

К. В. Доля, доц., д-р техн. наук

*Національний аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут»,
м. Харків, Україна*

e-mail: k.v.dolia@gmail.com

Моделювання та прогнозування потоків пасажирів у мультимодальних маршрутних системах з урахуванням пересадок і надійності розкладів

У статті розглянуто підхід до прогнозування пасажиропотоків у мережах із поєднанням різних видів транспорту, де якість пересадок визначається варіативністю виконання розкладів. Запропоновано опис узагальнених витрат маршруту з урахуванням ризику пропуску стикування та наведено схему розрахунку, що поєднує оцінювання надійності, прогноз попиту й розподіл потоків у графовій моделі мережі. Показано, як параметри надійності впливають на вибір маршруту та перерозподіл потоків.

Пасажиропотоки, мультимодальні перевезення, пересадки, надійність розкладів, прогнозування, вибір маршруту, графова модель

Постановка проблеми. Мультимодальні маршрутні системи (поєднання міського транспорту, приміських перевезень, залізниці, авіаційного та мікромобільного компонентів) формують складні потоки пасажирів, у яких ключову роль відіграють пересадки. Для пасажирів саме пересадка є «вузьким місцем» маршруту: вона додає час очікування, ризик запізнення на наступний рейс і, відповідно, змінює сприйнятну вартість подорожі та вибір маршруту. У міських агломераціях з інтенсивним рухом навіть незначні зсуви фактичних часів прибуття/відправлення від розкладу приводять до накопичення затримок у ланцюжках пересадок, перерозподілу пасажиропотоків між альтернативними маршрутами та перевантаження окремих ділянок мережі. Відомо, що якість пересадок та очікування є одними з найчутливіших компонентів узагальнених витрат поїздки, а також визначають сприйнятну надійність поїздки [1, 2].

З огляду на це, актуальною є задача моделювання і прогнозування потоків пасажирів у мультимодальних мережах з явним урахуванням: (1) структури пересадок (час підходу, очікування, мінімальні стикувальні інтервали), (2) надійності розкладів (варіативності часу руху та дотримання інтервалів), (3) поведінки пасажирів щодо ризику пропуску стикування [3, 2]. Розв'язання цієї задачі важливе для планування розкладів і тактових графіків, визначення резервів часу на пересадку, налаштування координації між видами транспорту, оптимізації пропускної спроможності вузлів та підвищення стійкості транспортної системи в умовах збурень [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження пасажиропотоків у транспортних мережах традиційно базуються на задачах розподілу попиту (traffic assignment) та моделей вибору маршруту, де узагальненою вартістю виступають час у дорозі, вартість проїзду та штрафи за пересадки. У межах цього підходу широко застосовують стохастичні моделі користувачької рівноваги (SUE) та моделі дискретного вибору, які дозволяють відобразити неоднорідність поведінки пасажирів і випадковість сприйняття витрат [5, 6].

Окремий напрям пов'язаний із представленням громадського транспорту як мережі «розкладового типу» (schedule-based) або «частотного типу» (frequency-based). Частотні моделі є придатними для високочастотних ліній, де очікування апроксимується половиною інтервалу, однак вони слабше відображають ефекти синхронізації пересадок, асиметрію очікувань та часову залежність [7, 1]. Розкладові підходи, навпаки, дозволяють безпосередньо враховувати конкретні рейси, обмеження на стикування, мінімальні часи пересадки та часову залежність попиту, що є критичним для мультимодальних ланцюжків [8, 9].

У мультимодальних системах додаткової важливості набуває надійність: варіація часу руху, нерівномірність інтервалів, затримки на зупинках і у вузлах пересадки. У літературі розглядають поняття надійності як складову узагальненої вартості (reliability based assignment), вводять штрафи за запізнення, ризик пропуску пересадки, а також моделюють буферні часи, які пасажирів закладають для зменшення ризику [10, 11, 12]. Для громадського транспорту та пересадок актуальними є моделі «запізнення стикування» (missed connection), де ймовірність стикування оцінюється через розподіли запізнь і мінімальні інтервали пересадки [13, 14].

Помітного розвитку набули методи прогнозування пасажиропотоків на основі даних автоматизованих систем оплати проїзду (AFC), GPS/AVL та мобільних даних. Використовують класичні часові ряди, регресійні моделі, градієнтні ансамблі та нейронні мережі для прогнозу попиту на зупинках і лініях, а також графові нейронні мережі (GNN) для врахування просторово-мережових залежностей [15, 16, 17]. Разом з тим, прогностичні моделі попиту часто не інтегрують явним чином механізм пересадок та ризик невиконання розкладу, що ускладнює інтерпретацію результатів у термінах керування розкладом і координації мультимодальних стикувань. Узагальнення підходів до моделювання попиту на громадський транспорт, включно з чинниками сервісу та пересадок, наведено у оглядових роботах [18].

Для оцінювання стійкості мережі та відновлення після збурень застосовують підходи на основі теорії надійності, мережевої стійкості та аналізу вразливості вузлів; при цьому пересадочні вузли часто ідентифікуються як критичні елементи, що визначають системний ефект затримок [3, 19]. У практичних задачах планування зростає інтерес до тактових розкладів і координації пересадок (time table synchronization) як інструментів підвищення якості сервісу, проте їхня ефективність залежить від реальної надійності виконання рейсів [4, 2].

Отже, попри значний прогрес у методах розподілу попиту, прогнозування та аналізу надійності, залишається невирішеною частина загальної проблеми, що стосується узгодженого (інтегрованого) прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах із явним урахуванням пересадок і надійності розкладів на рівні конкретних стикувань. Саме ця невирішена складова визначає практичну потребу в моделях, які поєднують (1) розкладове представлення мережі, (2) стохастичні характеристики запізнь/інтервалів, (3) поведінкові реакції пасажирів на ризик та (4) прогнозування попиту з використанням сучасних даних.

Мета роботи. Метою статті є розроблення підходу до моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах з урахуванням пересадок і надійності розкладів для підвищення обґрунтованості рішень щодо планування та координації перевезень.

Об'єкт дослідження — процес формування та перерозподілу потоків пасажирів у мультимодальній маршрутній мережі з пересадками за умов стохастичних відхилень фактичних параметрів руху від розкладу [3, 2]. Предмет дослідження — методи та моделі прогнозування пасажиропотоків, що інтегрують розкладове представлення мультимодальної мережі, параметри пересадок (мінімальні стикувальні інтервали, час

очікування) та показники надійності виконання розкладів (розподіли запізень/інтервалів) для оцінювання ймовірності успішного стикування та впливу цього чинника на вибір маршруту [8, 3].

Цілі й задачі дослідження. Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- сформулювати модель мультимодальної маршрутної мережі з явним описом пересадочних вузлів і стикувальних обмежень та визначити показники надійності виконання розкладів, що впливають на пасажирські рішення;
- розробити підхід до прогнозування пасажиропотоків на рівні ліній/ділянок і пересадок із урахуванням імовірності пропуску стикування та поведінкових штрафів за ризик;
- виконати обчислювальне оцінювання впливу надійності розкладів і параметрів пересадок на перерозподіл пасажиропотоків і сформулювати практичні рекомендації щодо координації розкладів у мультимодальних системах.

Основний матеріал дослідження. У цьому розділі наведено узагальнений методичний підхід до моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах із урахуванням пересадок і надійності розкладів. Для забезпечення відтворюваності підхід подано у вигляді структурної схеми (рис. 1), математичних залежностей (формули (1)–(8)) та аналізу застосовних методів розв’язання задачі (з посиланнями на сучасні джерела).

Технологічна схема розрахунку. Загальна логіка розрахунку включає збір даних про мережу та розклади, оцінювання параметрів надійності, прогноз попиту та розподіл потоків у мережі з урахуванням пересадок (рис. 1). Для мультимодальних систем доцільно використовувати розкладове (schedule-based) представлення, оскільки воно дозволяє явно моделювати стикування рейсів і мінімальні інтервали пересадки.



Рисунок 1 – Технологічна схема моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальній маршрутній системі з урахуванням пересадок і надійності розкладів
Джерело: розроблено автором

Рисунок 1 узагальнює послідовність етапів дослідження: від формування вхідних даних (мережа, розклади, спостереження) до оцінювання параметрів надійності, прогнозування попиту та подальшого розподілу потоків у мережі. Смісл схеми полягає в тому, що надійність розкладів і параметри пересадок враховуються не «після» розрахунку, а безпосередньо впливають на узагальнені витрати маршрутів і, як наслідок, на прогнозні пасажиропотоки.

На рис. 2 наведено приклад графового подання мультимодальної мережі з пересадочним вузлом, що використовується для формалізації задачі призначення пасажирів (див. формули (1)–(7)).

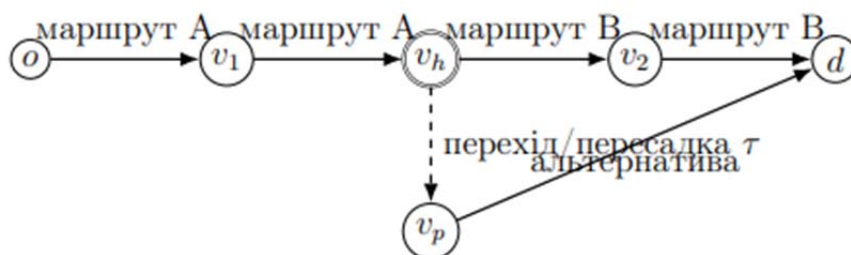


Рисунок 2 - Графова модель мультимодальної мережі з пересадками: вузли V та дуги A різних типів (поїздка, пересадка/перехід)

Джерело: розроблено автором

Рисунок 2 ілюструє, як мультимодальна система подається у вигляді графа: вершини відповідають зупинкам/станціям і пересадочним вузлам, а дуги – переміщенням різних типів (поїздка на лінії, пішохідний перехід, пересадка). Таке подання потрібне для формалізації множини допустимих маршрутів R_{od} та обчислення узагальнених витрат C_r і потоків f_r .

Розглянемо математичну модель витрат поїздки з урахуванням пересадок і надійності. Припустимо, що мультимодальна мережа описується орієнтованим графом $G = (V, A)$, де V – множина транспортних вузлів (зупинок, станцій, пересадочних терміналів), A – множина дуг (переміщень між вузлами), що відповідають поїздкам на маршрутах/лініях, пішим переходам і пересадкам. Для кожного пасажира розглядається множина допустимих маршрутів $r \in R_{od}$ між парою походження–призначення (o, d) .

Узагальнену вартість (generalized cost) маршруту r з урахуванням надійності доцільно задавати як (1) суму детермінованих складових часу та штрафу за ризик пропуску пересадки:

$$C_r = \beta_{iv} T_r^{iv} + \beta_w T_r^w + \beta_{tr} N_r^{tr} + \beta_{rel} \Phi_r, \quad (1)$$

де C_r – узагальнена вартість маршруту r ; T_r^{iv} – час у русі (in-vehicle time) на всіх ділянках маршруту; T_r^w – сумарний час очікування, включно з очікуванням на пересадках; N_r^{tr} – кількість пересадок; Φ_r – показник ненадійності маршруту (ризик); $\beta_{iv}, \beta_w, \beta_{tr}, \beta_{rel}$ – вагові коефіцієнти (параметри оцінки часу/ризик), які можуть бути отримані з моделей дискретного вибору або калібровані на даних.

Для конкретної пересадки k у маршруті r визначимо запланований (розкладовий) стикувальний інтервал:

$$s_{rk} = t_{rk}^{dep} - t_{rk}^{arr} - \tau_{rk}, \quad (2)$$

де t_{rk}^{arr} – розкладовий час прибуття на пересадочний вузол (на попередньому рейсі); t_{rk}^{dep} – розкладовий час відправлення наступного рейсу; τ_{rk} – мінімальний технологічний час пересадки (перехід, контроль, посадка).

Нехай випадкове запізнення попереднього рейсу на пересадці k має розподіл Δ_{rk} з функцією розподілу $F_{\Delta}(\cdot)$. Тоді ймовірність успішного стикування (непропуску пересадки) оцінюється як:

$$p_{rk} = P\{\Delta_{rk} \leq s_{rk}\} = F_{\Delta}(s_{rk}), \quad (3)$$

де $p_{rk} \in [0, 1]$ – імовірність встигнути на пересадку k у маршруті r .

Для маршруту з кількома пересадками сумарну надійність можна агрегувати, наприклад, як імовірність успіху всіх стикувань:

$$P_r = \prod_{k \in \mathcal{K}_r} p_{rk}, \quad (4)$$

де \mathcal{K}_r – множина пересадок у маршруті r ; P_r – імовірність виконання всіх пересадок.

Як показник ризику Φ_r у формулі (1) можна використати штраф за ненадійність у логарифмічній формі:

$$\Phi_r = -\ln(P_r), \quad (5)$$

де Φ_r зростає при зменшенні P_r , тобто при погіршенні надійності стикувань.

Графічна інтерпретація залежності імовірності стикування від запасу часу на пересадку (формула (3)) наведена на рис. 3.

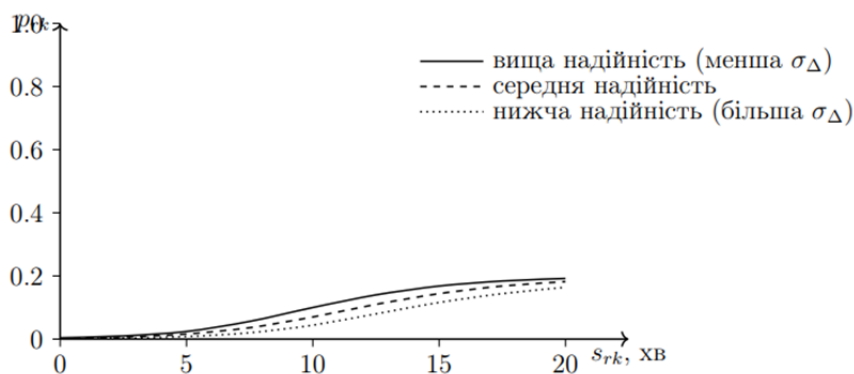


Рисунок 3 – Вплив запасу часу на пересадку s_{rk} на імовірність стикування $p_{rk} = F_{\Delta}(s_{rk})$

Джерело: розроблено автором

Рисунок 3 пояснює зміст формули (3): зі збільшенням запасу часу на пересадку s_{rk} зростає імовірність успішного стикування p_{rk} . Три криві відображають різні рівні надійності (різну варіативність запізнень σ_{Δ}): за меншої дисперсії запізнень заданий запас часу забезпечує більшу імовірність стикування, що безпосередньо впливає на ризикову складову Φ_r та вибір маршруту.

Для ілюстрації зв'язку між технологічною надійністю та поведінковим вибором маршруту на рис. 4 показано типову залежність імовірності вибору маршруту від різниці узагальнених витрат $\Delta C = C_2 - C_1$ у логіт-моделі (формула (6)).

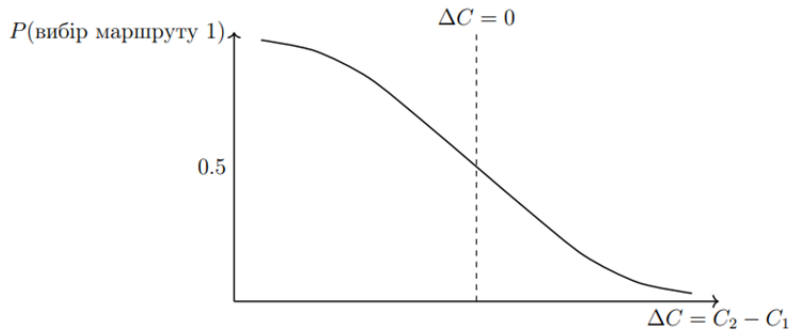


Рисунок 4 – Залежність ймовірності вибору маршруту від різниці узагальнених витрат ΔC у логіт-моделі

Джерело: розроблено автором

На етапі розподілу попиту використовується модель вибору маршруту, наприклад, мультиноміальна логіт-модель. Ймовірність вибору маршруту r для пари (o, d) :

$$P(r | o, d) = \frac{\exp(-\theta C_r)}{\sum_{j \in \mathcal{R}_{od}} \exp(-\theta C_j)}, \quad (6)$$

де $\theta > 0$ – параметр чутливості до узагальнених витрат; C_r – визначається формулою (1).

Тоді очікуваний потік по маршруту r :

$$f_r = q_{od} P(r | o, d), \quad (7)$$

де q_{od} – попит між o та d (кількість пасажирів за період).

Для практичної інтерпретації результатів корисно відображати «профіль навантаження» уздовж мультимодального ланцюжка, який демонструє зміну інтенсивності потоку на ділянках маршруту та перерозподіл у зонах пересадок. Такий профіль зручний для виявлення критичних вузлів, де пересадка найбільше впливає на загальну якість поїздки та формує потребу в координації розкладів.

Для короткострокового прогнозування q_{od} (або потоків на зупинках/лініях) доцільно поєднувати: (1) часові ряди/регресійні моделі, (2) просторово-мережеві моделі на графі мережі, зокрема GNN. Узагальнено прогноз можна подати як:

$$\widehat{q}_{od}(t+h) = \mathcal{F}(x(t), G, u(t)), \quad (8)$$

де $\widehat{q}_{od}(t+h)$ – прогноз попиту на горизонті h ; $x(t)$ – історичні спостереження (AFC/AVL, лічильники); G – структура мережі; $u(t)$ – зовнішні фактори (погода, події, обмеження руху); $\mathcal{F}(\cdot)$ – оператор прогнозування (ARIMA/регресія/ансамблі/нейромережі).

З урахуванням зазначеного, раціональним є комбінований підхід: прогноз \widehat{q}_{od} за формулою (8) використовується як вхід для розкладового (або наближеного частотного) призначення, а ризик стикувань ураховується через P_r у формулах (4)–(5), що впливає на C_r у формулі (1) і, як наслідок, на потоки f_r за формулою (7).

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті дослідження обґрунтовано доцільність інтегрованого підходу до моделювання та прогнозування пасажиропотоків у мультимодальних маршрутних системах, у якому пересадки розглядаються як ключові елементи, що формують узагальнені витрати поїздки та впливають на вибір маршруту. Запропоновано формалізацію надійності розкладів через ймовірність успішного стикування та показано, що включення ризикової складової в узагальнену вартість дозволяє відобразити вплив запізень на перерозподіл потоків. Сформовано технологічну схему розрахунку, яка поєднує оцінювання параметрів

надійності, прогноз попиту та мережевий розподіл пасажирів на основі моделей вибору маршруту.

Перспективи подальших досліджень пов'язуються з (1) поглибленням статистичного моделювання запізень із урахуванням кореляцій між ділянками та видами транспорту, (2) розробленням методів калібрування параметрів поведінкових моделей на основі AFC/AVL та мобільних даних, (3) інтеграцією оптимізації розкладів і синхронізації пересадок із прогнозними моделями попиту та показниками надійності для підвищення стійкості мультимодальних перевезень.

Список літератури

1. Wardman M. Public transport values of time. *Transport Policy*. 2004. Vol. 11, No. 4. P. 363–377. DOI: 10.1016/j.tranpol.2004.05.001.
2. Van Oort N. Incorporating the impacts of travel time reliability in public transport planning: a review. *Public Transport*. 2015. Vol. 7, No. 2. P. 241–260. DOI: 10.1007/s12469-014-0095-8.
3. Cats O. The value of reliability in public transport: A review and research agenda. *Transport Reviews*. 2016. Vol. 36, No. 1. P. 1–25. DOI: 10.1080/01441647.2015.1052524.
4. Canca D., Zarzo A. Railway timetable robustness: a literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 126. P. 238–262. DOI: 10.1016/j.trb.2019.06.004.
5. Ben-Akiva M., Lerman S. R. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. Cambridge, MA : MIT Press, 1985. 390 p.
6. Prato C. G. Route choice modeling: past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*. 2009. Vol. 2, No. 1. P. 65–100. DOI: 10.1016/S1755-5345(13)70005-8.
7. Spiess H., Florian M. Optimal strategies: a new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1989. Vol. 23, No. 2. P. 83–102. DOI: 10.1016/0191-2615(89)90034-9.
8. Nuzzolo A., Crisalli U., Rosati L. Schedule-based assignment models for public transport networks: a review. *Transportation*. 2001. Vol. 28, No. 1. P. 13–33. DOI: 10.1023/A:1005232115160.
9. Teunter R. H. et al. Robust optimization for railway timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2006. Vol. 40, No. 9. P. 766–785. DOI: 10.1016/j.trb.2005.10.003.
10. Small K. A. The scheduling of consumer activities: work trips. *The American Economic Review*. 1982. Vol. 72, No. 3. P. 467–479.
11. Lam W. H. K. et al. A note on the reliability of travel time. *Transportation Research Part B: Methodological*. 1999. Vol. 33, No. 2. P. 145–155. DOI: 10.1016/S0191-2615(98)00028-2.
12. Li Z. et al. Reliability-based transit assignment: formulation and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2010. Vol. 44, No. 6. P. 757–782. DOI: 10.1016/j.trb.2009.12.011.
13. Gkiotsalitis K., Cats O. Public transport planning adaption under the covid-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*. 2021. Vol. 41, No. 3. P. 374–392. DOI: 10.1080/01441647.2020.1857886.
14. Pelletier M.-P., Trépanier M., Morency C. Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2011. Vol. 19, No. 4. P. 557–568. DOI: 10.1016/j.trc.2010.12.003.
15. Vlahogianni E. I., Karlaftis M. G., Golias J. C. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2014. Vol. 43. P. 3–19. DOI: 10.1016/j.trc.2014.01.005.
16. Zheng Y. et al. Urban computing: concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2014. Vol. 5, No. 3. Art. 38. P. 1–55. DOI: 10.1145/2629592.
17. Wu Z. et al. A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021. Vol. 32, No. 1. P. 4–24. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.2978386.
18. Tsekeris T., Voß S. Public transport demand modelling: A review. *Transport Reviews*. 2011. Vol. 31, No. 1. P. 23–44. DOI: 10.1080/01441641003716611.
19. Derrible S. Network centrality of metro systems. *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7, No. 7. Art. e40575. DOI: 10.1371/journal.pone.0040575.

References

1. Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transport Policy*, 11(4), 363–377. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.05.001>
2. van Oort, N. (2015). Incorporating the impacts of travel time reliability in public transport planning: A review. *Public Transport*, 7(2), 241–260. <https://doi.org/10.1007/s12469-014-0095-8>

3. Cats, O. (2016). The value of reliability in public transport: A review and research agenda. *Transport Reviews*, 36(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1052524>
4. Canca, D., & Zarzo, A. (2019). Railway timetable robustness: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 238–262. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.06.004>
5. Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand*. MIT Press.
6. Prato, C. G. (2009). Route choice modeling: Past, present and future research directions. *Journal of Choice Modelling*, 2(1), 65–100. [https://doi.org/10.1016/S1755-5345\(13\)70005-8](https://doi.org/10.1016/S1755-5345(13)70005-8)
7. Spiess, H., & Florian, M. (1989). Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(2), 83–102. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(89\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90034-9)
8. Nuzzolo, A., Crisalli, U., & Rosati, L. (2001). Schedule-based assignment models for public transport networks: A review. *Transportation*, 28(1), 13–33. <https://doi.org/10.1023/A:1005232115160>
9. Kroon, L. G., Romeijn, H. E., & Zwaneveld, P. J. (2006). Robust optimization for railway timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(9), 766–785. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.10.003> (Примітка: уточнено авторів та том/випуск).
10. Small, K. A. (1982). The scheduling of consumer activities: Work trips. *The American Economic Review*, 72(3), 467–479. [suspicious link removed]
11. Lam, W. H. K., Gao, J. P., Chan, K. S., & Tam, M. L. (1999). A note on the reliability of travel time. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(2), 145–155. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(98\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(98)00028-2)
12. Li, Z., Szeto, W. Y., & Wong, S. C. (2010). Reliability-based transit assignment: Formulation and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(6), 757–782. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.12.011>
13. Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). Public transport planning adaptation under the COVID-19 pandemic crisis: Literature review of research needs and directions. *Transport Reviews*, 41(3), 374–392. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1857886>
14. Pelletier, M.-P., Trépanier, M., & Morency, C. (2011). Smart card data use in public transit: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(4), 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.12.003>
15. Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.005>
16. Zheng, Y., Capra, L., Wolfson, O., & Yang, H. (2014). Urban computing: Concepts, methodologies, and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 5(3), 1–55. <https://doi.org/10.1145/2629592>
17. Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., & Yu, P. S. (2021). A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(1), 4–24. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386>
18. Tsekeris, T., & Voß, S. (2011). Public transport demand modelling: A review. *Transport Reviews*, 31(1), 23–44. <https://doi.org/10.1080/01441641003716611>
19. Derrible, S. (2012). Network centrality of metro systems. *PLOS ONE*, 7(7), Article e40575. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040575>

Kostiantyn Dolia, Assoc. Prof., Dr. tech. sci.

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

Modeling and Forecasting Passenger Flows in Multimodal Route Systems Taking Into Account Transfers and Schedule Reliability

The article considers an approach to forecasting passenger flows in networks with a combination of different modes of transport, where the quality of transfers is determined by the variability of schedule execution. A description of generalized route costs is proposed, taking into account the risk of missing a connection, and a calculation scheme is presented that combines reliability assessment, demand forecasting, and flow distribution in a graph network model. It is shown how reliability parameters affect route selection and flow redistribution.

passenger flows, multimodal transportation, transfers, schedule reliability, forecasting, route selection, graph model

Одержано (Received) 23.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026