

ЦИНЬ С.

здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0009-0009-3736-619X

Є. В. ЛЮБИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри транспортних систем і логістики
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
ORCID: 0000-0003-0681-0920

ОЦІНЮВАННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНТЕРВАЛЬНОЇ КОНЦЕПЦІЇ В ПІДВИЩЕННІ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ

Мета дослідження полягає в оцінюванні результатів моделювання випадкових матриць пасажирських кореспонденцій у межах інтервальної концепції формування транспортного попиту на пересування пасажирів міським громадським транспортом із застосуванням поетапного методу генерації матриць кореспонденцій.

Наукова новизна дослідження заключається в удосконаленні підходу до формування матриць пасажирських кореспонденцій шляхом застосування поетапного випадкового методу генерації, який забезпечує гарантоване виконання системи базових і додаткових обмежень, зокрема з урахуванням місткостей транспортних районів з відправлення та прибуття пасажирів і кривої розселення населення, що дозволяє суттєво звузити пошуковий інтервал можливих станів транспортного попиту.

Результати дослідження включають формування множини випадкових матриць пасажирських кореспонденцій для моделі транспортного попиту м. Харкова, їх інтервальне оцінювання за показниками транспортної роботи та середньої дальності поїздок, а також визначення найбільш ймовірних станів матриць кореспонденцій. Встановлено, що використання поетапного методу генерації забезпечує значне зменшення діапазонів можливих значень оцінних параметрів порівняно з традиційними підходами та екстремальними варіантами матриць, що підвищує достовірність результатів моделювання транспортного попиту.

Висновки полягають у тому, що застосування поетапного методу генерації матриць пасажирських кореспонденцій підвищує точність, стабільність і прогнозу надійність моделей транспортного попиту в межах інтервальної концепції, забезпечує більш реалістичне відтворення закономірностей пересування пасажирів та створює надійну основу для обґрунтування управлінських рішень у сфері планування й розвитку систем міського громадського транспорту.

Ключові слова: громадський транспорт, інтервальна концепція, матриця пасажирських кореспонденцій, моделювання, транспортний попит.

QIN X.

Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0009-0009-3736-619X

YE. V. LIUBYI

PhD in Transport Systems, Associate Professor,
Head of the Department of Transport Systems and Logistics
Kharkiv National Automobile and Highway University
ORCID: 0000-0003-0681-0920

ASSESSING THE POTENTIAL OF THE INTERVAL CONCEPT IN IMPROVING THE RELIABILITY OF TRANSPORT DEMAND MODELING RESULTS

The purpose of the study is to evaluate the results of modeling random passenger origin–destination matrices within the framework of the interval concept for forming transport demand for urban public transport trips, using a stepwise method for generating passenger OD-matrices.



© Цинь С., Є. В. Любий, 2026

Стаття поширюється на умовах відкритої ліцензії CC BY 4.0

The scientific novelty of the research lies in improving the approach to forming passenger OD-matrices by applying a stepwise random generation method that ensures guaranteed compliance with a system of basic and additional constraints, including the capacities of transport zones for passenger departures and arrivals, as well as the population settlement curve. This makes it possible to significantly narrow the search interval of possible transport demand states.

The research results include the generation of a set of random passenger OD-matrices for the transport demand model of the Kharkiv city, their interval-based evaluation using indicators of transport work and average trip length, and the identification of the most probable states of the correspondence matrices. It has been established that the use of the stepwise generation method provides a substantial reduction in the range of possible values of the evaluation parameters compared with traditional approaches and extreme matrix variants, thereby increasing the reliability of transport demand modeling results.

The conclusions indicate that the application of the stepwise method for generating passenger OD-matrices improves the accuracy, stability, and predictive reliability of transport demand models within the interval concept, ensures a more realistic reproduction of passenger travel patterns, and provides a robust foundation for substantiating management decisions in the planning and development of urban public transport systems.

Key words: public transport, interval concept, passenger OD-matrix, modeling, transport demand.

Постановка проблеми

Одним із найбільш складних етапів у процесі формування транспортних моделей систем міського громадського транспорту (ГТ), як з методичної, так і з практичної точки зору, є розробка моделей транспортного попиту, найпоширенішою формою представлення яких є матриця пасажирських кореспонденцій (МПК). З огляду на це пошук найбільш ймовірних станів МПК є одним із пріоритетних завдань фахівців з транспортного моделювання та планування [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні, у переважній більшості випадків, це завдання – моделювання МПК – розв'язується шляхом застосування найуживаніших синтетичних методів розрахунку кореспонденцій, зокрема гравітаційної та ентропійної моделей, які базуються на результатах натурних спостережень за роботою міського ГТ.

З урахуванням недоліків синтетичних методів розрахунку МПК, а також складнощів отримання повної, надійної та об'єктивної інформації про існуючий або потенційний попит на пересування пасажирів міським ГТ у межах польових досліджень, можна стверджувати, що формування МПК для великого міста є надзвичайно складною, а в окремих випадках – практично нерозв'язною задачею. До цього слід також додати обмежену придатність результатів моделювання МПК із використанням синтетичних моделей у межах інтервальної концепції (ІК) моделювання транспортного попиту на пересування ГТ, що зумовлено лімітованою кількістю можливих станів матриць, що можуть бути згенеровані у межах таких моделей [1].

Але слід зазначити, що на сьогодні вже існують інструменти, які дозволяють навіть для окремого варіанта МПК, що описує певний стан транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ в місті, сформувати такий її варіант, який відповідатиме параметрам, використаним для калібрування вихідного варіанта матриці кореспонденцій (МК). Одним із таких інструментів є вбудований у PTV VISUM модуль TFlowFuzzy [3], який забезпечує можливість калібрування як фрагменту МПК, так й повного її варіанту. Його застосування найчастіше ґрунтується на заданні калібрувальних обмежень або системи обмежень, що реалізуються через параметри ланок у транспортній моделі, які з'єднують вузли транспортної мережі, зокрема пасажиропотоки на ключових ділянках маршрутної мережі, або ж через результати функціонування системи маршрутів ГТ – обсяги перевезення пасажирів.

Також слід розуміти, що для отримання якісних результатів калібрування МПК із використанням модуля TFlowFuzzy необхідним є проведення польових досліджень за роботою ГТ, нехай може й не таких трудомістких, як у випадку формування стартового стану МПК, але у достатньому обсязі для актуалізації даних про попит на пересування пасажирів у місті. Зокрема, дані про фактичні пасажиропотоки на ключових ділянках маршрутної мережі можуть бути отримані шляхом організації відеоспостереження за рухом маршрутних транспортних засобів. Крім того, слід враховувати необхідність доступу до спеціалізованого програмного забезпечення з транспортного моделювання PTV VISUM, досвід використання якого українськими фахівцями у відповідній галузі наразі є обмеженим. Це зумовлено, по-перше, високою вартістю програмного продукту, а по-друге, відсутністю відкритих навчальних матеріалів і систематизованих практичних прикладів його застосування в умовах вітчизняних транспортних і маршрутних систем.

Все вище наведене свідчить про актуальність проведення наукових і практичних досліджень, спрямованих на удосконалення методів формування МПК з урахуванням специфіки функціонування міського ГТ, особливостей поведінки пасажирів і випадкового характеру транспортного попиту. Особливу увагу слід приділяти саме розробці та впровадженню комплексних підходів, які поєднують результати натурних обстежень роботи ГТ із сучасними методами математичного моделювання. Це дозволить підвищити точність і надійність транспортних моделей, а також забезпечити обґрунтованість управлінських рішень у сфері планування та розвитку систем міського ГТ [1].

Використання методів математичного моделювання для розв'язання задачі моделювання випадкових станів МПК у межах реалізації ІК формування моделей транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ є обов'язковою вимогою. Це зумовлено необхідністю генерації великої кількості станів МК за умов обмежених часових ресурсів, відведених на виконання запланованих робіт з удосконалення систем міського ГТ. Одним із таких методів, побудованих на принципах математичного моделювання та використанні даних про місткість ТР з відправлення й прибуття пасажирів, є базовий власне випадковий метод генерації МПК [4]. Водночас результати його застосування, особливо з урахуванням накладання додаткових обмежень, не гарантують отримання коректного або прийнятного результату моделювання МПК, зокрема для об'єктів великої розмірності, незважаючи на те, що сформовані МПК характеризуються максимальною випадковістю [2].

Розроблений авторами цієї статті у [2] метод поетапної генерації випадкових станів МПК усуває недоліки, притаманні як синтетичним методам формування МК, так і власне базовому випадковому методу. Запропонований підхід спрямований на отримання гарантованого результату моделювання випадкових МПК, які відповідатимуть заданому переліку обмежень при генерації МК і можуть бути використані для оцінювання можливих станів транспортного попиту в межах ІК моделювання потреб населення у пересуванні ГТ.

Формулювання мети дослідження

Основною метою даної статті є оцінювання результатів моделювання випадкових МПК із застосуванням методу поетапної генерації МК у межах ІК моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для врахування повного переліку обмежень на генерацію МПК із застосуванням поетапного методу генерації МК за об'єкт експериментальних досліджень обрано модель транспортного попиту для м. Харкова, яка формувалася на основі даних, отриманих за рахунок проведення натурних спостережень за роботою ГТ [5]. У цій роботі авторами отримано фактичну криву розселення населення м. Харкова (додаткові обмеження) на основі результатів обстеження відстаней трудових пересувань мешканців міста. У свою чергу, інформацію про місткості транспортних районів (ТР) з відправлення і прибуття пасажирів м. Харкова – базові обмеження – можна отримати з роботи [6]. Інформація про місткості ТР з прибуття пасажирів для формування МПК у [6] була отримана шляхом обробки статистичної інформації про кількість працюючих на підприємствах з прив'язкою до території міста, яка, входить до відповідного ТР. У свою чергу, місткості ТР з відправлення розраховувалися з урахуванням щільності мешканців і місць прикладання праці, що закріплені за територіями відповідних ТР.

На наступному етапі генерації випадкових МПК поетапним методом було підібрано значення керуючих параметрів для роботи алгоритму за умов отримання десяти разового позитивного результату генерації МПК для певного значення максимально допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні у комірку матриці та мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень.

Слід відзначити, що позитивним результатом вважатиметься така модель транспортного попиту, при формуванні якої виконані всі обмеження, тобто залишок незаповнених кореспонденцій дорівнює 0 %. Але слід враховувати і той факт, що у процесі генерації МПК, можуть бути отримані такі стани моделей транспортного попиту, в яких залишок нерозподілених кореспонденцій буде зовсім незначним. Тому для пом'якшення вимог до генерації МК прийнятним результатом можна вважати такий, якщо залишок нерозподілених кореспонденцій у згенерованій МК не буде перевищувати 0,25 % від загальної кількості (суми) пересувань у матриці. Але слід взяти до уваги, що більш значущою при виникненні таких ситуацій є вимога щодо виконання конкретного обмеження (наприклад, обсягу пересувань у межах певної кишені). До цього слід також додати, що у процесі генерації МК можуть виникати ситуації, коли залишок нерозподілених кореспонденцій буде відноситися до двох і більше кишень додаткових обмежень. Тому за умов появи таких випадків при генерації МК, отримані результати не вважатимуться успішними.

З урахуванням вище наведених міркувань було отримано 170 варіантів випадкових МПК із застосуванням поетапного методу генерації МК.

Ключовим показником, що використовується для оцінювання станів розрахункових МПК у рамках ІК моделювання транспортного попиту є різниця у транспортній роботі по реалізації МК, яка найчастіше доповнюється показником середньої відстані пересування пасажирів у ГТ [5–7]

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot l_{ij}}{Q}, \quad (1)$$

де h_{ij} – величина пасажирської кореспонденції між ТР i та j , пас.; l_{ij} – відстань пересування пасажирів у ГТ між ТР i та j , км; Q – загальний обсяг пересувань пасажирів у МПК, пас.

З огляду на значення обраних для оцінювання показників існує можливість не лише отримати відповідні інтервали їх можливих станів, забезпечивши таким чином інтервальну оцінку параметрів пересування пасажирів, а й оцінити ефективність функціонування чинних міських пасажирських маршрутних систем і запропонованих заходів щодо їх коригування й удосконалення.

З метою здійснення розрахунків обраних для оцінювання згенерованих МПК було використано матрицю відстаней між ТР, яка є однією із характеристик моделі транспортної пропозиції системи ГТ м. Харкова, розрахованою з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для транспортного моделювання PTV VISUM у рамках виконання дисертаційного дослідження [5].

За результатами проведених розрахунків було встановлено інтервали їх найбільш ймовірних значень (табл. 1), а також побудовано графік зміни величини середньої відстані пересування пасажирів у ГТ в залежності від значень транспортної роботи з реалізації відповідних МПК (рис. 1).

Таблиця 1

Результати інтервального оцінювання варіантів МПК, розроблених з використанням поетапного методу генерації МК

Показник	Величина інтервалу
Інтервал ймовірних значень	
Транспортна робота з реалізації з МПК, пас.-км	[3773156,2;3957719,7]
Середня відстань пересування пасажирів у ГТ, км	[8,633;9,057]
Інтервал найбільш ймовірних значень	
Транспортна робота з реалізації з МПК, пас.-км	[3904482,8;3916649,9]
Середня відстань пересування пасажирів у ГТ, км	[8,931;8,959]

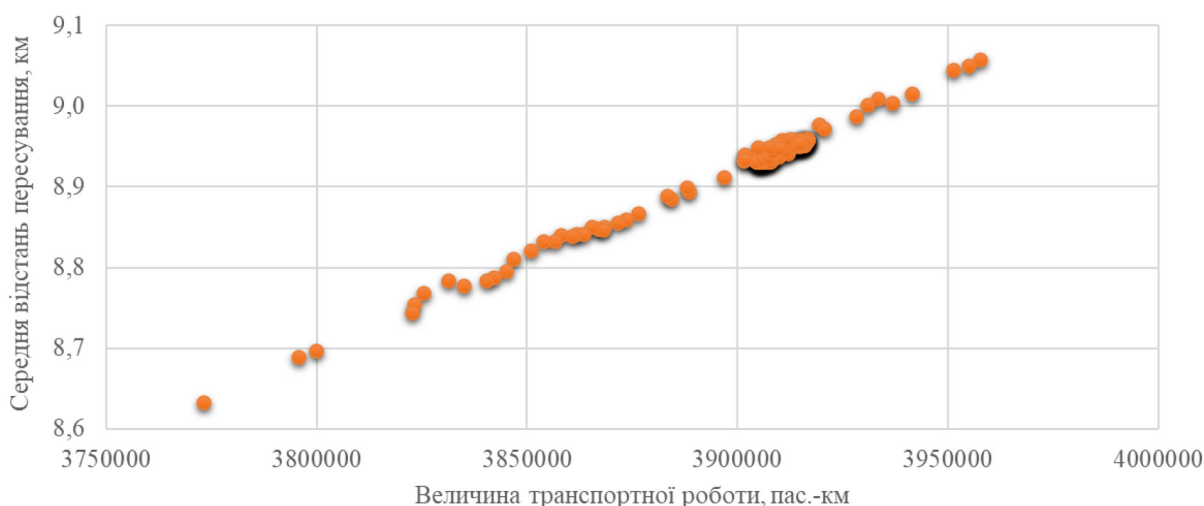


Рис. 1. Залежність середньої відстані пересування пасажирів у ГТ від транспортної роботи з реалізації МПК, згенерованих з використанням поетапного методу формування МК

Побудований графік дав змогу встановити, що 76 % (129 од.) згенерованих МПК належать до діапазону значень транспортної роботи [3904482,8;3916649,9] пас.-км (виділеного на рис. 1). Отже, варіанти МПК, що потрапляють у зазначений діапазон, можна вважати найбільш ймовірними.

Слід відзначити, що обрані оцінні показники з аналогічною метою використовувалися у роботах [5, 6] на тому ж самому об'єкті експериментальних досліджень, що і в даній статті. У роботі [6] було встановлено, що величина транспортної роботи з реалізації МКП для м. Харкова знаходиться в інтервалі [3586867,5;3993076,5] пас.-км, а середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – [8,22;9,12] км. У свою чергу в роботі [5] визначено, що інтервали значень транспортної роботи з реалізації розроблених МК для м. Харкова і середньої відстані пересування пасажирів у ГТ становлять [3823170;3837292] пас.-км та [8,744;8,777] км, відповідно.

Ці дані слід розширити інформацією про екстремальні значення діапазонів обраних параметрів для оцінювання станів згенерованих МПК, які у рамках даного дослідження розраховані з використанням можливостей безкоштовної надбудови для MS Excel OpenSolver – було сформовано мінімальний і максимальний варіанти МПК для м. Харкова розміром 140×140 ТР. Тут за основу вхідну інформацію використано матрицю відстаней між ТР [5] та місткості ТР з відправлення та прибуття пасажирів [6]. У результаті розрахунків встановлено, що екстремальні значення можливого діапазону станів МПК для м. Харкова становитимуть: величина транспортної роботи з реалізації МК [919240,9;7599700,6] і середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – [2,102;17,382].

З огляду на вище наведені значення оцінних показників, аналогічних показників представлених у роботах [5, 6], а також розрахованих для згенерованих МПК за поетапним методом формування моделей транспортного

попиту на пересування пасажирів ГТ, цілком можна стверджувати, що довжини діапазонів цих параметрів зменшуються:

– для повного (екстремального) діапазону значень – транспортна робота у 549,1 разів або 99,8 %, середня відстань пересування пасажирів у ГТ – у 545,7 разів або 99,7 %;

– для діапазону значень оцінних показників, представлених у роботі [6] – транспортна робота у 33,1 рази або на 97,0 %, середня відстань пересування пасажирів у ГТ – у 32,1 рази або на 96,9 %;

– для діапазону значень оцінних показників, представлених у роботі [5] – транспортна робота у 1,16 разів або на 13,8 %, середня відстань пересування пасажирів у ГТ – у 1,18 разів або на 15,2 %.

Можливим поясненням такого суттєвого звуження інтервалу можливих станів МПК, яке визначається різницею обраних оцінних параметрів, є те, що при генерації МПК поетапним методом враховано додаткове обмеження, яке описує криву розселення населення м. Харкова і представляється у вигляді відповідної кількості кишень із заданим обсягом пересувань, що реалізуються на відповідну відстань. Графічна інтерпретація звуження меж можливих станів МПК представлена на рис. 2.

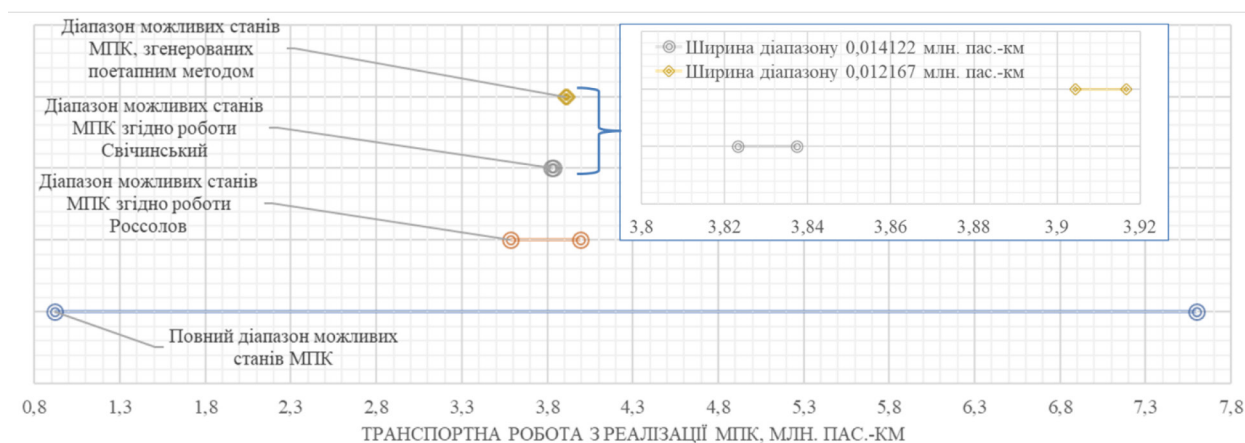


Рис. 2. Графічне відображення звуження меж діапазону зміни найбільш ймовірних станів МПК

Висновки

Отримані в статті результати підтверджують здатність поетапного методу генерації МПК підвищувати точність, стабільність та прогнозу надійність результатів формування моделей транспортного попиту у межах ІК.

У роботі зроблено лише першу спробу щодо опису і врахування максимального переліку можливих обмежень на моделювання МПК, а також підбору значень керуючих параметрів, використання яких теоретично дозволило б отримати ще кращі результати генерації МПК за розробленим поетапним методом, і, відповідно, ще звужити межі найбільш ймовірних станів МК у рамках ІК моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ.

Список використаної літератури

1. Цинь С., Любий Є.В. Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. 11(42), ч. 2. С. 394-409. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409)
2. Цинь Сяосюань, Любий Є.В. Теоретичні засади побудови алгоритму гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. 12(43), ч. II. С. 295-303. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.295-303](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.295-303)
3. PTV Visum 2023 Manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2022. 2773 p.
4. Івахнік В. С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. 6. С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>
5. Горбачов П. Ф., Свічинський С. В. Інтервальне моделювання потреб населення міст у перевезеннях громадським транспортом на основі функції розселення : монографія. Харків, 2016. 148 с.
6. Россолов О. В. Удосконалення інтервальної концепції визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в великих містах : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 21 с.
7. Любий Є. В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 22 с.

References

1. Qin, X., & Liubyi, Ye. (2025). Analysis of existing methods of forming models of passenger travel needs. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 11(42), Part 2, 394-409. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.394-409](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.394-409).
2. Qin, X., & Liubyi, Ye. (2025). Theoretical Foundations for the Development of an Algorithm for Guaranteed Generation of Random Passenger Correspondence Matrices. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 12(43), Part 2, 295-303. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.295-303](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.295-303)
3. PTV Visum 2023 Manual. (2022). Karlsruhe : PTV Planung Transport Verkehr GmbH.
4. Ivakhnik, V. S. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modelling. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6, 57–64. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>
5. Horbachov, P. F., Svichynskyi, S. V. (2016). Interval modeling of urban population demand for public transport based on the settlement function : monograph. Kharkiv : KhNAHU. [in Ukrainian].
6. Rossolov, O. V. (2012). Improving the interval concept for determining demand for passenger route transport services in large cities : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNAHU. [in Ukrainian].
7. Liubyi, Ye. V. (2012). Determining the demand for passenger route transport in small towns : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv : KhNAHU. [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 11.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026