

Дослідження чинників впливу на формування пасажиropотоків залізничних приміських перевезень

Тетяна Грушевська

*Державний університет інфраструктури та технологій
м. Київ, Україна*

I. АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПАСАЖИРОПОТОКИ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПРИМІСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Приміські пасажирські перевезення займають важливе соціальне значення і є ключовим сегментом конкурентного ринку транспортних послуг [1]. Це особливо помітно в умовах великих міст, де приміські залізничні перевезення часто конкурують із маршрутними таксі, які пропонують вищий рівень сервісу за схожою вартістю проїзду. Концентрація таких перевезень у мегаполісах та постійне зростання пасажиропотоків пояснюються розвитком сучасних житлових масивів у приміських зонах, котеджних містечок, що інтенсивно розбудовуються навколо Києва та інших великих міст України, організацією рекреаційних зон та спортивно-оздоровчих комплексів, а також зростанням культурного рівня населення.

Сучасні великі міста та міські агломерації стикаються з численними викликами, пов'язаними з ефективною організацією транспортних систем. Серед ключових аспектів транспортного обслуговування мегаполісів є забезпечення належної роботи приміського пасажирського транспорту, який пов'язує центри міст з прилеглими населеними пунктами. Зростання чисельності населення, розвиток приміських зон та зростаючий попит на перевезення вимагають нових підходів до планування та організації таких транспортних систем.

Математичні моделі є потужним інструментом для вирішення завдань оптимізації транспортних потоків, мінімізації витрат на

перевезення та підвищення якості транспортного обслуговування. Вони дозволяють оцінити фактори, що впливають на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень, аналізувати різноманітні аспекти транспортних систем, прогнозувати їх розвиток та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Для поїздок у приміському сполученні пасажирів постійно обирають між різними видами транспорту, такими як маршрутні автобуси, таксі, залізничний транспорт або особисті автомобілі. Вибір залежить від низки факторів, що приваблюють або відштовхують пасажирів: час у дорозі, зручність графіків відправлення та прибуття на основні та проміжні станції, комфорт перевезення, вартість проїзду, безпека, незалежність від погодних умов, а також початкові й кінцеві витрати часу, пов'язані з організацією поїздки. З огляду на сучасні тенденції розвитку приміських пасажирських перевезень, важливо враховувати ймовірність вибору пасажиром виду транспорту в умовах конкурентного ринку.

Розвинута залізнична мережа України, що вирізняється високими провізними можливостями, регулярністю та універсальністю перевезень, забезпечує надійність, незалежно від сезону чи кліматичних умов. В умовах жорсткої конкуренції це підкреслює важливість залізничних пасажирських приміських перевезень для транспортного обслуговування великих міст.

Пасажиропотоки залізничних приміських перевезень залежать від низки факторів, які впливають на попит на транспортні послуги в регіоні, розвиток інфраструктури та загальну соціально-економічну ситуацію. Розглянемо фактори, які змінюють обсяги перевезень та структуру пасажиропотоків. Потреби пасажирів можуть бути згруповані та візуалізовані у вигляді піраміди, подібної до «піраміди Маслоу». Практика показує, що коли базові вимоги, такі як безпека та швидкість, на нижніх рівнях піраміди задовольняються належним чином, фокус клієнтів зміщується до потреб на вищих рівнях. Вершина піраміди відображає більший акцент на зручності, комфорті та загальному клієнтському досвіді при використанні транспорту [2].

Ілюстрація з джерела також показує піраміду, аналогічну «піраміді потреб» Маслоу, яку можна назвати «Піраміда потреб пасажира» [2]. Піраміда потреб пасажира представлена на рис. 1.

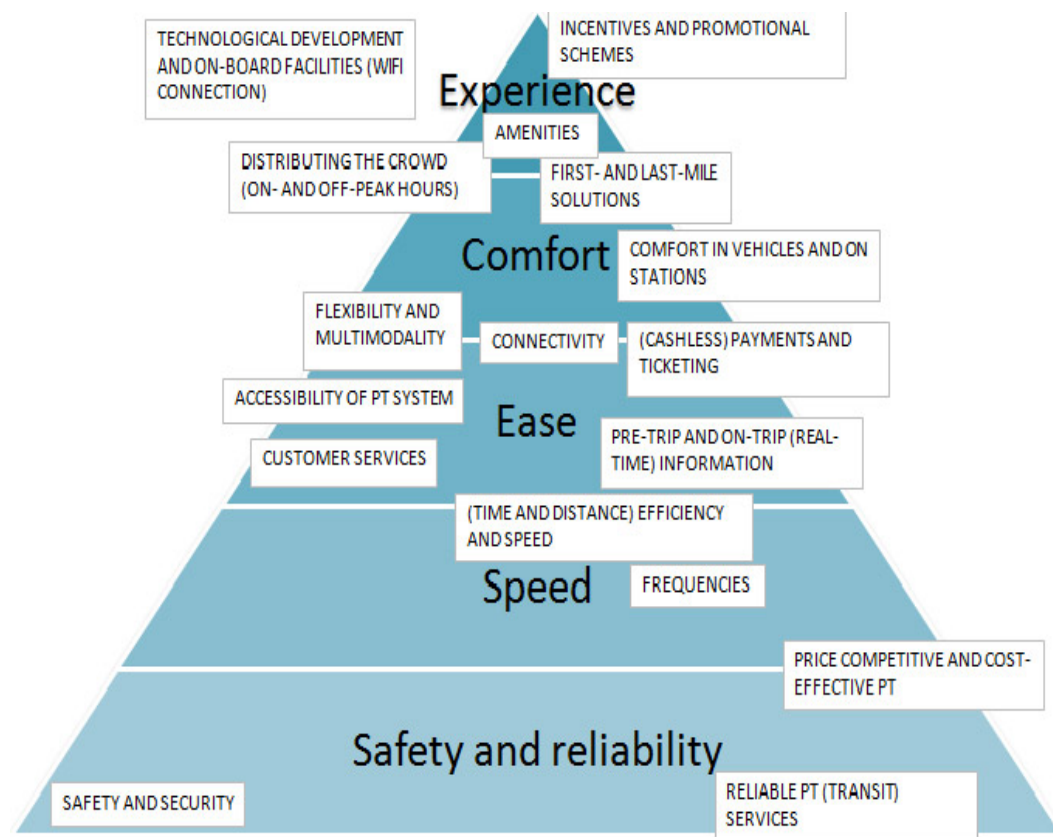


Рисунок 1 – Піраміда потреб пасажира

Цю піраміду можна описати наступним чином (рухаючись знизу до вершини).

Пасажирський транспорт повинен забезпечувати користувачеві (назви «поверхів»): безпеку та надійність; швидкість; простоту використання; комфорт; позитивний досвід, щоб пасажир мав бажання знову скористатися цим транспортом.

Що саме потрібно пасажиру від транспорту, щоб знову обрати його? Ось «таблички» з назвами на поверхах:

1. Надійні послуги перевезень, які пропонує транспорт.
2. Безпека транспорту та пасажирів.
3. Цінова конкурентоспроможність та економічна ефективність (співвідношення «ціна/якість» послуг).

4. Частота руху.
5. Просторово-часова ефективність та швидкість.
6. Послуги для пасажирів.
7. Інформація перед поїздкою та в процесі подорожі (в реальному часі).
8. Доступність транспортної системи.
9. Безготівкові розрахунки та продаж квитків.
10. Колективність системи транспорту (здатність зв'язуватися з іншими системами або ж бути зв'язаною з іншими системами).
11. Гнучкість та мультимодальність.
12. Рішення проблем «першої та останньої милі».
13. Зручності.
14. Уникнення скупчень пасажирів (в пікові години).
15. Схеми стимулювання та пропозиції.
16. Технологічні можливості (Wi-Fi та інші послуги), доступні в поїзді.

Проаналізуємо фактори, що впливають на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень, приведені на рис. 2.

Щодо мультимодальності, варто зазначити, що термін «мультимодальні перевезення» стосується перевезення, яке здійснюється двома або більше видами транспорту під управлінням одного оператора мультимодальних перевезень за єдиним контрактом. Наприклад, це може бути «єдиний квиток» на різні види транспорту з однією ціною.

Мультимодальні пасажирські перевезення пропонують більш гнучку та зручну систему для пасажирів, а для перевізників вони створюють можливість переходу від конкуренції між видами транспорту до співпраці. Це, в свою чергу, призводить до синергетичного ефекту у вигляді підвищення якості транспортних послуг і збільшення доходів перевізників.

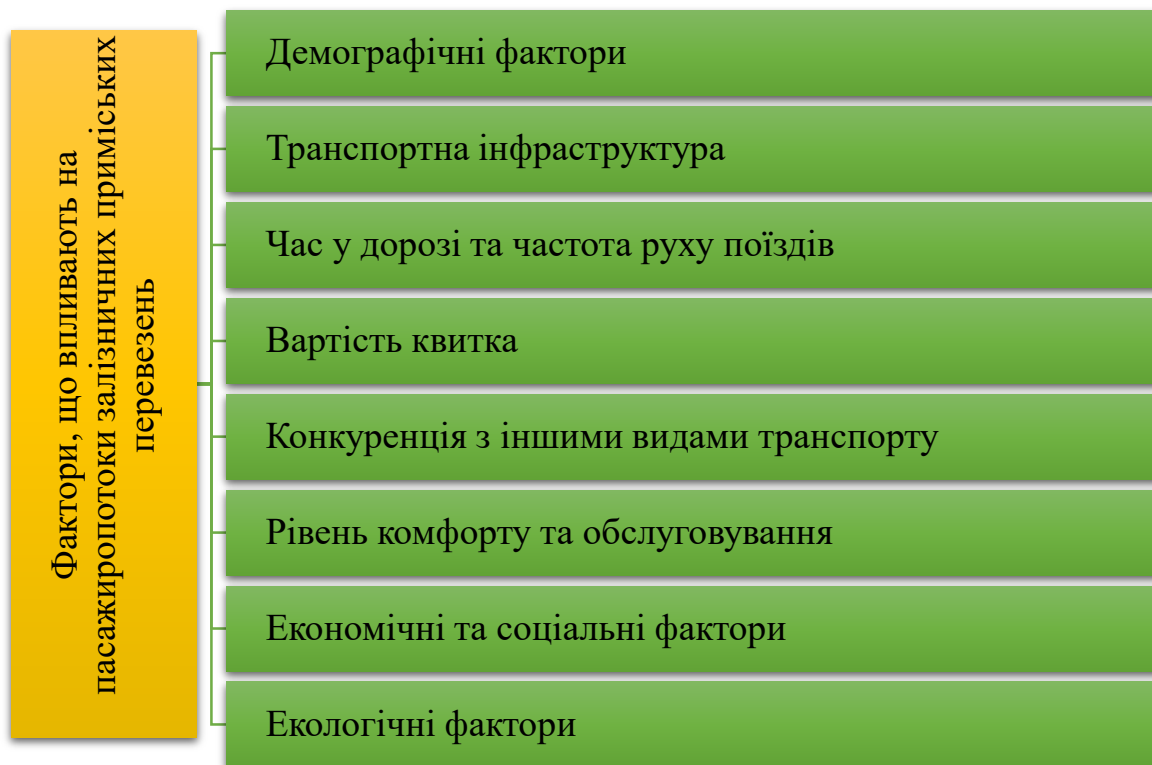


Рисунок 2 – Фактори, що впливають на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень

Демографічні фактори відіграють важливу роль у формуванні пасажиропотоків залізничних приміських перевезень. Вони впливають на кількість потенційних пасажирів, їхню мобільність, частоту користування послугами транспорту та загальний попит на перевезення. Детальний аналіз цих факторів допомагає зрозуміти, як зміни в структурі населення можуть змінювати обсяги та динаміку пасажиропотоків.

Загальна чисельність населення у регіоні обслуговування залізниці є основним чинником, що впливає на попит на приміські перевезення. Чим більше людей проживає в передмістях чи на околицях великих міст, тим більше пасажирів може користуватися приміськими поїздами.

Зростання населення в агломераціях, зокрема через міграцію до міст, збільшує пасажиропотоки, оскільки залізничні перевезення часто

є основним видом транспорту для щоденних поїздок на роботу та навчання.

Висока щільність населення на приміських територіях стимулює попит на громадський транспорт, оскільки особистий автомобільний транспорт може бути менш зручним через завантаженість доріг.

В районах із низькою щільністю населення залізничний транспорт може мати менший попит, оскільки населення може віддавати перевагу індивідуальному транспорту.

Висока частка працездатного населення у віці від 18 до 60 років зазвичай сприяє зростанню пасажиропотоків. Працюючі люди регулярно користуються приміськими поїздами для поїздок на роботу, особливо в години пік. Чим більше працюючих мешканців у передмісті, тим більший попит на регулярні перевезення. Люди, що проживають у передмісті, як правило, зберігають місце роботи в центральних районах міста, що стимулює попит на регулярні поїздки.

Молоді люди, зокрема студенти, часто користуються громадським транспортом, оскільки мають обмежені фінансові ресурси на володіння власним транспортом. Студенти, які проживають у передмістях, але навчаються у великих містах, також збільшують пасажиропотоки в години навчального дня. Старше покоління: зі збільшенням частки осіб похилого віку може змінюватися структура попиту на перевезення. Пенсіонери менш часто користуються транспортом у години пік, проте для них важлива наявність зручного та доступного транспорту для поїздок до медичних закладів, магазинів чи для особистих справ. Для цієї групи населення важливо забезпечити комфортні умови пересування.

За даними Головного управління статистики у Київській області [3], у 2022 році автомобільним транспортом було перевезено 52 258 тисяч пасажирів (рис. 3). На сьогодні разом із приміським залізничним транспортом обсяг перевезених пасажирів, а відповідно і ємність ринку приміських та міських пасажирських перевезень у Києві та Київській області, становить приблизно 104 мільйонів пасажирів на рік. Проте, попит на приміські залізничні перевезення значною мірою залишається неплатоспроможним, оскільки більшу частину пасажирів складають

пенсіонери та інші пільгові категорії громадян. Організація цих перевезень повинна з одного боку максимально відповідати потребам пасажирів, а з іншого – забезпечувати ефективне використання транспортних засобів. Проте на практиці не досягається ні одна, ні інша вимога: кількість приміських поїздів скорочується, умови перевезення залишаються незадовільними, і ці проблеми завдають незручностей як пасажиром, так і перевізникам.

На ринку пасажирських перевезень України двома домінуючими видами транспорту є автомобільний і залізничний, кожен з яких займає своє місце («нішу ринку»), взаємодія яких може приймати вид як конкуренції, так і співпраці.

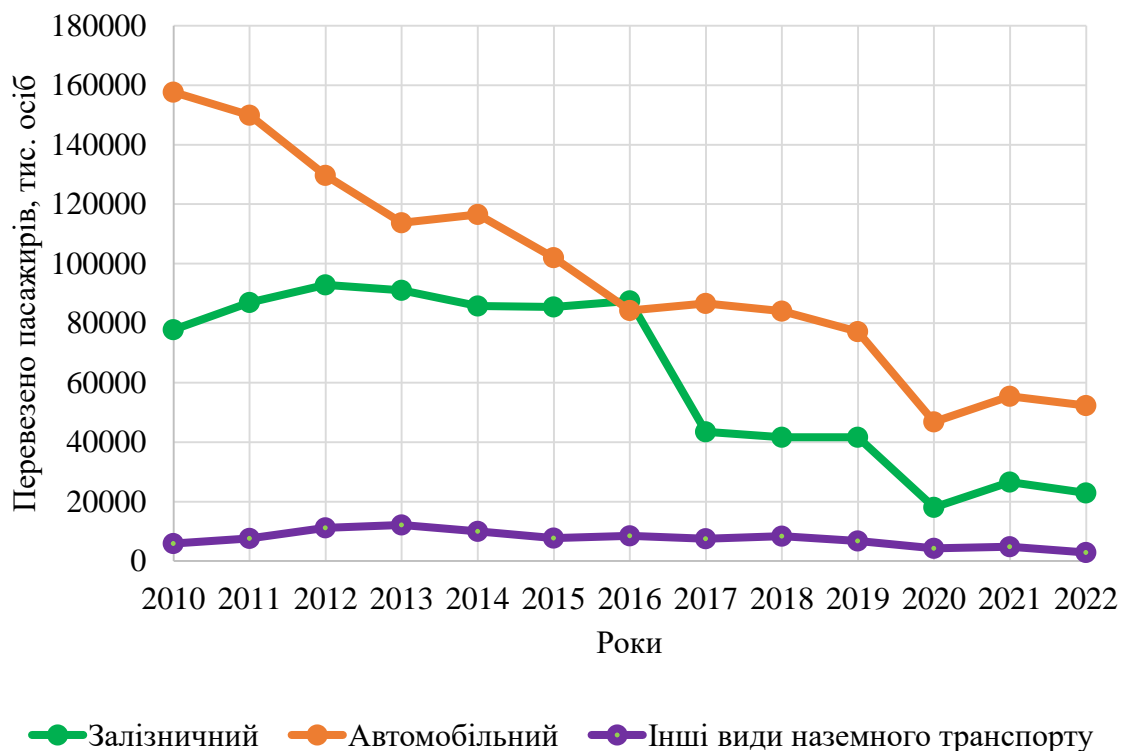


Рисунок 3 – Динаміка перевезень пасажирів різними видами транспорту в межах Київської області за 2010 –2022 роки

Демографічні фактори мають значний вплив на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень, оскільки вони визначають кількість, структуру та мобільність потенційних пасажирів. Зміни в чисельності населення, віковій та сімейній структурі, а також міграційні процеси можуть суттєво змінювати потребу в громадському

транспорті, зокрема в залізничних приміських перевезеннях. Розуміння демографічних тенденцій допомагає транспортним компаніям та органам влади планувати розвиток інфраструктури і послуг, що відповідають потребам населення.

Транспортна інфраструктура є одним із ключових факторів, що безпосередньо впливають на обсяги та динаміку пасажиропотоків у залізничних приміських перевезеннях. Якість та ефективність інфраструктури визначають зручність користування залізничним транспортом, час поїздки, безпеку та комфорт пасажирів.

Стан залізничних колій є одним із визначальних факторів розвитку транспортної інфраструктури. Сучасна, добре обслуговувана інфраструктура забезпечує стабільний і безпечний рух поїздів на високих швидкостях, що сприяє зменшенню часу поїздки. У регіонах, де залізнична інфраструктура застаріла або потребує ремонту, відбуваються часті затримки, що знижує привабливість залізничного транспорту для пасажирів. Чим більша протяжність залізничної мережі і чим більше населених пунктів вона охоплює, тим більше пасажирів мають доступ до цього виду транспорту. Якщо залізничні лінії охоплюють ключові міста і передмістя, це сприяє формуванню стабільних пасажиропотоків.

Наявність комфорту на станціях (зали очікування, платформи для маломобільних груп населення, кіоски, місця для паркування велосипедів і автомобілів) сприяє збільшенню пасажиропотоку. На великих вузлових станціях важливо забезпечити швидкий доступ до платформ через ескалатори, травізатори, ліфти та підземні переходи. Добре освітлені станції з розвиненою системою відеоспостереження і охороною сприяють тому, що пасажирів почуваються захищеними і частіше користуються цим видом транспорту, особливо в нічний час.

У великих агломераціях, де більшість людей здійснюють щоденні поїздки на роботу або навчання, невеликі інтервали між поїздами є вирішальним фактором для залучення пасажирів. Приміські поїзди, що курсують рідко або мають нерегулярний графік, можуть не задовольняти потреби пасажирів, що призводить до зниження пасажиропотоків.

Стан рухомого складу має безпосередній вплив на безпеку пасажирів і зниження ризику аварій. Якщо поїзди є застарілими, часто ламаються або не відповідають стандартам безпеки, це може призводити до відтоку пасажирів. А модернізовані та комфортні поїзди, що оснащені кондиціонерами, бездротовим інтернетом, зручними сидіннями та місцями для багажу, навпаки, сприяють привабливості залізничних перевезень. Комфорт під час поїздки, особливо для пасажирів, що здійснюють щоденні поїздки на великі відстані, є важливим фактором, який стимулює вибір залізниці як основного виду транспорту.

Впровадження єдиних квиткових систем, що дозволяють пасажирам користуватися декількома видами транспорту за одним квитком, стимулює попит на залізничні приміські перевезення, роблячи їх частиною інтегрованої транспортної мережі. Сучасні системи продажу квитків через мобільні додатки, термінали або інтернет спрощують процес купівлі квитків, роблячи його швидким і зручним. Це зменшує черги на станціях і дозволяє пасажирам планувати свої поїздки заздалегідь.

Інформаційні системи: Наявність електронних табло з розкладом руху поїздів, мобільних додатків з інформацією про затримки або зміни в розкладі робить користування залізничним транспортом більш зручним. Сучасні інформаційні системи підвищують прозорість роботи залізниці та збільшують довіру пасажирів.

Інтеграція різних видів транспорту забезпечує зручне і швидке пересування, що збільшує пасажиропотоки. Пасажири можуть вибрати комбінований маршрут, де частину шляху долають поїздом, а частину – автобусом чи іншим видом транспорту. Такі інфраструктурні об'єкти як транспортні хаби, забезпечують ефективне пересування пасажирів між різними видами транспорту, включаючи залізничні приміські перевезення. Вони є ключовими вузлами, де інтегруються різні транспортні засоби: залізниця, автобуси, метро, трамваї, автомобільний транспорт і навіть велосипедний. Транспортні хаби суттєво впливають на пасажиропотоки, сприяючи їхньому зростанню та покращенню якості послуг. Забезпечують ефективну взаємодію

кількох транспортних систем та скорочують час пересадок, що робить подорожі більш комфортними і швидкими.

Станції, що є частиною великих транспортних вузлів, де можна пересісти на автобуси, метро, трамваї, підвищують привабливість залізниці для пасажирів. У хабах розміщуються послуги для комфорту пасажирів: інформаційні табло, кафе, магазини, банкомати, термінали для продажу квитків, зони очікування тощо.

Транспортні хаби оптимізують пересадки, що скорочує час подорожі для пасажирів. Завдяки добре організованим пересадкам можна значно зменшити затримки та очікування. Хаби дозволяють розподіляти транспортні потоки, зменшуючи навантаження на центральні райони міст. Це сприяє покращенню транспортної ситуації, зменшенню заторів та загальної екологічної ситуації. Транспортні хаби дозволяють оптимізувати транспортні маршрути, забезпечуючи більш прямі й ефективні сполучення між приміськими районами і центрами великих міст, часто пропонують додаткові послуги (зали очікування, Wi-Fi, термінали для купівлі квитків), що робить поїздки приємнішими та комфортнішими. Це підвищує швидкість обслуговування і збільшує привабливість приміських поїздів. Транспортний хаб однієї із країн Європи представлений на рис. 4.



Рисунок 4 – Транспортний хаб однієї із країн Європи (Центральний вокзал в Амстердамі)

Центральний вокзал в Амстердамі – це один із найбільших транспортних хабів Європи, де поєднуються міжнародні та національні

залізничні лінії, міські трамваї, автобуси, метро та навіть пороми. Така інтеграція різних видів транспорту забезпечує безперебійне пересування пасажирів.

Транспортні хаби є важливими інфраструктурними елементами, що сприяють ефективному переміщенню пасажирів і забезпечують інтеграцію різних видів транспорту. Вони дозволяють оптимізувати пересадки, покращують комфорт та зручність користування залізничними приміськими перевезеннями та сприяють зростанню пасажиропотоків. Інвестиції у розвиток сучасних хабів дозволяють покращити транспортну інфраструктуру і зробити міста більш доступними для мешканців передмість.

Ще одним важливим фактором розвитку приміського залізничного транспорту, який поки що не отримав належної уваги, є розвиток приміської забудови. Розвиток сучасних житлових комплексів у передмісті великих міст є природним результатом економічного зростання. На цей процес впливають численні фактори, серед яких можна виділити як позитивні (створення екологічно чистих житлових зон, зниження транспортного навантаження на місто тощо), так і негативні сторони «субурбанізації» (за аналогією з урбанізацією), такі як підвищене навантаження на природні ресурси і зміна традиційного використання земельних ділянок. Це створює необхідність ретельного планування розвитку міських агломерацій, що включає розміщення нових житлових об'єктів і приміської транспортної інфраструктури [1].

Планування приміських територій має враховувати актуальні тенденції розвитку забудови та відслідковувати їх динаміку. Основні тенденції розвитку ринку котеджної нерухомості включають збільшення кількості та масштабності котеджних містечок, розширення освоєних територій навколо Києва, зростання пропозицій в сегменті економ-класу, а також підвищення вимог до якості інфраструктури та транспортної доступності. Активний розвиток цього ринку частково зумовлений зростанням цін на квартири у Києві. Однак, щоб забезпечити ефективне функціонування котеджних містечок, необхідно приділяти особливу увагу транспортній інфраструктурі. Адже комфорт життя за містом може бути зіпсований тривалими

заторами або затримками на дорозі. В цьому контексті залізничний транспорт виступає оптимальним рішенням завдяки таким характеристикам, як безпека, швидкість, комфорт та доступність вартості послуг.

Якщо розглянути карту розташування котеджних містечок і залізничних ліній, стає очевидним, що більшість містечок розташовані вздовж залізниць Київ-Обухів, Київ-Васильків та Київ-Ірпінь. Це відкриває можливості для підвищення якості приміських залізничних перевезень без необхідності будівництва нових колій.

Розвиток і якість транспортної інфраструктури мають безпосередній вплив на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень. Сучасна, добре організована інфраструктура, що забезпечує комфорт, безпеку та зручність пасажирів, сприяє збільшенню кількості користувачів залізничного транспорту. Важливими аспектами є не лише стан залізничних колій і рухомого складу, а й зручність пересадок, інтеграція з іншими видами транспорту та впровадження новітніх технологій.

Час у дорозі, час очікування пасажирів та частота руху поїздів є одними із найважливіших критеріїв при виборі транспорту для поїздок у передмістя [4]. Люди завжди прагнуть мінімізувати час, витрачений на переміщення між роботою, домом, навчанням або іншими важливими місцями. У цьому контексті залізничні перевезення можуть бути більш привабливими порівняно з іншими видами транспорту, особливо у випадках, коли залізничні маршрути пропонують коротший час у дорозі. Завдяки прямим маршрутам, відсутності заторів на дорогах та вищій швидкості руху поїздів, залізничні перевезення можуть забезпечувати швидший спосіб дістатися до пункту призначення порівняно з автомобільним транспортом. Час у дорозі та частота руху поїздів суттєво впливають на вибір виду транспорту, оскільки безпосередньо пов'язані з комфортом, зручністю та ефективністю подорожі. Для багатьох пасажирів важливо мати можливість вибору зручного часу поїздки та мінімізації часу очікування на станції. Висока частота поїздів робить транспортну систему більш гнучкою та зручною для пасажирів. Чим менший

інтервал між поїздами, тим зручніше пасажиром планувати свої поїздки. Якщо поїзди курсують регулярно, з певним тактом (тактовий рух), пасажир може бути менш залежним від точного розкладу і не перейматися через запізнення.

Особливо важливо забезпечити високу частоту руху поїздів в години пік (ранковий і вечірній час), коли найбільша кількість людей користується транспортом для поїздок на роботу або навчання. Недостатня кількість поїздів у ці періоди може призводити до переповнених вагонів, що знижує комфорт поїздок і може зменшити пасажиропотік [6].

Важливим аспектом є синхронізація частоти руху поїздів із розкладом інших видів транспорту (метро, автобуси, трамваї), щоб пасажир міг зручно пересідати без довгого очікування. Це не тільки сприяє збільшенню пасажиропотоку, але й робить залізничні перевезення важливою частиною загальної транспортної системи. Для забезпечення високої частоти руху поїздів потрібні значні інвестиції в закупівлю рухомого складу, обслуговування колій та інфраструктури, а також в оплату праці персоналу. Щоб частота руху поїздів була ефективною, необхідно точне планування графіку, яке враховуватиме час пікових навантажень і потреби пасажирів у різний час доби.

Однією з характерних рис приміських пасажирських перевезень є високий рівень невизначеності та коливання пасажиропотоків, що ускладнює ефективне функціонування системи приміських перевезень [5]. Сучасна організація приміських пасажирських перевезень на залізницях України потребує впровадження системи, здатної адаптувати існуючу технологію до змін на транспортному ринку, з урахуванням специфіки приміських перевезень, зокрема їхньої нерівномірності. Для них характерні виражена сезонна, добова та погодинна нерівномірність пасажиропотоків. Крім того, спостерігається чітка нерівномірність за напрямками, де найбільші потоки зосереджені на маршрутах, що ведуть до великих транспортних вузлів, дачних районів та місць відпочинку.

Також відомо, що для приміських перевезень характерні два пікових періоди пасажиропотоків – ранішній (у бік м. Києва) та

вечірній (виїзд з Києва). На ці періоди припадає близько 90 % всього пасажиропотоку (за напрямками). Саме в такі періоди залізниця може використовувати свою найбільшу технологічну перевагу – забезпечення великої провізної спроможності разом із надійністю сполучень [6]. Для встановлення параметрів накопичення попиту у ранковий період встановлено розподіл пасажиропотоку та накопичення пасажиропотоку, що наведено на рис. 5.

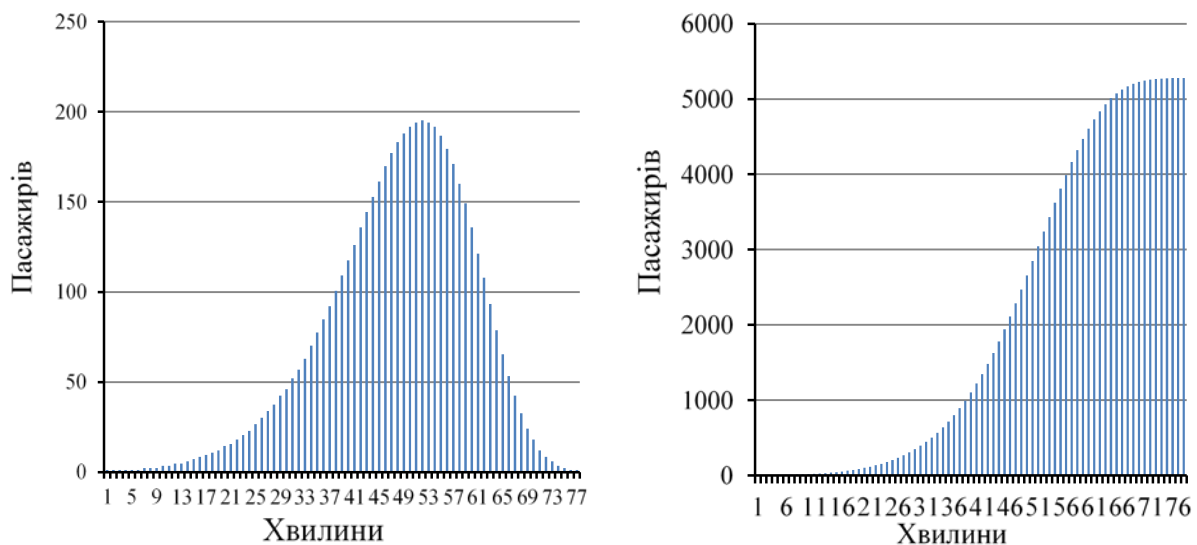


Рисунок 5 – Розподіл пасажирів та щільність накопичення по станції Ірпінь (використано розподіл Вейбула) у ранковий період

Орієнтовна тривалість накопичення попиту складає 75 хв, причому половина потоку накопичується на станціях відправлення за 37 хв.

У вечірній час накопичення попиту підпорядковуються також розподілу Вейбула, але з іншими параметрами, що наведено на рис. 6.

Орієнтовна тривалість накопичення попиту у вечері складає 250 хв, при чому перша половина потоку накопичується до 35 хв, друга половина – за 215 хв.

У передвихідні дні значно зростає кількість пасажирів, які подорожують у вечірні години, що пов'язано з їхніми поїздками до приміських зон для відпочинку та на дачі. У вихідні дні найбільше пасажирів відправляється вранці, а ввечері на головну станцію прибуває велика частина приміського пасажиропотоку. Нерівномірність приміських пасажирських потоків істотно впливає на

необхідну пропускну здатність приміських ділянок, кількість приміських поїздів і потребу в рухомому складі. Тому при подальших розрахунках слід враховувати сезонну, середньотижневу та середньодобову нерівномірність.

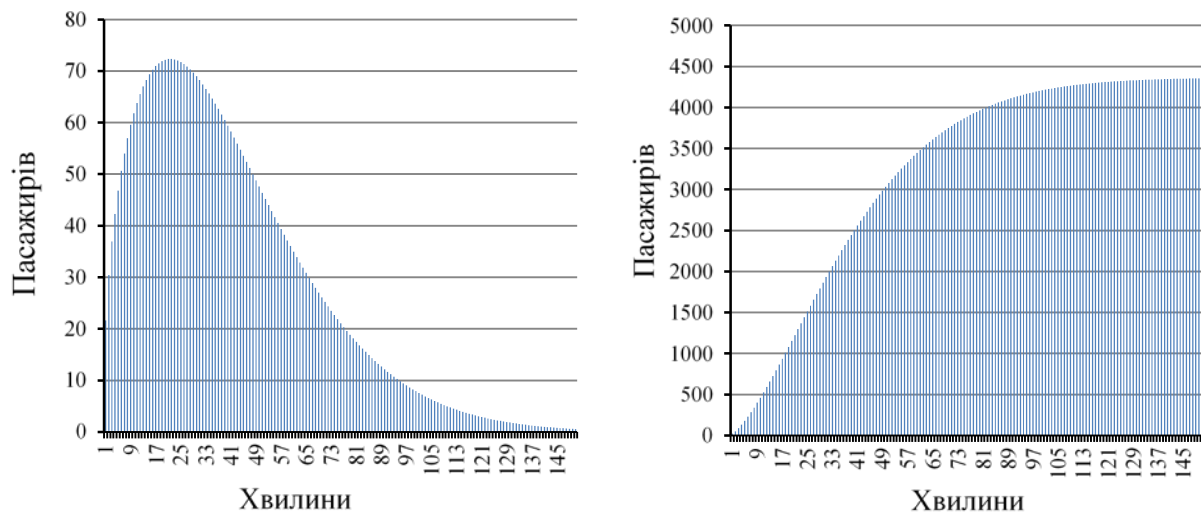


Рисунок 6 – Розподіл пасажирів та щільність накопичення по станції Ірпінь (використано розподіл Вейбула) у вечірній період

Через середньотижневу нерівномірність приміських пасажиропотоків розрахунковими днями приймаються будні та вихідні, враховуючи зростання пасажиропотоків у будні дні та їх зниження на вихідні, окремо для літнього і зимового періодів.

Результати дослідження погодинних коливань приміських пасажиропотоків, що прибувають на головну станцію, встановлених натурно-аналітичним методом були проведені протягом 2021 року та представлені на рис. 7.

Зазначені закономірності приміських перевезень характерні для всіх великих залізничних вузлів, проте особливо яскраво це демонструє графік коливання пасажиропотоку на станції Київ-Пасажирський у Київському залізничному вузлі (рис. 7), який був побудований на основі натурно-аналітичного методу.

Особливу увагу слід приділити погодинній нерівномірності пасажиропотоку протягом доби, що є характерною саме для приміських перевезень. На станції Київ-Пасажирський у напрямку

Фастова було проведено дослідження, яке вивчало формування цієї нерівномірності відповідно до розкладу руху приміських поїздів. Результати дослідження, що відображають погодинний розподіл пасажиропотоку у відносних показниках (порівняно з кількістю сидячих місць у вагонах), за середніми даними жовтня, наведені на рис. 8.

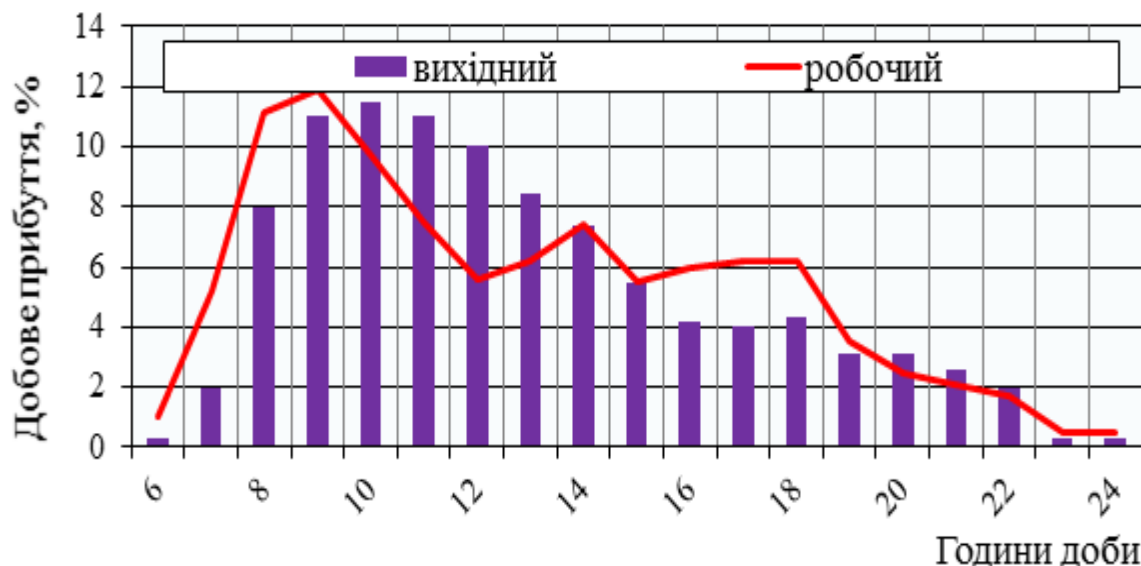


Рисунок 7 – Результати дослідження погодинних коливань приміських пасажиропотоків, що прибувають на головну станцію, встановлених натурно-аналітичним методом

Графік динаміки коливання пасажиропотоку представлений у вигляді діаграми на рис. 8.

Результати дослідження погодинного коливання приміського пасажиропотоку дозволили виявити значну нерівномірність у його розподілі протягом доби. Ця нерівномірність є особливо вираженою в ранкові та вечірні пікові години, коли обсяги перевезень значно перевищують можливості забезпечення комфортних умов проїзду в приміських електропоїздах.

Аналіз погодинного розподілу пасажиропотоку за прибуттям на головну станцію (рис. 8) показав, що найінтенсивніший період перевезень триває з 5 год ранку до 9 год ранку, на який припадає 45% добового пасажиропотоку. Від 9 год ранку до 13 год спостерігається поступове зниження, і частка пасажиропотоку складає 21 % добового

прибуття. Від 13 год до 20 год знову спостерігається зростання інтенсивності перевезень, і частка пасажиропотоку цього періоду становить 34% добового обсягу. Від 22 год до 5 год ранку приміські поїзди не курсують [5].

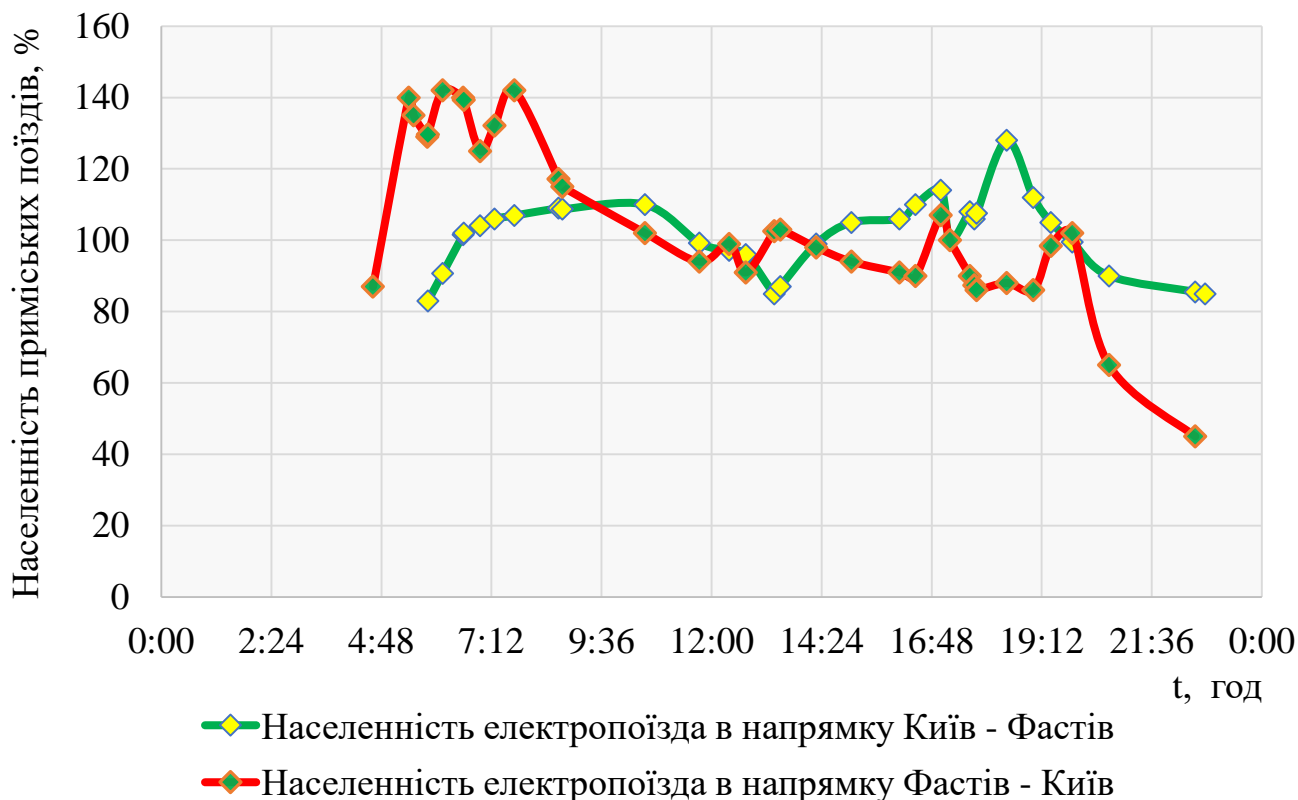


Рисунок 8 – Результати дослідження динаміки погодинного коливання приміського пасажиропотоку у напрямку Київ-Пасажи́рський – Фастів

Дослідження погодинного розподілу пасажиропотоку на відправлення з головної станції у Фастівському напрямку показали, що динаміка має зворотній характер порівняно з прибуттям. Найбільший обсяг пасажирських перевезень припадає на період з 15 год до 19 год, коли 50% добового потоку відправляється зі станції Київ-Пасажи́рський. Ранкове збільшення інтенсивності спостерігається з 6 год до 10 год, досягаючи піку між 7 год та 9 год, і складає 30% добового відправлення. Від 9 год до 13 год кількість пасажирів знижується до 85% від максимальних значень, після чого, з 13 год до 15 год,

відбувається поступове збільшення, яке охоплює 20% добового пасажиропотоку. Частка пасажиропотоку вечірнього пікового періоду з 15 год до 19 год складає 50 % добового відправлення.

Під час пікових годин кількість пасажирів у поїздах на 30 – 40% перевищує номінальну пасажиромісткість, що створює некомфортні умови поїздки. Тому для оцінки умов перевезень у приміських поїздах слід користуватися саме відносними величинами їх населеності [6].

Також у рамках функціонування станції Київ-Пасажирський у Фастівському напрямку було проведено дослідження нерівномірності приміського пасажиропотоку відповідно до розкладу руху приміських поїздів за вересень 2021 року, з розподілом за днями тижня. Результати дослідження представлені у вигляді графіків динаміки коливань приміських пасажиропотоків на рис. 9 та рис. 10.

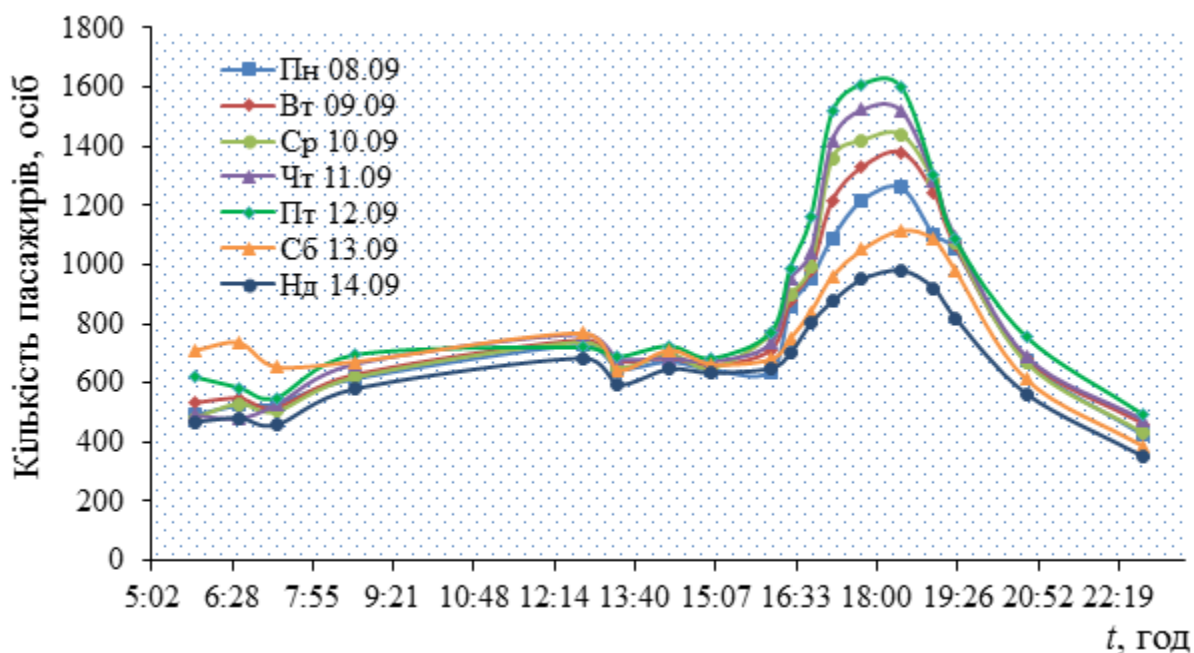


Рисунок 9 – Результати дослідження динаміки відправлення пасажирів у приміському сполученні згідно з розкладом станції Київ-Пасажирський у Фастівському напрямку

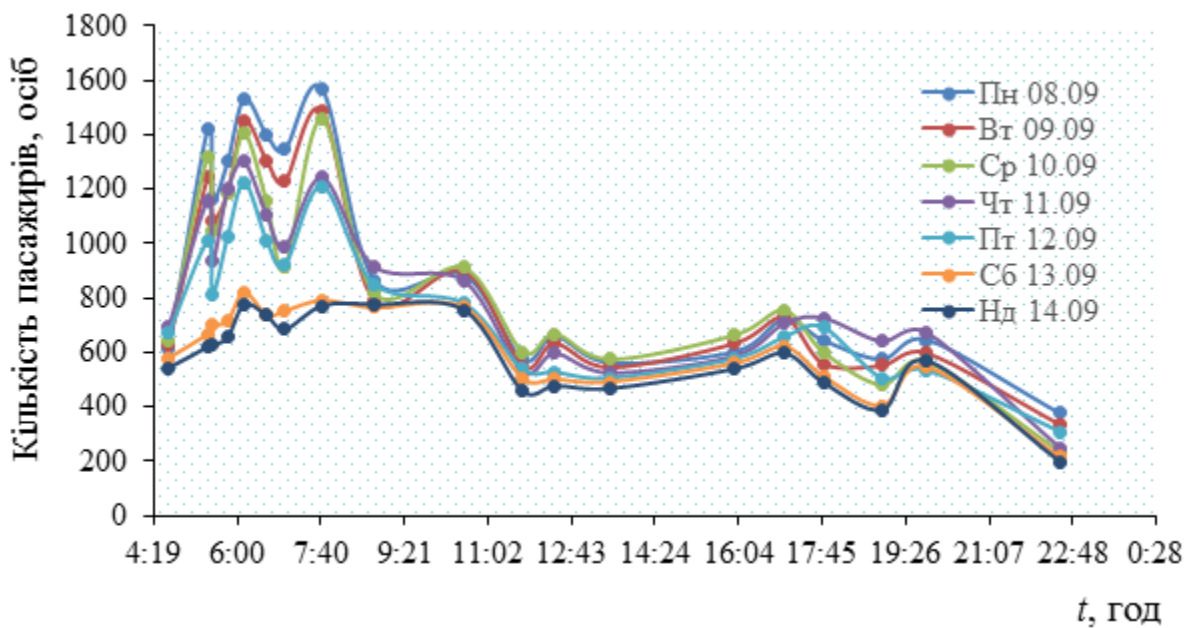


Рисунок 10 – Результати дослідження динаміки прибуття пасажирів в приміському сполученні згідно з розкладом станції Київ-Пасажирський у Фастівському напрямку

Отримані дані про нерівномірність відправлення і прибуття пасажирів можуть бути використані для оптимізації розкладу приміських поїздів організації та роботи кас, оскільки ці параметри залежать від обсягу пасажиропотоку в різні сезони, дні тижня та часу (періоду) доби. Якщо кількість відправлень перевищує реальну потребу, виникає надлишок вільних місць у місцях, що призводить до неефективних витрат. Для уникнення перенаселеності поїздів або їх використання з незаповненими місцями важливо відстежувати коливання пасажиропотоку та коригувати розміри руху на основі статистичних даних і розрахункових даних з поправкою на поточну ситуацію, забезпечуючи задані розміри руху поїздів [5].

Нерівномірний розподіл перевезень створює труднощі для залізниці, ускладнюючи процес організації перевезень і виконання завдань з повного задоволення потреб населення. Це вимагає наявності великих резервів рухомого складу, додаткових трудових ресурсів та пропускної здатності станцій вокзалів та перегонів для освоєння максимальних (пікових) обсягів перевезень.

Час у дорозі та частота руху поїздів є вирішальними факторами, що впливають на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень. Вони визначають привабливість цього виду транспорту для користувачів, впливають на комфорт та ефективність пересування, а також забезпечують гнучкість вибору часу поїздки. Оптимізація часу в дорозі та забезпечення регулярного руху поїздів можуть значно підвищити кількість пасажирів і загальну якість обслуговування.

Вартість квитка також впливає на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень. Ціна проїзду визначає доступність залізничного транспорту для різних категорій населення та формує попит на послуги. Вартість квитка тісно пов'язана з економічною ситуацією, рівнем доходів населення, а також конкурентоспроможністю залізниці порівняно з іншими видами транспорту [7].

Вартість квитка є вирішальним критерієм для багатьох пасажирів при виборі виду транспорту. Для більшості пасажирів важливо, щоб ціна проїзду не перевищувала їхніх фінансових можливостей. Занадто висока вартість квитка може відштовхнути значну частину населення, особливо тих, хто користується приміськими перевезеннями щодня. Якщо вартість квитка знижується або залишається на низькому рівні порівняно з альтернативними видами транспорту, це стимулює збільшення пасажиропотоку. Пасажири частіше обирають залізницю як дешевший варіант пересування, особливо у випадках, коли регулярні поїздки на автомобілі або автобусі є дорожчими.

Зростання вартості квитка, навпаки, може призвести до зменшення пасажиропотоку, особливо серед людей з низькими доходами або тих, хто регулярно користується залізницею для поїздок на роботу чи навчання. Подорожчання може змусити пасажирів шукати інші, дешевші альтернативи, такі як спільні поїздки автомобілем (BlaBlaCar), маршрутні таксі або автобуси.

У багатьох країнах вартість приміських перевезень регулюється державою. Тарифи можуть бути субсидованими, щоб зробити транспорт доступнішим для населення. Це особливо актуально для приміських маршрутів, які обслуговують пільгові категорії населення.

Державна підтримка допомагає компенсувати частину витрат на утримання інфраструктури та операційні витрати. У випадку відсутності субсидій вартість квитка може значно зрости, що призведе до зниження попиту.

Субсидії мають особливе значення у контексті приміських перевезень, оскільки цей вид транспорту часто використовується соціально вразливими категоріями населення (пенсіонери, студенти, працівники з невисокими доходами). Наявність доступних за ціною приміських перевезень допомагає забезпечити мобільність та доступ до робочих місць, навчальних закладів і медичних послуг.

Окрім субсидій, важливу роль відіграє гнучкість ціноутворення [8]. Це може бути: тарифи на різні класи обслуговування; пропозиція квитків різних класів (економ, бізнес) дозволяє залучати пасажирів із різним рівнем доходу. Це також створює можливості для диференціації послуг, де пасажир може обирати між базовим або більш комфортним варіантом за вищу ціну.

Вартість квитка є важливим фактором, що безпосередньо впливає на пасажиропотоки приміських залізничних перевезень. Її правильне регулювання дозволяє забезпечити доступність залізниці для населення, підтримати стабільність пасажиропотоків та конкурувати з іншими видами транспорту. Ефективне ціноутворення та державна підтримка приміських перевезень можуть забезпечити їхню сталу роботу та розвиток.

Усі ці елементи дозволять комплексно аналізувати фактори, що впливають на пасажиропотоки залізничних приміських перевезень, та представляти їх у візуально доступній формі.

II. ВПЛИВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ НА ОРГАНІЗАЦІЮ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У ПРИМІСЬКОМУ ЗАЛІЗНИЧНОМУ СПОЛУЧЕННІ

Організація пасажиропотоків у приміському залізничному сполученні є важливою складовою ефективної роботи транспортної системи. Вона безпосередньо залежить від якості та розвитку

транспортної інфраструктури, а також від впровадження сучасних технологій, що забезпечують комфортні умови для пасажирів і високу ефективність перевезень.

Сучасні тенденції в транспортній галузі орієнтовані на впровадження інноваційних рішень, спрямованих на оптимізацію пасажиропотоків. До таких рішень належать автоматизація процесів, впровадження систем управління пасажирським рухом та інтелектуальних систем відстеження поїздів, що дозволяють швидко реагувати на зміни у пасажирському попиті.

Транспортна інфраструктура в цьому контексті є базовим елементом, оскільки вона визначає можливості та обмеження для організації пасажиропотоків. Шляхи сполучення, залізничні станції, транспортно-пересадочні вузли та рухомий склад є ключовими факторами, що впливають на пропускну спроможність транспортної системи та зручність для пасажирів. Водночас рівень розвитку інфраструктури безпосередньо впливає на час подорожі, регулярність руху та доступність транспорту для різних категорій населення [9].

Нині транспортна інфраструктура країни потребує реконструкції та реформування, що передбачає модернізацію транспортно-пересадочних вузлів (ТПВ), вокзалів та рухомого складу, а також необхідність значних інвестицій у технічну та технологічну складові пасажирських перевезень.

Аналізуючи вплив транспортної інфраструктури, важливо враховувати технологічні зміни, які відбуваються у галузі. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології дозволяють не лише покращити управління пасажиропотоками, а й підвищити рівень безпеки та комфорту під час подорожі. Транспортна інфраструктура забезпечує взаємодію між різними видами транспорту, дозволяє ефективно керувати транспортними потоками, а також створює умови для розвитку логістики та перевезень. Функціонування всіх видів транспорту спрямоване на задоволення потреб регіонів країни, тому збільшення пасажиропотоків на залізничному транспорті вимагає впровадження комплексних транспортних послуг із відповідним рівнем сервісу [10].

Розвиток транспортної інфраструктури та впровадження сучасних технологій є ключовими чинниками для підвищення ефективності роботи приміського залізничного транспорту та забезпечення стабільного зростання пасажиропотоків, що забезпечують ефективність організації пасажиропотоків у приміському залізничному сполученні. В сучасних умовах зростання мобільності населення питання оптимізації транспортних процесів набуває особливої актуальності. Вдосконалення інфраструктурних об'єктів і застосування інноваційних технологічних рішень не тільки підвищує підвищення якості транспортних послуг, а й впливає на зручність, швидкість та безпеку перевезення пасажирів [11, 12].

З огляду на накопичений досвід вітчизняних та закордонних залізниць, саме у сфері регіональних і приміських залізничних перевезень може виникати серйозна конкуренція між перевізниками різних форм власності: державної, приватної та змішаної. Для того, щоб майбутні залізничні компанії, які займаються приміськими перевезеннями, могли залишитися конкурентоспроможними, важливо проводити дослідження щодо розробки впливу технологій та організаційних рішень на обсяги перевезень в умовах конкуренції, а також методи їх реалізації [12].

Приміське залізничне сполучення є важливою частиною міської та міжміської транспортної системи, яка забезпечує переміщення мільйонів пасажирів щоденно. Головна проблема полягає у забезпеченні швидкого, зручного та безпечного транспортування пасажирів у години пік, коли навантаження на інфраструктуру досягає максимуму.

Одним із ключових факторів є ефективне використання пасажирського рухомого складу, а також підвищення рівня комфорту та зручностей для пасажирів.

Пропускна здатність інфраструктури також має суттєвий вплив на технологію та організацію пасажиропотоків у приміському залізничному сполученні. Залізничні колії – це основний елемент інфраструктури, що визначає, скільки поїздів може курсувати одночасно на певній ділянці. Пропускна здатність залізничних колій,

станцій та вокзалів визначає максимальну кількість пасажирів, яку може обслуговувати система протягом певного часу. Недостатня пропускна здатність призводить до затримок, збільшення інтервалів між поїздами, скупчення пасажирів на станціях та платформах.

Однією з проблем залізничної інфраструктури є недостатня кількість колій на певних ділянках. Рішенням може бути додаткове будівництво паралельних колій або підвищення автоматизації руху поїздів для збільшення пропускної здатності.

Наприклад: у Великій Британії реалізується проект High Speed 2 (HS2), що передбачає будівництво нових швидкісних залізничних ліній. Це дозволить зняти частину навантаження з основних залізничних магістралей і значно скоротити час пересування між великими містами.

Модернізація станцій може значно підвищити пропускну здатність. Наприклад, будівництво нових платформ або подовження існуючих дозволить одночасно обслуговувати більше пасажирів.

Транспортно-пересадочні вузли та хаби займають важливе місце в раціональній організації пасажиропотоків та мають суттєвий вплив на технологію та організацію пасажиропотоків у приміському залізничному сполученні.

Транспортні хаби (вузли) – це місця, де пересаджуються пасажирів з одного виду транспорту на інший. Їх роль у формуванні пасажиропотоків полягає в забезпеченні зручності пересадок, що скорочує час на пересування та підвищує ефективність системи загалом. Наприклад, транспортно-пересадочні вузли можуть об'єднувати залізничні, автобусні та трамвайні лінії, що забезпечує більшу гнучкість пасажирів у виборі маршруту. Такі вузли значно полегшують організацію пасажиропотоків, адже пасажирів мають можливість швидко переміщуватися між різними маршрутами.

Наприклад: Хаб Чаталлет-ле-Аль у Парижі об'єднує лінії приміських поїздів RER, метро та автобусні маршрути. Це дозволяє легко пересуватися по місту, знижуючи навантаження на дорожню мережу.

Інтеграція залізничного транспорту з іншими видами транспорту (автобуси, метро, велосипедні доріжки) сприяє кращій організації пасажиропотоків. Розробка спільних пересадкових станцій, координація розкладів і спрощення пересадок роблять користування громадським транспортом привабливішим і зручнішим. Відень створив інтегровану транспортну систему, де приміські поїзди, метро та трамваї працюють в єдиній мережі з єдиною системою оплати. Це значно полегшило переміщення пасажирів по місту та з передмість.

Інформаційні технології мають значний вплив на організацію пасажиропотоків у приміському сполученні, допомагаючи підвищити ефективність перевезень, поліпшити якість обслуговування пасажирів та оптимізувати управління транспортною інфраструктурою. Основними напрямками впливу інформаційних технологій на організацію пасажиропотоків є: автоматизація та управління розкладом руху поїздів, моніторинг та аналітика пасажиропотоків, оптимізація маршрутів та інфраструктури та інше.

Автоматизація та управління розкладом руху поїздів (Traffic Management Systems, TMS) дозволяють оптимізувати маршрути та розклад руху поїздів на основі реальних даних про потоки пасажирів, ситуацію на коліях і погодні умови. Це сприяє зниженню затримок і зростанню ефективності використання інфраструктури.

Інтелектуальні транспортні системи (ITS) використовують аналіз даних для прогнозування пікових навантажень та коригування розкладу у реальному часі [13]. Стратегію регулювання руху поїздів і пасажиропотоку та підхід до оптимізації в режимі реального часу розроблено завдяки інформаційним технологіям на основі ітераційного нелінійного програмування (INP) у поєднанні з релаксацією Лагранжа (LR) у рамках рухомого горизонту (RH) [14]. Реалістичні тематичні дослідження показують, що запропонований підхід може зменшити відхилення поїзда від початкового розкладу, час очікування пасажирів і ризик накопичення пасажирів на платформі приблизно на 84,92 %, 30,34 % і 61,42 % у порівнянні із загальним правилом. Крім того, час обчислення для реалістичного великомасштабного експерименту є прийнятним для реалізації в реальному часі [14].

Сучасні системи автоматизації, такі як European Rail Traffic Management System (ERTMS) та Automatic Train Operation (ATO), дозволяють значно підвищити ефективність управління залізничним рухом, мінімізуючи людський фактор [15]. ERTMS – це система управління рухом поїздів, що дозволяє автоматизувати сигналізацію, зменшувати інтервали між поїздами та підвищувати безпеку. Впровадження ERTMS на швидкісних лініях дозволило збільшити частоту руху поїздів на лінії Париж – Ліон, що значно знизило затримки та підвищило пропускну здатність. Автоматичне регулювання інтервалів між поїздами дозволяє уникнути затримок і скупчення пасажирів на платформах.

Автоматизація систем управління поїздами (TMS) і використання інтелектуальних транспортних систем (ITS) значно оптимізують маршрути, розклади, знижуючи затримки та покращуючи інфраструктурну ефективність. Завдяки впровадженню інформаційних технологій, використанню різноманітних методів прогнозування досягнуто значного скорочення відхилень у розкладі та часі очікування пасажирів.

Ці інновації доповнюються впровадженням електронних квиткових систем, що дозволяють пасажирам легко бронювати квитки онлайн. Це зменшує черги та сприяє оптимізації пасажиропотоку, особливо у пікові періоди, що забезпечує ще більшу ефективність транспортної системи.

Впровадження електронних квитків значно зменшує черги на касах і спрощує процес купівлі квитків. Пасажири можуть купувати квитки заздалегідь через мобільні додатки або термінали самообслуговування. Наприклад, використання системи NFC або QR-кодів дозволяє пасажирам миттєво проходити через турнікети [12]. Ці системи також надають доступ до динамічних тарифів, що дозволяє краще регулювати пасажиропотоки під час пікових періодів. Системи онлайн-бронювання допомагають організаторам транспорту відстежувати поточний попит та коригувати кількість рейсів.

Приклад: Лондонська система Oyster Card дозволяє пасажирам швидко проходити через турнікети, зменшуючи час очікування на

станціях. Це особливо корисно в години пік, коли потоки пасажирів досягають свого максимуму.

Сучасні табло на станціях інформують пасажирів про час прибуття та відправлення поїздів у реальному часі. Це допомагає краще орієнтуватися в розкладі та уникати скупчення на платформах. У багатьох європейських країнах, де поїзди курсують часто, традиційні зали очікування не завжди присутні. Замість цього, пасажирів можуть користуватися лавками, розташованими в головних залах або на платформах. У країнах Східної та Південної Європи зали очікування все ще збереглися на великих станціях, проте вони зазвичай невеликі за площею.

Платформи в Європі зазвичай не мають нумерації, нумеруються лише колії. Платформи поділяються на сектори, кількість яких може варіюватися від двох до шести залежно від країни [16]. Найчастіше використовуються чотири або шість секторів, позначених літерами А, В, С, D, Е, F. Кожен поїзд далекого сполучення зупиняється так, що певні вагони стають у визначені сектори: наприклад, вагони першого класу – у сектори А та В, а вагони другого класу – у сектори С, D та Е.

На Європейських вокзалах зручно та логічно влаштовано і розміщено інформацію про поїзди, що дозволяє без знання мови орієнтуватися у приміщеннях та платформах, на спеціальному табло висвічується номер перону, на якому зупиниться поїзд, ця ж інформація є на квитку (рис. 11). Перед виходом на платформу встановлюють автомати для компостування квитків [17].

Спеціальні діаграми із зазначенням розташування вагонів на платформах дозволяють пасажирів заздалегідь визначити, де зупиниться їхній вагон. Ці діаграми розміщені або на самій платформі, або у будівлі вокзалу. Інформація про відправлення поїздів і номери колій також відображається на табло біля входу на платформу, з переліком основних пунктів маршруту та часу відправлення [16].



Рисунок 11 – Інформаційний дисплей щодо відправлення поїзда на колійних табло

На невеликих станціях у Європі зазвичай не встановлюють торгові кіоски або інші комерційні точки на платформах через короткі зупинки поїздів, які тривають лише 2-3 хвилини. В розвиненіших країнах можна зустріти компактні павільйони для пасажирів, де вони можуть сховатися від негоди. Платформи на станціях середнього та великого розміру, як правило, накриті, а на багатьох великих вокзалах колії та платформи захищені великими куполами або навісами.

На більшості європейських вокзалів відсутні носії та багажні візки. Однак, за потреби можна замовити багажний сервіс. Багато станцій також оснащені транспортерними стрічками для багажу на сходах, а ліфти забезпечують доступ до платформ.

Крім того, сучасні технології, зокрема мобільні додатки, суттєво покращують досвід подорожей залізницею. Завдяки таким додаткам, що відстежують рух поїздів у реальному часі, пасажирів можуть ефективніше планувати свій маршрут, отримувати інформацію про можливі затримки та зручні пересадки, що допомагає уникнути зайвого часу очікування на станціях.

Інформаційні табло та мобільні додатки надають пасажирів актуальну інформацію про розклад, затримки, наявність вільних місць тощо, що дозволяє пасажирів краще планувати свої поїздки.

Геолокаційні сервіси дають змогу відстежувати пересування транспорту в реальному часі, що важливо для пасажирів під час очікування або пересадки.

Приклад: Додаток Deutsche Bahn пропонує пасажирам не лише інформацію про поїзди, але й можливість забронювати місця та отримувати повідомлення про зміни в розкладі.

Системи планування маршрутів дозволяють створювати більш ефективні маршрути з урахуванням пасажиропотоків та завантаженості інфраструктури, що допомагає мінімізувати перевантаження в пікові години та рівномірно розподіляти потоки пасажирів.

Використання віртуальних симуляцій допомагає протестувати різні сценарії організації перевезень перед їх впровадженням на практиці.

Моніторинг та аналітика пасажиропотоків шляхом використання систем відстеження пасажиропотоків на основі мобільних пристроїв та смарт-карт дозволяє операторам транспорту отримувати точні дані про обсяги перевезень та місця, де пасажирів здійснюють посадку та висадку. Це дає змогу краще планувати кількість вагонів та частоту рейсів.

Аналіз великих даних (Big Data) дозволяє виявляти тренди у поведінці пасажирів, прогнозувати пікові години, що сприяє підвищенню ефективності перевезень.

Використання великих даних і штучного інтелекту допомагає прогнозувати пасажиропотоки. Наприклад, аналіз даних з мобільних пристроїв, відеокамер та інших джерел дозволяють аналізувати потоки пасажирів і прогнозувати зміни. Це дає можливість оперативно реагувати на зміну пасажиропотоків, дозволяє розрахувати, коли і де пасажиропотоки досягають піку, що дозволяє оптимізувати розклад і кількість поїздів.

У деяких країнах технології дозволяють динамічно змінювати розклад руху поїздів у відповідь на збільшення чи зменшення пасажиропотоку. Це дає змогу ефективніше використовувати наявні ресурси.

Приклад: У Токіо компанія JR East впровадила систему, яка дозволяє адаптувати графік руху поїздів залежно від поточного пасажиропотоку, що особливо ефективно під час подій або свят, коли обсяги перевезень можуть різко змінюватися.

Контроль навантаження на поїзди: у великих мегаполісах для розподілу пасажиропотоку між різними рейсами використовуються спеціальні системи, що відстежують кількість пасажирів у вагонах і пропонують альтернативні варіанти для тих, хто очікує на платформі.

Приклад: У Сеулі система відстеження заповненості вагонів у реальному часі дозволяє пасажирам через додаток вибрати поїзд із меншою завантаженістю, що сприяє кращому розподілу пасажирів по платформах і вагонах.

Такі технології вже використовуються у багатьох країнах для прогнозування перевантажень та планування розкладів.

Транспортна інфраструктура та сучасні технології є ключовими факторами, що впливають на організацію пасажиропотоків у приміському залізничному сполученні. Їхня взаємодія допомагає забезпечити ефективність системи та її адаптацію до змін. Удосконалення інфраструктури та впровадження нових технологій відкриває нові можливості для покращення пасажирських перевезень у майбутньому.

Організація пасажиропотоків безпосередньо залежить від якості та ефективності транспортної інфраструктури, яка включає залізничні колії, станції, транспортні вузли та технології, що застосовуються для управління рухом і обслуговування пасажирів.

Вплив транспортної інфраструктури та технологій на організацію пасажиропотоків є комплексним і багатофакторним процесом. Розвиток та модернізація інфраструктури, інтеграція сучасних технологій та управління транспортними мережами є ключовими елементами для забезпечення ефективною та надійною транспортною системою приміських залізниць. Застосування інформаційних технологій у приміському транспорті дозволяє покращити ефективність пасажиропотоків, оптимізувати роботу транспорту та покращити обслуговування пасажирів. Інноваційні рішення сприяють

адаптації систем до мінливих умов, забезпечуючи високу якість перевезень та комфорт для пасажирів.

III. ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ПАСАЖИРОПОТОКІВ ПРИ ТРАНСПОРТНОМУ ОБСЛУГОВУВАННІ ВЕЛИКИХ МІСТ

Ефективне функціонування транспортних систем великих міст є одним із ключових чинників забезпечення їх сталого розвитку та високої якості життя мешканців [18]. Зростання урбанізації, підвищення мобільності населення та збільшення кількості транспортних засобів спричиняють ускладнення в організації транспортного обслуговування, що, своєю чергою, впливає на формування пасажиропотоків.

Розглянемо закономірності, що визначають динаміку та структуру пасажиропотоків у міських агломераціях. Аналіз поведінкових, соціальних та інфраструктурних факторів, які впливають на рух пасажирів, дозволяє виявити основні тенденції у формуванні цих потоків. Важливою є також оцінка ролі громадського транспорту та інших транспортних засобів у забезпеченні належної мобільності населення за умов зростаючого попиту на перевезення.

Основною метою дослідження є дослідити механізми формування пасажиропотоків у великих містах, виявити основні фактори, що визначають інтенсивність та напрямки руху пасажирів, і на основі цього запропонувати ефективні стратегії для оптимізації транспортного обслуговування.

В сучасних умовах особливо важливим є розроблення комплексу заходів для визначення оптимальних експлуатаційних параметрів транспортної системи, які підвищують ефективність приміських перевезень. Серед них варто виділити:

- розрахунок необхідної кількості поїздів для обслуговування пасажиропотоку на окремих ділянках;
- організацію руху поїздів з різною частотою, місткістю та кількістю вагонів;

– визначення показників, що оцінюють якість приміських перевезень.

Комфорт під час поїздки значною мірою залежить від умов посадки пасажирів. Для дослідження закономірностей формування пасажиропотоків під час посадки було проведено спостереження за прибуттям пасажирів на платформу перед відправленням поїздів. Спостереження проходили на станції Київ-Пасажирський у вечірні години пік у вересні 2021 року в напрямку Фастова.

Дослідження показало, що час прибуття пасажирів має певні закономірності, хоча й не є повністю випадковим. Більшість пасажирів регулярно користуються приміськими поїздами та добре знайомі з розкладом, тому приходять на платформу прямо перед відправленням. Це створює підвищене навантаження на інфраструктуру, що призводить до скупчень і незручностей при посадці.

Методика і результати натурних досліджень

Натурні спостереження проводилися на станції Київ-Пасажирський, де фіксували час прибуття пасажирів на платформу до відправлення поїзда, а також кількість пасажирів, що знаходилися на платформі. Дослідження показали, що перший пасажир, зазвичай, з'являється на платформі не раніше ніж за 35–40 хвилин до прибуття поїзда. Після цього здійснювався підрахунок кількості пасажирів, які прибували на платформу, з інтервалами по п'ять хвилин до відправлення поїзда. На основі отриманих даних проводився математичний аналіз часу приходу пасажирів, що дозволяє визначити параметри, які характеризують закономірності зміни досліджуваного показника [19]. Графіки, що демонструють характер приходу пасажирів на платформу, представлені на рис. 12, 13, 14, на яких видно три поїзди (з інтервалами між поїздами відповідно 40, 24 і 8 хвилин).

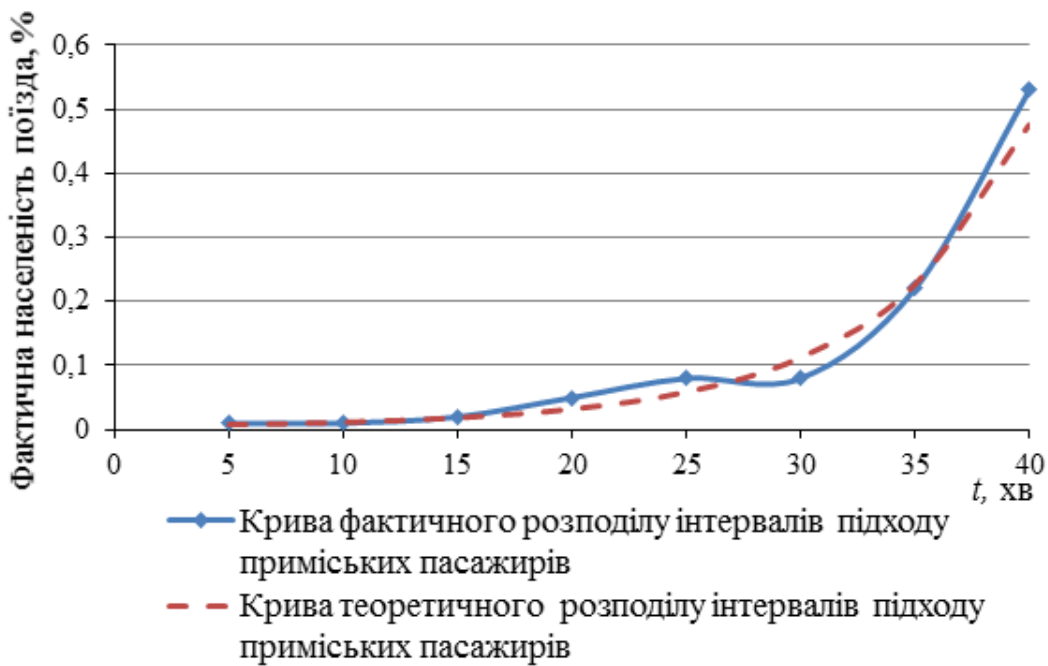


Рисунок 12 – Криві фактичного і теоретичного режиму підходу приміських пасажирів для міжпоїзного інтервалу 40 хв

де t – час до прибуття приміського поїзда.



Рисунок 13 – Криві фактичного і теоретичного режиму підходу приміських пасажирів для міжпоїзного інтервалу 24 хв

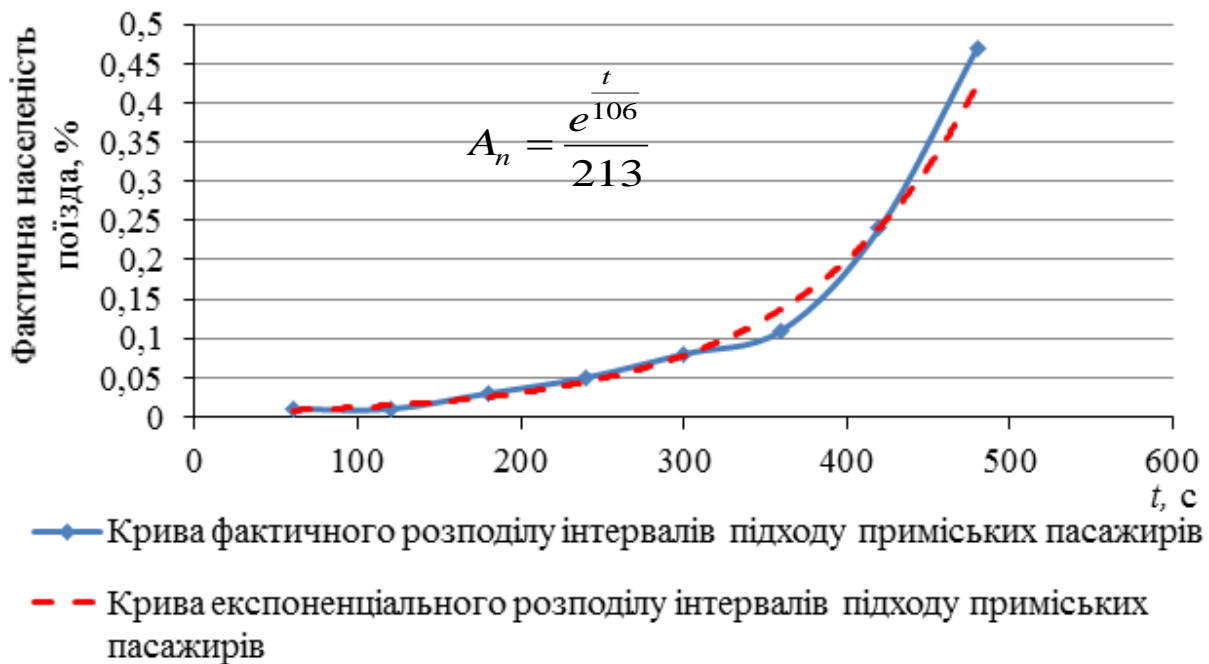


Рисунок 14 – Криві фактичного і теоретичного режиму підходу приміських пасажирів для міжпоїзного інтервалу 8 хв.

На рис. 12, 13, 14 представлено співставлення реальних кривих розподілу та апроксимованих теоретичних кривих інтенсивності підходу пасажирів та заповнення поїзда, а також формули, за допомогою яких описуються виявлені закономірності. Ці формули можуть бути використані для побудови відповідних математичних моделей, що описують процес підходу пасажирів на посадку у поїзди.

Значення числових характеристик інтервалів підходу приміських пасажирів на електропоїзди представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Числові характеристики інтервалів підходу приміських пасажирів

Станція відправлення	Інтервал між поїздами	χ_{cp} , хв	K	V	σ
Київ-Пасажирський	середній (40 хв)	34,75	20,93	0,22	7,6
Київ-Пасажирський	8 хв	6,82	19,32	0,23	93,1
Київ-Пасажирський	24 хв	20,91	18,91	0,23	4,8

По величині параметрів K , коефіцієнтів варіації інтервалів вхідного потоку V і по схожості фактичного і теоретичного розподілів можна сказати, що інтервали підходу приміських пасажирів на платформу (до приміських поїздів і квиткових кас) мають експоненціальний розподіл.

Кількість пасажирів, які підходять до платформи, є випадковою величиною, що змінюється протягом усього періоду розкладу руху приміських поїздів та залежить від міжпоїзного інтервалу. Таким чином, підхід пасажирів до квиткових кас на приміські поїзди є неординарним, оскільки можливе одночасне прибуття двох і більше пасажирів, і нестаціонарним, оскільки інтенсивність потоку пасажирів варіюється залежно від часу доби.

У випадку, коли пасажирів підходять щільно, виникають черги до квиткових кас. Якщо черга затягується, пасажир може бути вимушений залишити її та їхати без квитка або перейти на автомобільний транспорт. Це неприпустимо, тому необхідно створити умови для швидкого та якісного обслуговування пасажирів при купівлі приміських квитків. Для цього важливо гнучко реагувати на потік пасажирів, визначаючи потрібну кількість кас у різні періоди доби, як у робочі, так і у вихідні дні, особливо під час інтенсивного відправлення приміських поїздів.

На основі отриманого розподілу процесу підходу пасажирів до приміських поїздів, встановленого параметра K та відомого (або заданого) розкладу відправлення поїздів за певний період T , можна визначити (побудувати графік) загальний підхід пасажирів до квиткових кас протягом цього періоду за часом і кількістю. Отримані дані про загальний підхід пасажирів можуть бути використані для розрахунку кількості квиткових кас та їх робочого часу [19].

Виходячи з величини параметра K , коефіцієнта варіації інтервалів вхідного потоку та схожості фактичного і теоретичного розподілів, можна стверджувати, що інтервали приходу приміських пасажирів на платформу до поїздів у Фастівському напрямку у вечірні години пік мають експоненціальний теоретичний розподіл.

З очевидності, криві статистичних розподілів, представлені на рис. 12, 13, 14, демонструють подібну закономірність, хоча й містять певні відмінності. Тому ці дані потребують узагальнення через побудову теоретичних інтегральних кривих.

Для розрахунку інтегральної функції необхідно обчислити площу кожної фігури, обмеженої вертикальними лініями [19], які відповідають певним інтервалам часу, віссю часу та графіком функції. Після цього проводиться послідовне сумування всіх площ і нормування до 100% часу та 100% фактичної заповненої кількості поїзда на момент відправлення. В результаті отримуємо графіки інтегрального розподілу інтенсивності підходу пасажирів (рис. 15).

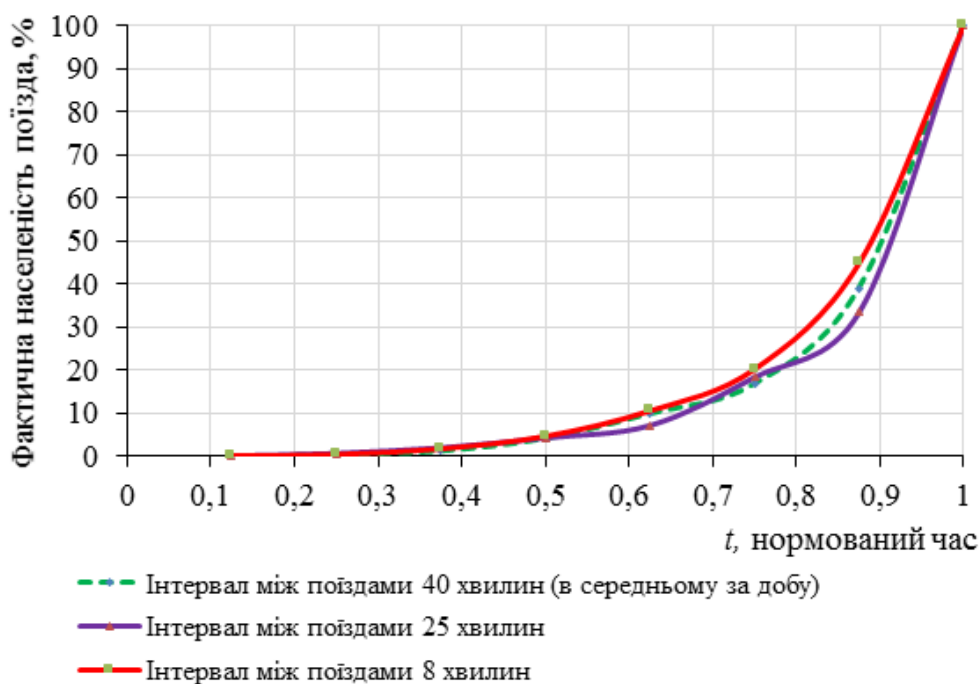


Рисунок 15 – Інтегральні криві розподілу інтервалів підходу приміських пасажирів на платформу

Як видно з графіка на рис. 15, для всіх трьох поїздів, які відправлялися у різний час і мали різну заповненість, характер зміни кривих, що показують інтенсивність підходу пасажирів до платформи, залишається однаковим. На цих інтегральних кривих чітко виокремлюються три періоди, протягом яких інтенсивність залишається приблизно стабільною. Перший період – це початковий

«повільний» етап підходу пасажирів, що триває від 0 до 60% від загального інтервалу між поїздами. Другий період – це середній «помірний» етап пасажиропотоку (від 60 до 85%), а третій період – це етап максимального «інтенсивного» пасажиропотоку, який триває від 85 до 100% тривалості інтервалу між поїздами.

Виділені три періоди тривають відповідно приблизно 60%, 25% і 15% від інтервалу між послідовними відправленнями поїздів (міжпоїзний інтервал, нормоване значення якого становить 100%). Ця закономірність буде використана далі в поєднанні з іншою, яку можна помітити, розглядаючи криві на рис. 12, 13, 14. Вона полягає в тому, що найдовший перший період приносить найменшу кількість пасажирів – лише 8–15%, другий період забезпечує середню кількість пасажирів, яка становить 20–40%, тоді як третій період, в якому спостерігається найбільший приплив пасажирів, забезпечує решту 40–70% пасажирів. Отже, третій період є найбільш важливим і критичним у процесі підходу пасажирів та заповнення поїзда.

Лінійна модель підходу пасажирів на платформу для довільного пасажиропотоку та інтервалу між поїздами

Наведені спостереження дозволяють запропонувати таку графічну модель для формалізації цього процесу (рис. 16).

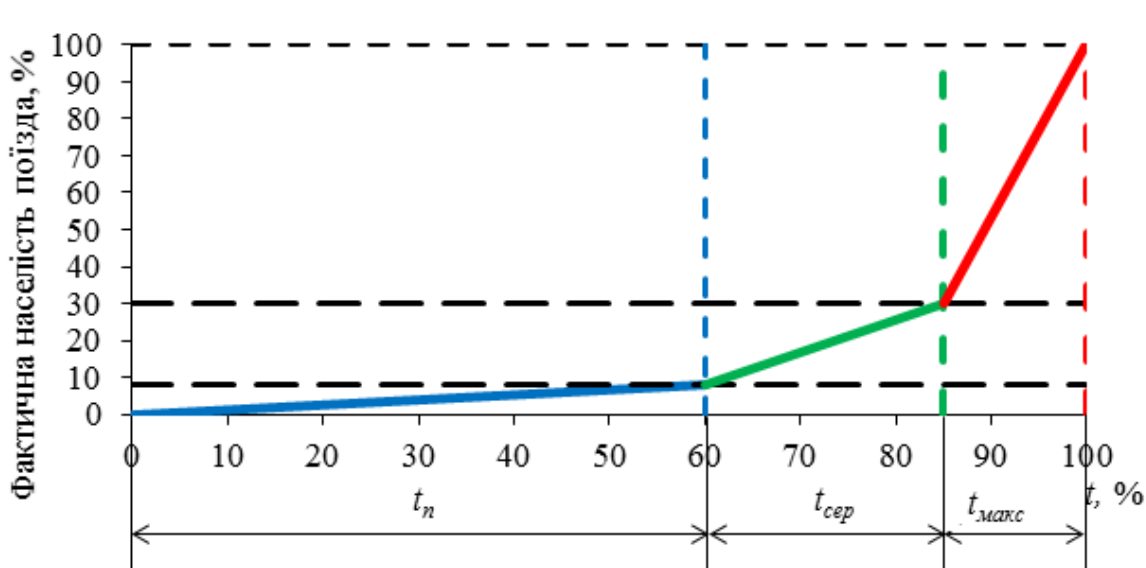


Рисунок 16 – Графічна модель часового режиму приходу пасажирів на платформу (у нормованому часі)

Ця модель є узагальненою для підходу пасажирів з будь-яким міжпоїзним інтервалом [19]. Беручи до уваги наведену вище інформацію та графік, формуємо аналітичну залежність моделі. Для кожного етапу визначаємо інтенсивність підходу пасажирів за формулою [21]:

$$\lambda = \frac{A_i - A_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (1)$$

де i – номер етапу.

Порядок застосування формули (1) наступний. Наприклад, для першого етапу $\lambda_1 = \frac{A_1 - A_0}{t_1 - t_0} = \frac{7,8 - 0}{60 - 0} = 0,13$; для другого етапу

$$\lambda_2 = \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} = \frac{30 - 7,8}{85 - 60} = 0,88; \text{ для третього етапу } \lambda_3 = \frac{A_3 - A_2}{t_3 - t_2} = \frac{100 - 30}{100 - 85} = 4,68.$$

Далі побудуємо узагальнені формули для математичної моделі:

$$A = \begin{cases} 0,13 \cdot t, \text{ якщо } t = t_n, \text{ де } 0 < t_n < 60\%, \\ 0,88 \cdot t, \text{ якщо } t = t_{\text{сеп}}, \text{ де } 60 < t_n < 85\%, \\ 4,68 \cdot t, \text{ якщо } t = t_{\text{макс}}, \text{ де } 85 < t_n < 100\%. \end{cases} \quad (2)$$

Отже, була побудована узагальнена лінійна модель підходу пасажирів на платформу для будь-якого пасажиропотоку та міжпоїзного інтервалу по трьох періодах. Ця модель дозволяє швидко та легко розрахувати пасажиропотік у будь-який момент часу та оцінити заповненість поїзда пасажирами в заданий момент часу t [20].

Подальші перетворення формул, засновані на наведеній графічній моделі, демонструють, що інтегральна крива заповнення поїзда пасажирами може бути апроксимована такою формулою, яка отримана за допомогою апроксимуючої програми FindGraph:

$$A = \frac{t}{3 \cdot T \cdot e^{((5,7 \cdot t) / T)}}, \quad (3)$$

де A – заповнення поїзда пасажирами (фактична кількість пасажирів), у %;

T – інтервал між поїздами;

t – поточний час;

3 та 5,7 – емпіричні коефіцієнти, отримані при апроксимації.

На рис. 17 показано порівняння реальної кривої розподілу з апроксимованою теоретичною кривою інтенсивності підходу пасажирів і заповнюваності поїзда. Як видно з цього рисунка, задовільна відповідність між цими двома кривими свідчить про наявність універсальної математичної графіко-аналітичної моделі розподілу інтервалів підходу приміських пасажирів на платформу.



Рисунок 17 – Універсальна математична графіко-аналітична модель розподілу інтервалів підходу приміських пасажирів на платформу

З формули (3) можна одержати узагальнену модель, яка описує заповнення платформи для будь-якого інтервалу між поїздами T :

$$n = \frac{N(t, T) \cdot t}{300 \cdot T \cdot e^{(5,7 \cdot t) / T}}, \quad (4)$$

де n – кількість пасажирів, які прийшли на платформу за час t ;

$N(t, T)$ – населеність поїзда, пасажирів для відповідної пари значень часу (t, T) .

Слід зазначити, що на величину $N(t, T)$ впливає також пора доби (внутрішньодобова нерівномірність перевезень пасажирів), сезонність перевезень.

Отже, створена універсальна аналітична модель дозволяє описати заповненість платформи пасажирами для будь-якої кількості пасажирів у поїзді та інтервалу між поїздами, що є вкрай важливим для ефективної організації процесу перевезення пасажирів.

Інтегральна модель параметрів транспортного обслуговування, інфраструктури та рухомого складу приміських перевезень

Дослідження показують, що на головній станції більшість пасажирів (70 – 90%) займають місця в приміському поїзді протягом 15 – 20 хвилин до відправлення. Протягом цього часу пасажири очікують обслуговування в касі, купують квитки та пересуваються від кас до місця посадки, при цьому вони можуть займати місця для своїх знайомих, які часто підходять безпосередньо перед відправленням. Ще 20 – 40 % пасажирів прибувають на платформу за 5–10 хвилин до відправлення, а в останні хвилини, або навіть секунди, до поїзда підходять ті пасажири, для яких місця були зайняті знайомими.

Потік пасажирів є випадковою величиною, що суттєво коливається протягом періоду руху приміських поїздів і залежить від розкладу поїздів, роботи наземного транспорту, метро та їх пропускної здатності. При цьому потік пасажирів на платформу також є випадковою змінною.

Якщо інтенсивність прибуття пасажирів на платформу перевищує інтенсивність їх відправлення поїздами, виникає скупчення, яке ускладнює перебування пасажирів на платформі та створює загрозу їх безпеці. Спостереження свідчать, що ці скупчення досягають піку безпосередньо перед прибуттям поїзда на платформу, що може призвести до падіння пасажирів або предметів на колії. Як цьому запобігти? Привести у відповідність інтенсивність прибуття пасажирів на платформу та інтенсивність їх відправлення поїздами з платформи. Розглянемо, від чого залежать інтенсивності цих процесів.

Тривалість періоду заповнення платформи пасажирями, що будуть відправлятися найближчим поїздом у певну пору доби « t » (очікування поїзда на платформі), T_t , дорівнює [21]:

$$T_t = \frac{a_F F}{\Lambda_t}, \quad (5)$$

де a_F – кількість пасажирів на 1 м² пасажирської платформи (максимально $a_F \approx 3 - 4$ пасажирів на 1 м²);

F – площа пасажирської платформи, м²;

Λ_t – інтенсивність пасажиропотоку, що надходить на платформу в пору доби t (ця інтенсивність є максимальною в години пік).

$$\Lambda_t = \frac{A_t \cdot k}{J_t - t_o}, \quad (6)$$

де A_t – середня інтенсивність пасажиропотоку о порі доби t , пасажирів за годину;

J_t – інтервал між поїздами, год;

t_o – неінтенсивний період підходу пасажирів, що включає «повільний» та «помірний» періоди (рис. 6), год;

k – коефіцієнт, що враховує допустиму перенаселеність вагонів порівняно з їх номінальною пасажиромісткістю (до 1,4).

Площу пасажирської платформи F необхідно пов'язати з параметрами рухомого складу таким чином:

$$F = L \cdot B, \quad (7)$$

де L – довжина платформи, м;

B – ширина платформи, м.

У свою чергу,

$$L \geq m_B l_B, \quad (8)$$

де m_B – кількість вагонів у составі поїзда;

l_B – довжина вагона по осях автозчеплення, м;

Після цього можна визначити середній час очікування поїзда τ_{0t} пасажиром в пору доби t , якщо пасажир не знає розкладу і прийшов на платформу навмання:

$$\tau_{0t} = \frac{J_t}{2}, \quad (9)$$

де J_t – інтервал між поїздами.

$$J_t \leq T_t, \quad (10)$$

T_t – тривалість періоду заповнення платформи.

$$J_t \leq \frac{a_F \cdot F}{A_t \cdot k} (J_t - t_o). \quad (11)$$

Після перетворень отримаємо:

$$J_t \leq \frac{1}{1 - \frac{A_t \cdot k}{a_F \cdot m_B l_B \cdot B}}, \quad (12)$$

причому повинна виконуватись умова $A_t < a_F F$, звідки $F > \frac{A_t}{a_F}$ (що очевидно).

Для практичного використання формули (12) необхідно враховувати, що фактична площа платформи зазвичай менша за розрахункову F . Це пов'язано з тим, що на платформі можуть бути не лише лавки для сидіння, але й турнікети для проходу пасажирів, кіоски та інші комерційні об'єкти. Тому, якщо площа недостатня для безпечного і комфортного перебування пасажирів під час посадки в поїзди та їх очікування, слід обмежити кількість таких об'єктів.

Отримані результати досліджень дозволяють виконувати комплексні, системно пов'язані розрахунки важливих техніко-технологічних параметрів приміських перевезень пасажирів, включаючи параметри графіка руху поїздів, їх склад та характеристики вагонів, а також параметри інфраструктури приміського господарства. Сюди входять розміри пасажирських платформ, кількість і розташування на них турнікетів, а також обмеження на комерційне використання їх площ, за умови забезпечення зручної та безпечної посадки пасажирів у поїзди.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Поздняков А.А., Мироненко В.К., Позднякова О.О., Гудков О.М. Дослідження факторів, що впливають на формування пасажиропотоків залізничних приміських перевезень у великих міських агломераціях. Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». К.: ДЕТУТ, 2016. Вип. 29. С. 261–274. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpdetut_tsit_2016_29_29
- [2] Passenger. Customer segmentation analysis. URL: <http://ciptec.eu/news/passenger-customer-segmentation-analysis/>.
- [3] Відправлення (перевезення) пасажирів за видами транспорту загального користування. Режим доступу: URL: <http://kyivobl.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=928&lang=1>.
- [4] Ahmad Tavassoli, Mahmoud Mesbah, Ameneh Shobeirinejad Modelling passenger waiting time using large-scale automatic fare collection data: An Australian case study. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. Volume 58, October 2018, Pages 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.037/>
- [5] Грушевська Т. М. Дослідження закономірностей пасажиропотоків у залізничному приміському сполученні. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту «Наука та прогрес транспорту». 2014. №5 (53). С. 39–47.
- [6] Грушевська Т. М. Удосконалення технології приміських перевезень на основі статистичних досліджень транспортного ринку. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. Тези доповідей 76-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». Вип. 143. Х.: УкрДАЗТ, 2014. С. 298 – 299.
- [7] Тарифи на перевезення пасажирів у приміському сполученні абсурдно низькі. Режим доступу: http://www.uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/326811/.

- [8] Чому «Укрзалізниця» знову опинилася зі збитками. Режим доступу: <http://www.corruption.net/statti/item/12533-chomu-ukrzaliznytsia-znovu-opynylasia-zi-zbytkamy>.
- [9] ДБН В.2.3-19:2018. Споруди транспорту. Залізниці колії 1520 мм. Норми проектування. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2018. 126 с. (Інформація та документація).
- [10] Ломотько Д. В., Філіпський О. В., Кравченко Д. М. Удосконалення роботи транспортно-пересадочних вузлів під час мультимодальних пасажирських перевезеннях за участю залізниць та автотранспорту. Наукові праці ВНТУ, 2019, №4. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2019-4-50-61>
- [11] Ján Palinský, Jana Fabianová, Nikoleta Mikušová Innovative Trends in the Field of Railway Transport and Infrastructure in the Conditions of Railways of the Slovak Republic. *Transportation Research Procedia*. Volume 77, 2024, Pages 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.029>.
- [12] Brumercikova, E., & Bukova, B. (2020). Proposals for using the NFC technology in regional passenger transport in the Slovak Republic. *Open Engineering*, 10(1), 238-244. <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0005>
- [13] Pipatphon Lapamonpinyo, Sybil Derrible, Francesco Corman Real-Time passenger train delay prediction using machine learning: a case study with Amtrak passenger train routes. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*. Volume 3, 2022. <https://doi.10.1109/OJITS.2022.3194879>
- [14] Yin Yuan, Shukai Li, Lixing Yang, Ziyu Gao Real-time optimization of train regulation and passenger flow control for urban rail transit network under frequent disturbances. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Volume 168, December 2022, 102942. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102942>.
- [15] European Rail Traffic Management System (ERTMS). URL: https://www.era.europa.eu/domains/infrastructure/european-rail-traffic-management-system-ertms_en

- [16] How to read signage at German train stations. URL: <https://fotoeins.com/2015/02/16/how-to-read-signage-at-german-rail-stations/> (дата звернення: 16.09.2024).
- [17] Мироненко В.К., Грушевська Т.М. Пасажирські перевезення залізничним, мультимодальним транспортом та метрополітеном: Навчальний посібник. К.: ДУІТ, 2023. 307 с.
- [18] Javier Faulin, Scott Grasman, Angel Juan, Patrick Hirsch. Sustainable Transportation and Smart Logistics. Decision-Making Models and Solutions. 1st Edition. Elsevier 2018. 534 pages. ISBN: 9780128142424. <https://shop.elsevier.com/books/sustainable-transportation-and-smart-logistics/faulin/978-0-12-814242-4>
- [19] Morris H. DeGroot, Mark J. Schervish Probability and Statistics (4th Edition). URL: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292037677_A24581727/preview-9781292037677_A24581727.pdf
- [20] Габа В. В., Грушевська Т. М., Костюшко В. П. Дослідження закономірностей пасажиропотоків на основі натурних спостережень. Проблеми економіки і управління на залізничному транспорті: ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. ЕКУЗТ, 17 листопада – 14 грудня 2014 р.: тези доп. Київ, 2014. С. 209 – 211.
- [21] Мироненко В. К., Габа В. В., Мацюк В. І., Грушевська Т. М., Костюшко В. П. Натурні дослідження та математичні моделі приміських пасажирських перевезень. Наукоємні технології. №4 (24). 2014. С. 496 – 502.