

Висновки

Організація доставки вантажів на дворівневих складах з декількома точками переміщення між рівнями потребує системного підходу, який поєднує логістичне планування та методи математичного програмування. Моделі лінійного, мережевого та стохастичного програмування дозволяють оптимізувати витрати, мінімізувати час транспортування й забезпечити стабільність потоків при обмеженій пропускній здатності обладнання. Раціональне використання цих підходів є передумовою підвищення ефективності роботи сучасних логістичних комплексів та їх інтеграції у цифрову інфраструктуру транспортно-складських систем.

Література

1. Breunig, U., Schmid, V., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2016). A large neighbourhood based heuristic for two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 76, 208–225.
2. Yu, V. F., Lin, S. W., Zhou, L., & Baldacci, R. (2023). A fast simulated annealing heuristic for the multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options. *Transportation Letters*, 16(8), 921–932.
3. Li, C., Shi, X. (2024). Optimisation of a multilevel logistics network for prepositioned warehouses under an omni-channel retail model. *Humanit Soc Sci Commun* 11, 970.
4. Vincent F. Yu, Panca Jodiawan, Shih-Wei Lin, Winy Fara Nadira, Anna Maria Sri Asih & Le Nguyen Hoang Vinh. (2024) Using Simulated Annealing to Solve the Multi-Depot Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Window and Self-Delivery Option. *Mathematics* 12:3, pages 501.
5. Hemmelmayr, V. C., Cordeau, J.-F., & Crainic, T. G. (2012). An adaptive large neighborhood search heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problems arising in city logistics. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3215–3228.

УДК 656.072

АЛГОРИТМ ГАРАНТОВАНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ВИПАДКОВИХ МАТРИЦЬ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ

Цинь Сясюань, здобувачка третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail:
xiaoxuan@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3736-619X>.

Проблема відтворення реального стану пересувань населення з використанням громадського транспорту (ГТ) завжди була складною через неоднорідність і неточність вхідних даних, а також через те, що фіксація кожного окремого пересування між транспортними районами при проведенні спостережень неможлива. Традиційні методи побудови матриць пасажирських

кореспонденцій (МПК), до яких належать гравітаційні та ентропійні моделі, здебільшого формують лише одну матрицю, що відповідає певним усередненим характеристикам системи. Проте реальний попит на пересування населення є багатоваріативним і залежить від численних випадкових факторів, тому єдиний варіант матриці кореспонденцій (МК) не може відобразити попит на пересування пасажирів ГТ. Це породжує необхідність переходу до інтервальної концепції (ІК) моделювання потреб населення у пересуваннях, яка дозволяє врахувати невизначеність і випадковість процесу пересування, представивши не одну, а множину можливих МПК [1-3].

У межах ІК постає завдання створення не будь-яких, а таких випадкових МК, які задовольняють відомі обмеження. При цьому надзвичайно важливою є властивість гарантованості генерації. Просте випадкове заповнення елементів матриці за рівномірним законом часто призводить до тупикових ситуацій, коли накладені обмеження роблять подальше заповнення неможливим, або до утворення матриць, що не відображають реально допустимих станів транспортної системи [4]. Це зумовлює необхідність алгоритмічного підходу, в якому поєднано випадковість і контроль сумісності обмежень.

Сенс запропонованого підходу полягає у введенні поняття потенціалу для кожної комірки матриці та для кожного обмеження. Потенціал кореспонденції визначається як максимально можливе значення, яке може бути присвоєне даній комірці з урахуванням усіх наявних обмежень. Потенціал обмеження визначається як відношення суми потенціалів комірок, що формують це обмеження, до поточного значення самого обмеження. Така інтерпретація дає змогу відслідковувати життєздатність кожного обмеження у процесі заповнення матриці. Якщо потенціал більше одиниці, це означає, що обмеження виконується із запасом, і заповнення може продовжуватися випадково. Якщо потенціал дорівнює одиниці, то обмеження балансує на межі, і подальше виконання можливе лише у разі цілеспрямованого вибору значень. Якщо ж потенціал стає меншим за одиницю, це означає, що дане обмеження виконати вже неможливо, і система опинилася у тупиковій ситуації.

Алгоритм гарантованої генерації працює таким чином, щоб вчасно діагностувати наближення до критичних станів і переключатися з випадкового заповнення на цілеспрямоване. Початкові етапи формування МК можуть здійснюватися повністю випадково, що забезпечує різноманітність і варіативність рішень. На проміжних етапах проводиться постійний моніторинг потенціалів. Якщо хоча б одне з обмежень наближається до граничного стану, алгоритм коригує подальше заповнення, звужуючи діапазон допустимих випадкових виборів або переходячи до повністю детермінованого призначення значень у тих комірках, що забезпечують виконання критичних обмежень. Такий підхід дозволяє уникнути ситуацій, коли після кількох кроків стає зрозуміло, що матрицю вже неможливо побудувати правильно, і вся попередня робота виявляється марною.

Особливу складність становить формалізація обмежень. Вони можуть бути одиничними, коли окрема комірка не може мати жодного значення, наприклад, у випадку відсутності сполучення між транспортними районами.

Обмеження також можуть бути груповими, коли відомі суми всіх поїздок із певного транспортного району або до нього, сумарні навантаження на окремі ділянки транспортної мережі чи розподіл поїздок за відстанями. Для зручності обмеження організуються у багат шарову структуру. Кожен шар відповідає певному типу умов, і при цьому кожна комірка МК може належати одразу кільком шарам. Така організація дозволяє системно відстежувати вплив будь-якої зміни на стан МК усіх пов'язаних обмежень.

Щоб уникнути надмірної жорсткості та забезпечити життєздатність алгоритму, вводяться поняття фіктивних обмежень і граничних параметрів. Фіктивні обмеження дозволяють зберегти баланс у структурі навіть у разі неповних вхідних даних. Граничні параметри, зокрема максимально допустима кількість повторних спроб випадкового заповнення чи обмеження на значення окремих кореспонденцій, визначають межі адаптивності алгоритму. Якщо випадковий процес надто часто заходить у глухий кут, активується стратегія цілеспрямованого заповнення. Якщо ж навпаки обмеження дозволяють широкий простір можливостей, алгоритм залишає більшу частку випадковості, забезпечуючи варіативність результатів.

Також важливим є те, що модуль генерації може бути інтегрований у ширші програмні комплекси транспортного планування, де він виконуватиме роль джерела множини альтернативних МК. Ці матриці далі можуть використовуватися у транспортних моделях, розрахунках навантаження мережі, прогнозуванні заторів чи оптимізації маршрутів ГТ. Наявність множини можливих МК, а не лише однієї, дає змогу оцінювати стабільність транспортних рішень у різних сценаріях і враховувати ризики, пов'язані з невизначеністю попиту.

Розробка алгоритму гарантованої генерації випадкових МПК є важливим кроком у розвитку інтервального підходу до моделювання попиту на перевезення. Він поєднує у собі випадковість, яка відображає реальну варіативність поведінки пасажирів, та контроль за виконанням обмежень, що гарантує коректність результатів. У перспективі алгоритм може бути вдосконалений шляхом формалізації процесу зміни потенціалів у ході генерації МК.

Висновки

Використання потенціалів для оцінки життєздатності обмежень дозволяє своєчасно діагностувати загрози виникнення тупикових ситуацій при генерації випадкових МК і уникати їх. Алгоритм гарантованої генерації забезпечує баланс між необхідною випадковістю та дотриманням усіх умов, що робить його ефективним інструментом у рамках ІК моделювання попиту. Його використання дає змогу формувати множини МПК, які краще відображають реальні процеси пересування населення і дозволяють більш обґрунтовано планувати розвиток транспортних систем. Враховуючи зростаючу складність і динамічність міських транспортних систем, запропонований підхід є

перспективним і може стати основою для нових поколінь інструментів транспортного планування.

Література

1. Любий Є.В., Ковцур К.Г., Цинь Сяосюань Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2024. № 2(23) (2024). С. 152-158. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>.

2. Цинь С., Любий Є.В. Теоретичне обґрунтування результатів генерації матриць пасажирських кореспонденцій випадковим методом. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2025. № 1(24), 438-446. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1751>.

3. Цинь С., Любий Є.В. Аналіз існуючих методів формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях. Центральнотраїнський науковий вісник. Технічні науки, 2025. № 11(42), Частина 2, 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).

4. Івахнік В.С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. Вісник ВПІ. 2022. 6. С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.

УДК 656.1

ВОДНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ У ТРАНСПОРТІ: РЕАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ ДЛЯ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО ПЕРЕХОДУ

Чижик Віталій Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри транспортних систем і логістики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, e-mail: chyzhyk88@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0518-5246

Стешенко Віктор Володимирович, магістр,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: Steshenko.viktor41@gmail.com

Сучасний етап розвитку енергетики та транспорту характеризується пошуком нових, екологічно чистих і ефективних рішень, здатних забезпечити сталий розвиток економіки. У цьому контексті дедалі більшої уваги набувають водневі технології, які в усьому світі розглядаються як основа енергетики майбутнього. Водень має унікальні властивості – високу енергетичну щільність, універсальність використання та відсутність шкідливих викидів під час згоряння, що робить його перспективним енергоносієм для транспортної галузі.

В умовах глобального курсу на декарбонізацію, що закріплений у Європейській зеленій угоді (European Green Deal), країни світу активно інвестують у створення водневої інфраструктури. Європейський Союз у 2020