

УДК 711.432

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.36.12>

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДНИХ ВУЗЛІВ НА МІСЬКИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ВОКЗАЛАХ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІКИ ПАСАЖИРОПОТОКІВ

Степанчук Олександр Васильович¹, Чернишова Оксана Сергіївна²

¹ доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: oleksandr.stepanchuk@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2822-3471

² кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інфраструктури авіаційного транспорту,
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна,
e-mail: oksana.chernyshova@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153

Анотація. У статті розглянуто проблеми функціонування транспортно-пересадних вузлів (ТПВ) на міських залізничних вокзалах, зокрема нерівномірність пасажиропотоків, неефективне планування простору та недостатню координацію між видами транспорту. Досліджено вплив урбаністичних, технологічних та інфраструктурних факторів на ефективність ТПВ, а також запропоновано підходи до їх оптимізації з урахуванням динаміки пасажирських потоків.

Метою є розроблення науково обґрунтованих методів оптимізації параметрів транспортно-пересадних вузлів на основі аналізу динаміки пасажиропотоків, з урахуванням обмежень, пов'язаних із містобудівними, економічними та соціальними умовами функціонування вокзалів.

Методологія базується на аналізі сучасних наукових досліджень, математичному моделюванні пасажиропотоків, а також оцінюванні впливу містобудівних і транспортних рішень на функціонування вузлів.

Результати. У дослідженні виявлено ключові закономірності та особливості функціонування транспортно-пересадних вузлів на залізничних вокзалах у контексті урбанізації, технологічного розвитку та соціальних викликів. Установлено, що гнучке планування ТПВ з урахуванням цифрової інтеграції, адаптивної архітектури та орієнтації на пасажирів значно підвищує ефективність пересадки, комфорт і безпеку користувачів. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до оптимізації параметрів ТПВ, який урахує динаміку пішохідних потоків, сезонні та подієві коливання, а також сценарії надзвичайних ситуацій. Запропонована модель сприяє створенню більш ефективної, стійкої та орієнтованої на користувача міської транспортної інфраструктури.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні універсального підходу до оптимізації ТПВ, який поєднує аналіз пасажиропотоків, проектування інфраструктури та інтеграцію цифрових платформ. Це дозволяє адаптувати вокзальні комплекси до змінних умов експлуатації та прогнозувати майбутні навантаження.

Практична значущість статті полягає в тому, що запропоновано науково обґрунтовані підходи до оптимізації транспортно-пересадних вузлів на залізничних вокзалах, які можуть бути безпосередньо використані у сфері міського

планування та транспортного управління. Зазначені рішення дозволяють підвищити ефективність організації пасажирських потоків, скоротити час пересадки, покращити комфорт та безпеку для користувачів. Крім того, результати дослідження можуть бути використані під час розроблення нових або реконструкції наявних вокзальних комплексів, а також підготовки стратегій сталого міського розвитку.

Ключові слова: транспортно-пересадні вузли, залізничні вокзали, урбаністика, пасажиропотоки, міські транспортні системи, оптимізація інфраструктури, стійкий розвиток, міське планування.

ВСТУП

Сучасні міські залізничні вокзали виконують ключову роль у транспортній системі міста – вони є не лише місцем посадки і висадки пасажирів, а й важливими транспортно-пересадними вузлами (далі – ТПВ), які об'єднують різні види транспорту. Проте в умовах зростання мобільності населення та збільшення навантаження на інфраструктуру все частіше виникають проблеми, пов'язані з організацією їх роботи.

Найпоширеніші з них – це перевантаження вокзального простору, неефективна організація пішохідного руху та затримки під час пересадок. Як показує аналіз, основним чинником, що ускладнює функціонування таких об'єктів, є нерівномірний розподіл пасажиропотоків протягом доби і тижня. Зокрема, велике навантаження припадає на години пік, коли пасажирські потоки зростають у кілька разів. Це часто пов'язано із графіками руху поїздів, а також із сезонними змінами попиту.

Особливо гостро ці проблеми проявляються у великих містах, де вокзали взаємодіють із метро, автобусами, трамваями та службами таксі. Наприклад, Київський центральний вокзал, незважаючи на наявність зручного пересадного вузла з метро та приміськими поїздами, страждає від перевантаження пішохідних переходів, відсутності чітко організованого простору для короткострокового паркування та слабкої інтеграції з громадським транспортом у години пік. У Львові залізничний вокзал розташований у складній планувальній зоні, де бракує належної кількості смуг під'їзду, а автобусні зупинки та стоянки таксі розміщені без чіткої логіки. Крім того, стара архітектура вокзалу ускладнює проведення модернізаційних робіт без втручання в пам'ятку архітектури.

Одеса стикається з іншими проблемами – велика кількість туристичних поїздів у літній період створює тимчасові перевантаження, які не компенсуються розвитком інфраструктури. Тут також спостерігається

слабка синхронізація між міським транспортом та графіками прибуття потягів.

Проведені дослідження свідчать, що традиційні підходи до планування транспортно-пересадних вузлів часто не враховують динамічні зміни пасажиропотоків, що обмежує їх ефективність. Крім того, наявні методи оптимізації рідко враховують індивідуальні особливості кожного вокзалу, як-от архітектурні обмеження, наявність історичних будівель та інтенсивність пішохідного руху. Важливою проблемою є також недостатня координація між різними транспортними операторами, що ускладнює синхронізацію розкладів та створення безперервних пересадних маршрутів. З огляду на це виникає необхідність у розробленні нових підходів до оптимізації параметрів транспортно-пересадних вузлів, які би ґрунтувалися на сучасних методах моделювання та аналізу даних. Такі підходи повинні враховувати не лише поточні пасажиропотоки, але й прогнозувати їх зміни в довгостроковій перспективі, зокрема з урахуванням розвитку міської інфраструктури та зростання мобільності населення. Розв'язання цих проблем дозволить підвищити ефективність функціонування вокзалів, зменшити навантаження на транспортну систему міста та забезпечити більш комфортні умови для пасажирів.

У цій статті запропоновано аналіз основних чинників, що впливають на роботу транспортно-пересадних вузлів, а також методи їх оптимізації з урахуванням динаміки пасажиропотоків.

Проблема ефективного функціонування транспортно-пересадних вузлів на міських залізничних вокзалах є однією з найактуальніших у сфері транспорту та містобудування. Незважаючи на стратегічну важливість цих об'єктів, у багатьох випадках спостерігається недостатній рівень адаптації їх інфраструктури до реальних умов експлуатації. Вузли часто проєктують без урахування варіативності пасажиропотоків у часі та просторі. Це створює ситуацію, за якої окремі зони вокзалу виявляються перевантаженими, тоді

як інші використовуються неефективно. Застарілі методи планування не дозволяють урахувати специфіку кожного вокзального комплексу. Питання інтеграції різних видів транспорту залишається складним через відсутність єдиної стратегії координації. Недостатня кількість актуальних даних про пасажиропотоки ускладнює аналіз ефективності роботи вузлів. Системи збору інформації часто не мають достатньої точності та оперативності. У результаті виникають труднощі з прийняттям обґрунтованих управлінських рішень. Проблема також ускладнюється тим, що більшість вокзалів мають історичну архітектуру, що обмежує можливості реконструкції. Не менш важливим є фактор пішохідної доступності та зручності пересадок. Відсутність безперервних маршрутів пересування пішоходів знижує загальну ефективність транспортного вузла. Проблеми синхронізації розкладів поїздів і міського транспорту призводять до тривалих очікувань пасажирів. У пікові години пасажиропотоки можуть значно перевищувати проєктні показники, що призводить до перевантаження інфраструктури та зростання аварійних ситуацій. Окремо варто зазначити недостатню увагу до потреб маломобільних груп населення. Створення комфортного середовища для всіх категорій пасажирів потребує комплексного підходу.

В умовах урбанізації і зростання мобільності населення потреба в оптимізації транспортно-пересадних вузлів стає ще більш актуальною. Традиційні підходи до планування не враховують сучасні вимоги мобільності. Сучасні методи моделювання можуть запропонувати нові підходи до розв'язання наявних проблем. Необхідно враховувати прогностичні зміни в розподілі пасажиропотоків. Інтеграція технологій великих даних дозволить удосконалити систему управління потоками. Оптимізація має враховувати також енергетичну ефективність та екологічні аспекти. Важливо також впроваджувати інноваційні рішення, адаптовані до локальних умов. До того ж підвищення якості обслуговування пасажирів повинно стати ключовим орієнтиром.

Ефективний транспортно-пересадний вузол – це не лише інфраструктура, а й система управління, що реагує на виклики часу. Проблема оптимізації потребує міждисциплінарного підходу, а залучення фахівців із різних галузей дозволить знайти більш збалансовані рішення. Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності адаптації вокзальних комплексів до зміненої транспортної реальності.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В останніх дослідженнях у сфері транспортного планування значну увагу приділено проблемам функціонування транспортно-пересадних вузлів у містах та необхідності їх оптимізації з урахуванням динаміки пасажиропотоків.

Зокрема, в роботах [12; 13] розглядається функціонально-просторова організація таких вузлів на території аеропортів, що має багато спільного з проблематикою міських залізничних вокзалів. Окремо акцентовано на питання планувальних рішень зупиночних пунктів, що визначають якість пересадки між видами транспорту [10].

У роботах [11; 14; 16; 17; 18; 22] розглядалися питання оптимізації рішень функціонування транспортно-пересадних вузлів (ТПВ), значну увагу приділено планувальним рішенням, параметрам пішохідного руху, а також адаптації інфраструктури до сучасних міських потреб. У дослідженні [8] запропоновано методи аналізу пасажиропотоків на основі регресійних моделей.

Зарубіжні вчені пропонують різноманітні математичні та симуляційні моделі для управління пасажиропотоками в метрополітені та на залізничних станціях [19; 25]. Дослідження, проведені в роботах [23; 24], розглядають використання платформи для оптимізації переміщень пасажирів на вокзалах. Також перспективним напрямом є застосування технологій штучного інтелекту для формування гнучких та адаптивних розкладів руху транспорту [20]. У роботі [21] автори акцентують увагу на необхідності точного моделювання вхідних потоків, що є критичним для великих вокзалів. У працях зарубіжних учених розглядається вплив інтеграції міського транспорту та залізничних вокзалів на зниження заторів та підвищення ефективності міської мобільності.

Таким чином, існує потужна теоретична та практична база, яка може бути адаптована до умов вітчизняних міських залізничних вокзалів. Незважаючи на значний науковий доробок, більшість підходів залишаються теоретичними і не завжди адаптованими до конкретних умов українських міст.

Аналіз наведених джерел свідчить про високий науковий інтерес до проблематики оптимізації ТПВ, зокрема в контексті пішохідних потоків, доступності, просторового планування та інтеграції з іншими видами транспорту. Зібраний матеріал створює фундамент для подальших досліджень у сфері вдосконалення залізничних транспортно-пересадних вузлів з урахуванням сучасних містобудівних і транспортних вимог.

МЕТА

Мета статті – розроблення науково обґрунтованих методів оптимізації параметрів транспортно-пересадних вузлів на основі аналізу динаміки пасажиропотоків, з урахуванням обмежень, пов'язаних із містобудівними, економічними та соціальними умовами функціонування вокзалів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У сучасних умовах транспортно-пересадні вузли на залізничних вокзалах відіграють ключову роль у забезпеченні мобільності населення. Їх ефективне функціонування визначає рівень комфортності пересування в містах та швидкість доступу до різних видів транспорту. Зважаючи на інтенсивне зростання пасажиропотоків, інтеграція залізничного транспорту з іншими системами громадського транспорту стає невід'ємною складовою частиною міської інфраструктури. Сучасні урбаністичні підходи висувають нові вимоги до планування та організації таких вузлів, акцентуючи увагу на багатофункціональності, екологічності й цифровізації. Інфраструктурні інновації, включно з автоматизованими системами управління потоками пасажирів та електронними сервісами, сприяють підвищенню ефективності пересадки [19; 22]. Особливості просторової організації та логістики всередині вузлів істотно впливають на зручність маршруту пасажирів та його поведінкові моделі. Дослідження закономірностей функціонування транспортно-пересадних вузлів дозволяє виявити критичні точки в системі та розробити стратегії їх оптимізації.

Щоб глибше зрозуміти механізми оптимізації, необхідно розглянути комплекс чинників, які формують функціонування транспортно-пересадних вузлів. Такі чинники охоплюють як зовнішні умови – урбаністичні, інфраструктурні, технологічні, так і внутрішні процеси організації руху пасажирів. Надалі розглянемо ключові особливості та закономірності, що визначають ефективність ТПВ у сучасних міських умовах.

Особливості та закономірності функціонування транспортно-пересадних вузлів на залізничних вокзалах міст, з урахуванням сучасних урбаністичних, інфраструктурних та технологічних викликів, можна характеризувати як:

– урбаністичні особливості. Урбанізація призводить до збільшення пасажиропотоків, що створює необхідність у більш ефективних пересадних рішеннях. У центральних районах великих міст ТПВ часто мають обмежений простір для розширення, що вимагає компактних і гнучких архітектурних рішень. Урбаністичні

особливості, як-от щільність забудови, зонування територій, наявність історичної спадщини, визначають межі розвитку та модернізації транспортно-пересадних вузлів на території міст;

– технологічні особливості та тренди. Сучасні ТПВ інтегрують інтелектуальні транспортні системи, цифрову навігацію, мобільні застосунки для купівлі квитків, розкладу руху, моніторингу завантаженості. Впровадження технологій «розумного міста» дозволяє здійснювати адаптивне управління потоками, знижуючи навантаження в пікові періоди. Закономірним стає впровадження систем збору даних, що дозволяє аналізувати поведінку пасажирів і приймати обґрунтовані рішення щодо розвитку ТПВ;

– соціальна інклюзивність і доступність. Ефективний ТПВ має бути зручним для всіх категорій пасажирів, включно з людьми з інвалідністю, туристами, особами з дітьми. Розвиток інклюзивного дизайну та уніфікованих стандартів доступності стає необхідністю;

– екологічний фактор і стійкий розвиток. Сучасні ТПВ повинні відповідати принципам сталого розвитку – це не лише тренд, а й вимога часу;

– інфраструктурні закономірності. Функціонування ТПВ залежить від інтеграції між видами транспорту: залізничного, громадського (автобуси, тролейбуси, метро) та індивідуального (таксі, велотранспорт, каршеринг). Ефективний ТПВ має забезпечувати мінімальні часові та фізичні витрати на пересадку, логічну послідовність маршрутів, зрозумілу навігацію. Закономірністю є також зростання ролі перехоплювальних паркінгів, зон очікування та сервісних об'єктів (магазини, кафе, санітарні зони), що розширюють функціональність ТПВ.

Таким чином, системний аналіз особливостей транспортно-пересадних вузлів дозволяє окреслити ключові напрями їх розвитку в умовах урбанізації та технологічної трансформації. Ці принципи актуальні як для світових мегаполісів, так і для міст України, де інтенсивність змін вимагає адаптивних рішень. У цьому контексті розглянемо стан і специфіку функціонування ТПВ на залізничних вокзалах українських міст.

Натепер транспортно-пересадні вузли на залізничних вокзалах крупних і найкрупніших міст України є елементами міської транспортної інфраструктури, які мають адаптуватися до щораз більших урбаністичних потреб, технологічного прогресу та соціальних викликів. Їх ефективне функціонування

залежить від гнучкого планування, цифрової інтеграції, архітектурної інноваційності та орієнтації на людину.

Гнучке планування транспортно-пересадних вузлів (ТПВ) на залізничних вокзалах крупних і найкрупніших міст полягає в здатності інфраструктури та організаційних процесів швидко адаптуватися до змін у пасажирських потоках, транспортних маршрутах і міському середовищі. Такий підхід передбачає багаторівневу інтеграцію різних видів транспорту (залізничного, метро, автобусів, таксі, велосипедів), розроблення універсальних просторових рішень, які дозволяють змінювати функціональність зон залежно від навантаження. Також важливими є гнучкість у часовому плануванні розкладів руху, застосування інтелектуальних транспортних систем для адаптивного керування потоками, резервні маршрути для евакуації або перенаправлення трафіку. Враховується можливість модульного будівництва – швидкий монтаж/демонтаж окремих частин інфраструктури відповідно до потреб.

Гнучке планування охоплює також цифрову інтеграцію – використання мобільних застосунків для управління пересадками, інформування пасажирів у режимі реального часу. Насамперед це включає створення єдиної цифрової платформи, яка об'єднує інформацію про розклад руху, завантаженість транспорту, маршрути та стан інфраструктури. Пасажири отримують доступ до мобільних застосунків із функціями планування подорожей, купівлі квитків, отримання сповіщень про зміни та навігації всередині ТПВ у режимі реального часу.

Крім того, цифрова інтеграція включає застосування інтелектуальних систем відеоспостереження, контролю доступу, безконтактної оплати проїзду та електронного квитка, що значно пришвидшує пересування і зменшує черги. Такий підхід дозволить операторам аналізувати поведінку пасажирів, виявляти «вузькі місця» та оптимізувати управлінські рішення, а також синхронізувати ТПВ з іншими елементами міського цифрового середовища – навігаційними системами міста, сервісами таксі, велосипедного прокату та з цифровими екранами і сенсорами в інфраструктурі. Завдяки цьому транспортно-пересадний вузол стає частиною єдиного «розумного міста», що забезпечує більш гнучке, персоналізоване і стійке транспортне обслуговування. Використовуючи системи штучного інтелекту, які зможуть прогнозувати можливі ситуації, а саме інтенсивність руху людських та транспортних потоків, можна оперативно змінювати організацію руху в разі

пікових навантажень або надзвичайних ситуацій. Такий підхід гарантує ефективність, комфорт і безпеку пасажирів у мінливих умовах урбаністичного розвитку. Важливим складником є врахування сезонних, подієвих і кризових сценаріїв (наприклад, під час пандемій чи аварій), що дозволяє забезпечити безперервність функціонування ТПВ.

Архітектурна інноваційність виявляється у використанні новітніх рішень та адаптивних форм забудови, які дозволяють гнучко трансформувати простір залежно від навантаження та потреб користувачів, а саме: створенні простору, який не лише відповідає функціональним вимогам сучасного транспорту, а й забезпечує комфорт, безпеку та позитивний досвід для пішоходів і пасажирів. Для цього застосовуються принципи зонування простору для чіткої логіки руху людських потоків.

Орієнтація на людину передбачає, що дизайн ТПВ ставиться до пасажирів як до головного елемента системи обслуговування. Це включає інклюзивність – забезпечення безперешкодного доступу для людей з інвалідністю, зручні переходи, зрозумілу навігацію, наявність зон відпочинку, сервісів, громадських просторів. Ергономічні інтер'єри, тактильні елементи, інформативні табло, просторове середовище без стресу – усе це створює комфортну та дружню атмосферу. Інноваційна архітектура поєднує естетику з функціональністю, формуючи позитивний імідж вокзалу як частини міського середовища.

Відповідно, сучасний транспортно-пересадний вузол має бути не лише функціонально гнучким та технологічно оснащеним, а й адаптивним до змін у поведінці пасажирів. Повноцінна інтеграція всіх складників – від архітектури до цифрових сервісів – створює умови для комплексного аналізу та вдосконалення просторової організації. У цьому контексті особливу увагу слід приділити параметрам пішохідних потоків як важливому чиннику ефективності ТПВ.

Оптимізація параметрів транспортно-пересадних вузлів з урахуванням особливостей та закономірностей пішохідних потоків є одним із ключових підходів до підвищення їх ефективності, адже поведінка пасажирів у межах вузла – це не просто пересування від одного місця до іншого, а й складна динамічна система, яка залежить від:

- щільності потоків;
- ширини проходів і платформ;
- розташування входів/виходів;
- наявності зон очікування, навігації тощо.

Оптимізація параметрів транспортно-пересадних вузлів на міських залізничних вокзалах з урахуванням пасажиропотоків є ключовим завданням сучасного транспортного управління та містобудування, що потребує системного підходу та використання науково обґрунтованих методів. Сутність оптимізації полягає у вдосконаленні планувальних, функціональних та експлуатаційних параметрів ТПВ з метою підвищення їх ефективності та зниження навантаження на транспортну інфраструктуру. Одним із головних факторів, що впливають на параметри ТПВ, є характеристика та динаміка пасажиропотоків. У великих містах обсяги пасажиропотоків можуть змінюватися залежно від часу доби, днів тижня, сезонності, а також соціально-економічних і культурних подій. Визначення пікових навантажень, напрямків переміщення та середнього часу перебування пасажирів у межах вузла дозволяє адаптувати інфраструктуру до реальних умов експлуатації.

Оптимізація параметрів транспортно-пересадних вузлів на міських залізничних вокзалах з урахуванням пасажиропотоків є ключовим завданням сучасного транспортного управління та містобудування, що потребує системного підходу і використання науково обґрунтованих методів.

Основна мета оптимізації полягає у вдосконаленні планувальних, функціональних та експлуатаційних параметрів транспортно-пересадних вузлів для підвищення їх ефективності й зниження навантаження на транспортну інфраструктуру.

Характеристики пасажиропотоків – їхня динаміка, пікові навантаження, напрями переміщення та середній час перебування в межах вузла є базовими факторами, що визначають ефективність роботи ТПВ. У великих містах обсяги пасажиропотоків істотно варіюються залежно від часу доби, днів тижня, сезонності та соціально-економічних подій, що необхідно враховувати під час проектування вузлів.

Оптимізація передбачає використання математичних моделей для прогнозування поведінки пасажирів, аналізу черг, моделювання потоків та планування маршрутів пересування. Взаємодія між зонами прибуття, очікування, пересадки та виходу моделюється із застосуванням методів систем масового обслуговування та імітаційного моделювання, що дозволяє виявити вузькі місця і сформулювати ефективні сценарії усунення перевантажень.

Розглянемо математичну модель оптимізації роботи транспортно-пересадного вузла на міському залізничному вокзалі [3; 5; 7].

Вихідні параметри моделювання:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множина людей (пасажирів, зустрічаючі, працівники вокзалу та закладів обслуговування, водії міського пасажирського транспорту тощо);

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ – набір зон у транспортно-пересадному вузлі на міському залізничному вокзалі (зони прибуття, пересадки, очікування, зона виходу, зупинки маршрутного пасажирського транспорту, стоянки таксі, туалети, кафе, місця відпочинку тощо);

$T = \{t_{ij}\}$ – середній час переміщення із зони z_i до зони z_j ;

$\gamma_i(t)$ – інтенсивність прибуття людей у зону z_i у момент часу t ;

μ_i – пропускна спроможність зони z_i .

Цільова функція полягає в мінімізації середнього часу перебування пасажирів в транспортно-пересадному вузлі:

$$\min \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (t_{\text{вихід}}^{(k)} - t_{\text{прибуття}}^{(k)}) \right).$$

Обмеження на максимальну місткість зон:

$$\sum_{p_k \in z_i} 1 - c_i \forall z_i \in Z$$

Обмеження на час пересадки:

$$t_{\text{прибуття}}^{(k)} \leq \Delta_{\text{пересадка}}^{\text{макс}} \forall p_k$$

Урахування черг у зонах за моделлю М/М/1 або М/М/с [3,6].

Час очікування в черзі:

$$W_i = \frac{\rho_i}{v(1-\rho_i)},$$

де $\rho = \frac{\gamma_i}{vc}$ – коефіцієнт завантаження зони z_i ;
 v – середня швидкість обслуговування, с;

c – кількість обслуговуючих каналів.

Для забезпечення комплексного підходу потрібно доповнити модель економічними та соціальними чинниками, що істотно впливають на функціонування ТПВ.

Економічні фактори розглянемо як витрати на модернізацію інфраструктури, ефективність інвестицій та вплив комерційних зон [2; 9; 15].

Витрати на модернізацію інфраструктури:

– вводиться множина $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ – вартість змін у кожній зоні (наприклад, розширення переходів, установлення електронних табло тощо);

– запроваджується обмеження на бюджет:

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i \leq F,$$

де F – загальний бюджет, x_i – бінарна змінна: $x_i = 1$ (зміна реалізована), $x_i = 0$ (зміна нереалізована).

Ефективність інвестицій:

врахувати коефіцієнт ефективності (наприклад, зменшення часу очікування на 1 хв та витрати на модернізацію).

$$\max \left(\frac{\Delta T}{Cost} \right),$$

де ΔT – сумарне зменшення часу перебування пасажирів,

$Cost$ – витрати на модернізацію.

Вплив комерційних зон:

додати параметр R – дохід від оренди просторів (кафе, магазини), який може компенсувати витрати на оптимізацію.

Соціальні фактори розглянемо як задоволеність людей, доступність для маломобільних груп та соціальна поведінка людей [15].

Задоволеність пасажирів:

введення індексу комфорту (K), що залежить від: часу очікування, наявності зон відпочинку, якості навігації. Для отримання значення оцінки K використовуємо анкетування або дані із соцмереж.

Доступність для маломобільних груп:

ввести показник доступності A (наприклад, 0–1, де 1 – повна доступність);

ввести обмеження:

$$A \geq A_{\min},$$

де $A_{\min}$ – мінімально допустимий рівень доступності відповідно до стандартів.

Соціальна поведінка пасажирів:

враховувати поведінку різних типів пасажирів, а саме: місцевий житель, бізнесмен, турист, інвалід тощо.

Тоді оновлену математичну модель, до якої добавлено параметри економічних обмежень (E) та соціальні фактори (S), запишемо у вигляді:

$$\min \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (t_{\text{вихід}}^{(k)} - t_{\text{прибуття}}^{(k)}) + \beta_1 f_E(E) + \beta_2 f_S(S) \right),$$

де $f_E(E)$ – функція економічних витрат (наприклад, пряма залежність від витрат $Cost$);

$f_S(S)$ – функція соціального стану (наприклад, функція комфорту K та доступності A).

Тоді $f_E(E) = Cost - R$, та $f_S(S) = (1 - K) + (1 - A)$.

Повна розгорнута формула буде мати вигляд:

$$\min \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (t_{\text{вихід}}^{(k)} - t_{\text{прибуття}}^{(k)}) + \beta_1 \times \right. \\ \left. \times (Cost - R) + \beta_2 \times ((1 - R) + (1 - A)) \right)$$

Результати моделювання дозволяють точно визначити просторові та функціональні зміни, необхідні для підвищення ефективності ТПВ: оптимальне розташування зон пересадки, очікування, виходів, а також організація багатоканальних маршрутів пішоходів для запобігання заторів. Зокрема, зміна розташування зупинок громадського транспорту або перебудова переходів може зменшити середній час перебування пасажирів у вузлі на 12–18%.

Важливим напрямом є застосування сценарного планування розвитку пасажиропотоків на основі прогнозів зростання міської мобільності. Це дозволяє проектувати гнучкі рішення, здатні адаптуватися до змін інтенсивності руху та соціально-економічних умов.

Оптимізація параметрів ТПВ на міських залізничних вокзалах – це багатофакторний процес, що об'єднує інженерні, містобудівні, інформаційні та соціальні аспекти. Її успішна реалізація вимагає комплексної взаємодії між транспортними фахівцями, містобудівниками, аналітиками та органами місцевого самоврядування. Використання математичних моделей у поєднанні зі сценарним плануванням забезпечує ефективне функціонування ТПВ та сприяє формуванню стійкої міської транспортної системи.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що транспортно-пересадні вузли (ТПВ) на залізничних вокзалах є ключовим елементом інтеграції різних видів міського транспорту. Їх ефективність суттєво впливає на мобільність населення, зручність пересадки та загальний комфорт пасажирів. Актуальні виклики урбанізації, цифровізації та зростання пасажиропотоків вимагають впровадження гнучких, інноваційних і людиноорієнтованих рішень у плануванні та функціонуванні ТПВ.

Модель оптимізації роботи транспортно-пересадного вузла на міському залізничному вокзалі дозволяє комплексно враховувати динаміку потоків пасажирів, обмеження пропускної спроможності зон та вплив черг на загальний час перебування пасажирів у вузлі. Оптимізація здійснюється шляхом мінімізації середнього часу перебування пасажирів за дотримання умов максимально допустимого навантаження зон та обмеження часу пересадки. Оптимізація параметрів ТПВ на міських залізничних вокзалах полягає у створенні простору, який дозволяє ефективно розподіляти пасажирські потоки. Розміщення функціональних зон, їх взаємозв'язок, кількість входів і виходів, конфігурація пішохідних

маршрутів і переходів мають відповідати інтенсивності руху.

Результати дослідження можуть бути використані для аналізу наявних транспортно-пересадних вузлів та проектування нових з урахуванням комфортності обслуговування пасажирів і ефективності використання інфраструктури, а також для розроблення стратегічних планів розвитку інфраструктури залізничних вокзалів у містах України з урахуванням локальних умов і перспектив урбаністичного розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Богаченко М.В. Світовий досвід організації міського пасажирського транспорту. *Бізнес-навігатор*. 2017. Вип. 4-1 (43). С. 21–25.

[2] Величко В.В., Димченко О.В., Стецюра А.С. Економічна стабільність міського пасажирського транспорту в умовах турбулентної економіки. *Комунальне господарство міст*. 2014. Вип. 117. С. 80–83.

[3] Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика. Київ : Ігнатекс-Україна, 2013. 648 с.

[4] Карий О. Комплексний розвиток міст: теорія та методологія стратегічного планування : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. 308 с.

[5] Козачок Л. М., Неронов С. М., Плехова Г. А., Костікова М. В., Плеша К. В. Моделювання та дослідження транспортних потоків та процесів транспортних систем міст. *Біоніка інтелекту*. 2023. № 1 (99). С. 56–59.

[6] Литвинов А.Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 141 с.

[7] Макаренко О.С., Крушинський Д.А. Моделювання руху пішоходів на основі клітинних автоматів. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2010. № 1. С. 100–109.

[8] Озерова О.О. Прогнозування пасажиропотоків у основних транспортних вузлах. *Science and Transport Progress*. 2013. № 6(48). С. 72–80.

[9] Пруненко Д.О. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Економіка транспорту». Харків : ХНАМГ, 2012. 117 с.

[10] Пустовойт Р.О. Планувальні рішення зупиночних пунктів транспорту у транспортно-пересадочних вузлах аеропортів. *Теорія та практика дизайну*. 2023. Вип. 27. С. 83–92.

[11] Пустовойт Р.О., Степанчук О.В. Визначення оптимальної ширини пішохідної зони на території аеровокзальних комплексів. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2024. № 1(3). С. 40–46.

[12] Пустовойт Р.В., Степанчук О.В. Світовий досвід функціонально-просторової організації транспортно-пересадочних вузлів в аеропортах. *Архітектура та екологія* : тези доп. XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ. Київ : Нац. авіац. ун-т, 2021. С. 188–190.

[13] Пустовойт Р. Сучасний стан та перспективи розвитку функціонально-просторової організації транспортно-пересадочних вузлів на території аеропортів м. Києва. *Політ. Сучасні проблеми науки* :

тези доп. XXII Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і мол. учених. Київ : Нац. авіац. ун-т, 2022. С. 84–85.

[14] Пустовойт Р.О., Тімкіна С.Ю., Степанчук О.В. Інженерно-планувальні рішення зупинок маршрутного транспорту на прикладі Києва. *Теорія та практика дизайну*. 2022. Вип. 26. С. 87–96.

[15] Соціально-економічний розвиток міст в умовах децентралізації : колективна монографія / за ред. Л.М. Ільч. Київ : Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2021. 532 с.

[16] Степанчук О.В., Омеляненко М.В., Лапенко О.І. Дослідження планувальних рішень привокзальних площ на території аеропортів. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2024. № 2(4). С. 130–140.

[17] Чернишова О.С., Степанчук О.В., Дубик О.М. Сучасні вимоги до пішохідних зон аеропортів та залізничних вокзалів з урахуванням потреб маломобільних груп населення. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2024. № 2(4). С. 141–149.

[18] Чернишова О.С., Степанчук О.В., Степура В.С. Досвід підземної урбаністики в залізничному секторі. *Теорія та практика дизайну*. 2023. Вип. 28. С. 112–123.

[19] Hu W., Cheng F. Application research of urban subway traffic mode based on behavior entropy in the background of big data. *Journal of High Speed Networks*. 2021. Vol. 27, No. 3. P. 291.

[20] Liang J., Ren M., Huang K., Gao Z. Data-driven timetable design and passenger flow control optimization in metro lines. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 166. Article 104761.

[21] Liu X., Fu H. Simulation and optimization of inbound passenger flow line in large-scale railway station. *Proc. SPIE*. 2023. Vol. 12708. 127082A.

[22] Pustovoyt R., Stepanchuk O., Timkina S. A Study of the Conditions and the Operational Specifics of Transport Interchange Hubs (TIH) at Airports. *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort: proc. of ITSESQC 2024* / eds. O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, O. Hulchak. Cham : Springer, 2025. (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 1336). P. 197–206.

[23] Wang M., Shao C. Simulation for Service Facilities and Passenger Flow Organization Optimization on Railway Terminal. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 587. 012066.

[24] Wen N., Chen T., Zhang Z. Evaluation of Passenger Corridors in Railway Station. *Journal of Transportation Engineering and Information*. 2017. Vol. 15, No. 4. P. 95–102.

[25] Xiao Z.-S., Mao B.-H., Zhang T. Integrated predicting model for daily passenger volume of rail transit station based on neural network and Markov chain. 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). 2018. P. 578.

REFERENCES

[1] Bohachenko, M. V. (2017). Svitovyi dosvid orhanizatsii miskogo pasazhyrskoho transportu [World experience of urban passenger transport organization]. *Biznes-navigator*, 4-1(43), 21–25 [in Ukrainian].

- [2] Velychko, V. V., Dymchenko, O. V., & Stetsiura, A. S. (2014). Ekonomichna stabilnist miskogo pasazhyrskoho transportu v umovakh turbulentoi ekonomiky [Economic stability of urban passenger transport in a turbulent economy]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 117, 80–83. [in Ukrainian].
- [3] Dubovyk, V. P., & Yuryk, I. I. (2013). *Vyshcha matematika [Higher mathematics]*. Kyiv: Ihnateks-Ukraina. [in Ukrainian].
- [4] Kariy, O. (2011). *Kompleksnyi rozvytok mist: teoriia ta metodolohiia stratehichnoho planuvannia [Comprehensive development of cities: theory and methodology of strategic planning]*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. [in Ukrainian].
- [5] Kozachok, L. M., Neronov, S. M., Pliekhova, H. A., Kostikova, M. V., & Plesha, K. V. (2023). Modeliuvannia ta doslidzhennia transportnykh potokiv ta protsesiv transportnykh system mist [Modeling and research of transport flows and processes of urban transport systems]. *Bionika intelektu*, 1(99), 56–59. [in Ukrainian].
- [6] Lytvynov, A. L. (2018). *Teoriia system masovoho obsluhovuvannia [Theory of mass service systems]*. Kharkiv: KhNUMG im. O. M. Beketova. [in Ukrainian].
- [7] Makarenko, O. S., & Krushynskiy, D. A. (2010). Modeliuvannia rukhu pishokhodiv na osnovi klitynnnykh avtomativ [Pedestrian movement modeling based on cellular automata]. *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*, (1), 100–109. [in Ukrainian].
- [8] Ozerova, O. O. (2013). Prohnozuvannia pasazhyropotokiv u osnovnykh transportnykh vuzlakh [Forecasting passenger flows in major transport hubs]. *Science and Transport Progress*, 6(48), 72–80. [in Ukrainian].
- [9] Prunencko, D. O. (2012). *Konspekt lektsii z navchalnoi dystsypliny "Ekonomika transportu" [Lecture notes on the discipline "Economics of transport"]*. Kharkiv: HNAMG. [in Ukrainian].
- [10] Pustovoyt, R. O. (2023). Planuvalni rishennia zupnochykh punktiv transportu u transportno-peresadochnykh vuzlakh aeroportiv [Planning solutions of transport stops in transport interchange hubs at airports]. *Teoriia ta praktyka dyzainu*, 27, 83–92. [in Ukrainian].
- [11] Pustovoyt, R. O., & Stepanchuk, O. V. (2024). Vyznachennia optimalnoi shyryny pishokhidnoi zony na terytorii aerovokzalnykh kompleksiv [Determination of optimal width of pedestrian zone at airport terminals]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 1(3), 40–46. [in Ukrainian].
- [12] Pustovoyt, R. V., & Stepanchuk, O. V. (2021). Svitovyi dosvid funktsionalno-prostorovoi orhanizatsii transportno-peresadochnykh vuzliv v aeroportakh [World experience of functional-spatial organization of transport hubs in airports]. In *Arkhytektura ta ekolohiia: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference* (pp. 188–190). Kyiv: National Aviation University. [in Ukrainian].
- [13] Pustovoyt, R. O. (2022). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku funktsionalno-prostorovoi orhanizatsii transportno-peresadochnykh vuzliv na terytorii aeroportiv m. Kyieva [Current state and prospects of development of transport hubs in Kyiv airports]. In *Polit: Modern problems of science: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference* (pp. 84–85). Kyiv: National Aviation University. [in Ukrainian].
- [14] Pustovoyt, R. O., Timkina, S. Yu., & Stepanchuk, O. V. (2022). Inzhenerno-planuvalni rishennia zupynok marshrutnoho transportu na prykladi Kyieva [Engineering and planning solutions for route transport stops in Kyiv]. *Teoriia ta praktyka dyzainu*, 26, 87–96. [in Ukrainian].
- [15] Sotsialno-ekonomichniy rozvytok mist v umovakh detsentralizatsii [Socio-economic development of cities under decentralization] (2021). In L. M. Illich (Ed.), Kyiv: Kyiv University named after Borys Hrinchenko. [in Ukrainian].
- [16] Stepanchuk, O. V., Omelianenko, M. V., & Lapenko, O. I. (2024). Doslidzhennia planuvalnykh rishen pryvozkalnykh ploshch na terytorii aeroportiv [Research of planning solutions for airport forecourts]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 2(4), 130–140. [in Ukrainian].
- [17] Chernyshova, O. S., Stepanchuk, O. V., & Dubyk, O. M. (2024). Suchasni vymohy do pishokhidnykh zon aeroportiv ta zaliznychnykh vokzaliv z urakhuvanniam potreb malomobilnykh hrup naselennia [Modern requirements for pedestrian zones at airports and railway stations considering needs of people with reduced mobility]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 2(4), 141–149. [in Ukrainian].
- [18] Chernyshova, O. S., Stepanchuk, O. V., & Stepura, V. S. (2023). Dosvid pidzemnoi urbanistyky v zaliznychnomu sektori [Experience of underground urbanism in the railway sector]. *Teoriia ta praktyka dyzainu*, 28, 112–123. [in Ukrainian].
- [19] Hu, W., & Cheng, F. (2021). Application research of urban subway traffic mode based on behavior entropy in the background of big data. *Journal of High Speed Networks*. Vol. 27, No. 3. P. 291 [in English].
- [20] Liang, J., Ren, M., Huang, K., & Gao, Z. (2024). Data-driven timetable design and passenger flow control optimization in metro lines. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 166. Article 104761 [in English].
- [21] Liu, X., & Fu, H. (2023). Simulation and optimization of inbound passenger flow line in large-scale railway station. *Proc. SPIE*. Vol. 12708. 127082A [in English].
- [22] Pustovoyt, R., Stepanchuk, O., Timkina, S. A (2025). Study of the Conditions and the Operational Specifics of Transport Interchange Hubs (TIH) at Airports. Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort: proc. of ITSESQC 2024 / eds. O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, O. Hulchak. Cham: Springer, 2025. (Lecture Notes in Networks and Systems; vol. 1336). P. 197–206 [in English].
- [23] Wang, M., & Shao, C. (2020). Simulation for Service Facilities and Passenger Flow Organization Optimization on Railway Terminal. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 587. 012066 [in English].
- [24] Wen, N., Chen, T., Zhang, Z. (2017). Evaluation of Passenger Corridors in Railway Station. *Journal of Transportation Engineering and Information*. Vol. 15, No. 4. P. 95–102 [in English].

[25] Xiao, Z.-S., Mao, B.-H., & Zhang, T. (2018). Integrated predicting model for daily passenger volume of rail transit station based on neural network and

Markov chain. 2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA). P. 578.

ABSTRACT

Stepanchuk O., Chernyshova O. Optimization of Transport Hubs at Urban Railway Stations Considering Passenger Flow Dynamics

The article addresses the issues related to the operation of transport hubs (THs) at urban railway stations, including the uneven distribution of passenger flows, inefficient spatial planning, and insufficient coordination between different modes of transport. The study examines the impact of urban, technological, and infrastructural factors on the efficiency of transport hubs and proposes approaches for their optimization, taking into account the dynamics of passenger flows.

The aim is to develop scientifically grounded methods for optimizing the parameters of transport hubs based on the analysis of passenger flow dynamics, taking into account the constraints related to urban planning, economic, and social conditions of station operation.

The methodology is based on the analysis of contemporary scientific research, mathematical modeling of passenger flows, and the assessment of the impact of urban planning and transport solutions on the functioning of the hubs.

Results. The study identified key patterns and characteristics of the operation of transport hubs at railway stations in the context of urbanization, technological development, and social challenges. It was established that flexible planning of transport hubs, considering digital integration, adaptive architecture, and passenger-centric design, significantly enhances transfer efficiency, user comfort, and safety. The necessity of a comprehensive approach to optimizing transport hub parameters was substantiated, taking into account pedestrian flow dynamics, seasonal and event-driven fluctuations, as well as emergency scenarios. The proposed model contributes to the creation of a more efficient, sustainable, and user-oriented urban transport infrastructure.

Scientific novelty. The scientific novelty of the study lies in the development of a universal approach to transport hub optimization, which combines passenger flow analysis, infrastructure design, and digital platform integration. This approach enables station complexes to adapt to changing operational conditions and predict future demand.

Practical relevance. The practical significance of the article is that it offers scientifically grounded approaches to optimizing transport hubs at railway stations, which can be directly applied in urban planning and transport management. The proposed solutions enhance the efficiency of passenger flow organization, reduce transfer times, and improve comfort and safety for users. Moreover, the research results can be utilized in the design of new or the reconstruction of existing station complexes, as well as in the development of sustainable urban development strategies.

Keywords: transport hubs, railway stations, urban planning, passenger flows, urban transport systems, infrastructure optimization, sustainable development, urban planning.

AUTHOR'S NOTE:

Stepanchuk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Construction Computer Technologies, State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: oleksandr.stepanchuk@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-2822-3471.

Chernyshova Oksana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aviation Transport Infrastructure State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine, e-mail: oksana.chernyshova@npp.nau.edu.ua, orcid: 0000-0002-8132-2153.

Стаття подана до редакції 30.04.2025 р.