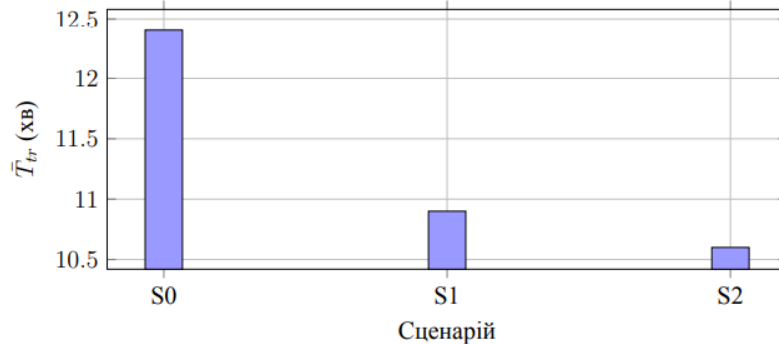


Рис. 4. Порівняння середнього часу пересадки за сценаріями.

5.4. Висновок до розділу

Експеримент показав, що організаційні заходи (синхронізація прибуттів та перерозподіл платформ/посадкових місць) забезпечують зменшення середнього та високо квантильного часу пересадки, а також знижують навантаження на критичні елементи вузла. Найкращі результати продемонстрував сценарій S2, що підтверджує важливість врахування пасажиропотоків при призначенні ресурсів вузла.

6. SWOT-аналіз.

S (сильні сторони):

Поєднання розрахунків і симуляції дає кількісну оцінку ефектів.

Підтримує сценарний аналіз без дорогих натурних втручань.

Орієнтація на показники пересадки (час, черги, щільність) відповідає цілям сервісу.

W (слабкі сторони):

Результати чутливі до якості вхідних даних і калібрування.

Спрощення геометрії/поведінки пасажирів може занижувати ризики перевантаження.

Пошук найкращих рішень у великому просторі сценаріїв може бути обчислювально складним.

O (можливості):

Інтеграція AFC/AVL та відеоаналітики для адаптивного управління.

Розширення до robust-оптимізації для збоїв/піків попиту.

Використання підходу для обґрунтування реконструкції вузлів і TOD.

T (загрози):

Раптові збої (інциденти, ремонт, погодні умови) змінюють параметри потоків.

Обмеження доступу до даних або їх неповнота.

Організаційні рішення можуть мати соціальне неприйняття (зміна маршрутів/звичок).

Перспективи подальших досліджень: (i) калібрування параметрів вузла на основі реальних даних AFC/AVL та відеоспостереження; (ii) розроблення robust- та адаптивних стратегій керування потоками в режимі реального часу; (iii) інтеграція моделей вибору маршруту/пересадки пасажирів із симуляцією внутрішньої роботи вузла; (iv) оцінка ефектів

інфраструктурної реконструкції (розширення проходів, зміна навігації) у поєднанні з організаційними заходами.

Наукова новизна полягає у формалізації інтегрованого підходу до оцінки ефективності рішень «розклад–пересадка–пропускна здатність» на рівні транспортного вузла з використанням кількісних показників (середні та квантильні часи пересадки, черги, щільність).

7. Висновки

У роботі розглянуто проблему розрахунку та оптимізації роботи транспортного вузла як «вузької ланки» транспортної мережі, що визначає час пересадки, надійність і комфорт перевезень. На основі огляду літератури та методів сучасної науки сформовано підхід, який поєднує розрахункові моделі черг, імітаційне моделювання та оптимізацію організаційних рішень (синхронізація прибуттів, призначення платформ/посадкових місць).

Систематизовано методи аналізу транспортних вузлів і визначено їх придатність для задач розрахунку потоків і оптимізації режимів роботи.

Запропоновано комбіновану методику «СМО+DES + сценарна оптимізація», що дозволяє враховувати як внутрішні черги, так і організаційні управлінські рішення.

Проведено імітаційний експеримент, який підтвердив, що синхронізація прибуттів та перерозподіл ресурсів зменшують час пересадки та навантаження на критичні елементи вузла.

Список літератури:

- 1) So J., Chae M., Hong J., Youm J., Kim S. H., Kim J. Integrated Mobility Hub Location Selection for Sustainable Urban Mobility // *Sustainable Cities and Society*. – 2023.
- 2) Optimisation of mobility hub locations for a sustainable mobility system // *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2024. – Vol. 26. – Art. 101193. –DOI: 10.1016/j.trip.2024.101193.
- 3) Optimization and Implementation Framework for Connected Demand Responsive Transit (DRT) Considering Punctuality // *Sustainability*. 2025. – Vol. 17, No. 3. – Art. 1079. –DOI: 10.3390/su17031079.
- 4) A passenger flow spatial–temporal distribution model for a passenger transit hub considering node queuing // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2024. – Vol. 163. – Art. 104640. – DOI: 10.1016/j.trc.2024.104640.
- 5) Train platforming problem from the viewpoint of passenger flow management // *Transportation*. – 2025. – DOI: 10.1007/s11116-025-10650-5.
- 6) Ren X., Chow J. Y. J. A data fusion approach for mobility hub impact assessment and location selection: integrating hub usage data into a largescale mode choice model [Електронний ресурс]. – arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2510.08366.
- 7) Barrera Hernandez J. E., Tarazona Torres L. E., Tabares A., Álvarez-Martínez D. Optimization of Bus Dispatching in Public Transportation Through a Heuristic Approach Based on Passenger Demand Forecasting // *Smart Cities*. – 2025. – Vol. 8, No. 3. Art. 87. – DOI: 10.3390/smartcities8030087.
- 8) Integrated optimization of bus bridging service design and passenger assignment in response to urban rail transit disruptions // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2023. – Vol. 150. – Art. 104098. – DOI: 10.1016/j.trc.2023.104098.
- 9) Short-term passenger flow forecast for urban rail transit based on multi-source data // *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. – 2021. – Art. 9. –DOI: 10.1186/s13638-020-01881-4.
- 10) He Y., Li L., Zhu X., Tsui K. L. Multi-Graph Convolutional-Recurrent Neural Network (MGC-RNN) for Short-Term Forecasting of Transit Passenger Flow [Електронний ресурс]. – arXiv preprint. – 2021. – arXiv:2107.13226.

- 11) Locating transit hubs in a multi-modal transportation network: A cluster-based optimization approach // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. – 2018. – Vol. 114. – P. 85– 103. – DOI: 10.1016/j.tre.2018.03.008.
- 12) Yu B., Zhu H., Cai W., Ma N., Kuang Q., Yao B. Two-phase optimization approach to transit hub location — the case of Dalian // *Journal of Transport Geography*. – 2013. – Vol. 33. – P. 62–71. – DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.09.008.
- 13) Optimization and Implementation Framework for Connected Demand Responsive Transit (DRT) Considering Punctuality // *Sustainability*. 2025. – Vol. 17, No. 3. – Art. 1079. – DOI: 10.3390/su17031079.
- 14) Lu W., Zhang Y., Vu H. L., Xu J., Li P. IPF-HMGNN: A novel integrative prediction framework for metro passenger flow [Электронный ресурс]. – arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2409.14104.
- 15) Timetable synchronization optimization in a subway–bus network // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2022. – Vol. 608, Part 1. – Art. 128273. – DOI: 10.1016/j.physa.2022.128273.
- 16) Optimizing Timetable Synchronization for Rail Mass Transit // *Transportation Research Record*. – 2004.
- 17) Hecht J., Li W., Li Z., Dehbi Y. Review of Passenger Flow Modelling Approaches Based on a Bibliometric Analysis [Электронный ресурс]. – arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2511.13742.
- 18) Subway Multi-Station Coordinated Dynamic Control Method Considering Transfer Inbound Passenger Flow // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, No. 24. – Art. 11292. – DOI: 10.3390/su162411292.
- 19) Uribe-Laverde M. A., Oquendo-Patiño W. F. Critical Role of Docking Bay Assignment in the Performance of a Bus Rapid Transit System [Электронный ресурс]. – arXiv preprint. – 2019. – arXiv:1906.11916.
- 20) Zahedi S., Koutsopoulos H. N., Ma Z. Dynamic Interlining in Bus Operations [Электронный ресурс]. – arXiv preprint. – 2022. – arXiv:2204.09971.
- 21) Jiang H., Samaranayake S. Approximation Algorithm for Generalized Budgeted Assignment Problems and Applications in Transportation Systems [Электронный ресурс]. – arXiv preprint. – 2022. – arXiv:2208.11832.
- 22) Urban Transit Hub Location Planning with a ClusterBased Optimization Model // *TRID record*. – 2021.
- 23) An analysis of layout strategies for public transport hubs in polycentric urban regions considering functional classification // *International Journal of Transportation Science and Technology*. – 2025. – DOI: 10.1016/j.ijtst.2025.02.003.
- 24) Research on the Classification of Rail Transit Stations and Passenger Flow Patterns—A Case from Xi'an, China // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 4. – Art. 1068. – DOI: 10.3390/buildings14041068.
- 25) Estimating Rail Transit Passenger Flow Considering Built Environment Factors: A Case Study in Shenzhen // *Applied Sciences*. 2024. – Vol. 14, No. 23. – Art. 10799. – DOI: 10.3390/app142310799.
- 26) Larson R. C., Odoni A. R. *Urban Operations Research*. – Prentice-Hall, 1981.
- 27) Ross S. M. *Introduction to Probability Models*. 11th ed. – Academic Press, 2014.
- 28) Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics // *Physical Review E*. – 1995. Vol. 51, No. 5. – P. 4282–4286.
- 29) Treiber M., Kesting A. *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. – Springer, 2013.
- 30) Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. *Introduction to Algorithms*. 3rd ed. – MIT Press, 2009.

- 31) Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6, No. 2. – P. 182–197.
- 32) Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. – Wiley, 2017.
-

Calculation and optimization of transport hub operation

Nataliya Kobrina

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0001-9499-2079

Konstantyn Dolia

Department of Automobiles and Transport Infrastructure, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4693-9158

Abstract: The paper focuses on the assessment and optimization of a transport hub as a critical element of an urban/regional network, where passenger transfers take place and local queues and delays are generated, affecting system-wide reliability. The goal is to obtain quantitative performance indicators of the hub (flow rates, element utilization, walking and waiting times) and to justify optimization measures aimed at reducing transfer time and improving capacity and robustness without excessive capital investments. The relevance is driven by growing demand, the integration of first/last-mile services, and the need for data-informed operational improvements.

The study reviews state-of-the-art methods for hub analysis: queueing theory to estimate congestion and waiting, discrete-event and agent-based microsimulation to reproduce spatiotemporal passenger dynamics, mathematical programming to synchronize timetables and solve platform/bay assignment problems, and data-driven demand forecasting methods. A combined methodology is selected, coupling analytical “bottleneck” calculations with simulation-based scenario optimization. An experiment is conducted by comparing a baseline operating mode with alternative organizational scenarios (arrival synchronization, platform/bay reallocation, entry-flow control) and evaluating the impacts using mean/quantile transfer times and critical-element utilization.

The scientific contribution is an integrated calculation structure that links “timetable– transfer– capacity” decisions and supports actionable operational recommendations. The results can be applied to existing hub modernization projects and further research on adaptive, data-driven hub management.

Keywords: transport hub; passenger transfer; transfer time; queueing theory; queues; discrete-event simulation; microsimulation; timetable synchronization; optimization.
