

Цинь Сяосюань, Є. В. Любий, доц., канд. техн. наук

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

e-mail: lion_khadi@ukr.net

Теоретичні засади побудови алгоритму гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій

У статті розглядається проблематика формування матриць пасажирських кореспонденцій в рамках інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. Запропоновано метод поетапної генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій, який враховує групові та одиничні обмеження, і введено поняття потенціалу для оцінки можливості реалізації заданих обмежень. Описано алгоритм, що дозволяє уникати тупикових ситуацій у процесі моделювання матриць пасажирських кореспонденцій та забезпечує надійну реалізацію інтервального підходу до прогнозування попиту на перевезення пасажирів.

громадський транспорт, інтервальна концепція, матриця кореспонденцій, пасажирські перевезення, транспортний попит

Постановка проблеми. Формування моделей попиту на пасажирські пересування населення, з позиції вибору і використання технології їх створення, є доволі складною задачею, що полягає у необхідності точної реконструкції обсягів переміщень пасажирів між усіма парами транспортних районів (ТР) міста в умовах неповноти, неоднорідності та високої динаміки вхідних даних. Побудова таких моделей – матриць пасажирських кореспонденцій (МПК) – передбачає встановлення кількісних зв'язків між зонами походження і призначення поїздок, але головне технологічне ускладнення полягає в тому, що ці зв'язки неможливо безпосередньо спостерігати в повному обсязі – вони мають відновлюватися за допомогою різних непрямих методів, моделей і припущень [1-3].

З точки зору опису потреб населення у пересуваннях, інтервальна концепція (ІК) моделювання попиту [4] має істотні переваги перед традиційними підходами представлення МПК, оскільки дає змогу більш точно і гнучко враховувати різноманітність і варіативність поведінки пасажирів, обмежену достовірність вхідних даних та інші властивості транспортного процесу. Реальні транспортні потреби населення на пересування не є фіксованими (сталими) – вони формуються під впливом широкого кола факторів: соціально-економічного статусу, мети поїздки, сімейного стану, індивідуальних звичок, доступності транспортних альтернатив і навіть психоемоційного стану. У цьому контексті спроба представити попит у вигляді одного точного значення (стану) часто призводить до спотворень і втрати значної частини реальної поведінкової інформації.

Головною перевагою ІК моделювання попиту [4] є здатність не фіксувати попит як єдине точне значення МПК, а відображати його у вигляді інтервалу можливих станів матриць кореспонденцій (МК), що охоплює природну змінність і неточність, властиву реальним транспортним процесам. При цьому, одним із ключових, у межах інтервальної концепції, питань залишається проблема формування сукупності МК між граничними їх станами, які б створювались за умов повної випадковості та враховували обмеження, що накладаються у процесі генерації МПК [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі моделювання потреб населення на пересування системою громадського транспорту, з прив'язкою до різних об'єктів (місто, приміське сполучення, адміністративний район міста, територіальна громада) присвячено величезну кількість робіт, у яких, в основному, пропонується використання традиційних методів формування МПК – гравітаційної та/або ентропійної моделі, в класичному їх вигляді або ж із модифікаціями. Серед українських фахівців уваги заслуговує досвід науковців Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ), якими розроблено низку методів формування МПК [4-6] для різних категорій міст. Представлені методи формування МПК пройшли апробацію на низці об'єктів і підтвердили свою працездатність [7-11]. Детальний аналіз літературних джерел за обраною тематикою представлено в роботі авторів цього дослідження [3].

Стосовно питання розробки методів випадкової генерації МПК, то тут слід відзначити одну із перш спроб [12], результати якої не можуть гарантувати якісного результату за умов накладання додаткових обмежень при моделювання МК, а також дослідження авторів цієї статті [1, 2], якими на даному етапі проводиться розробка відповідної комп'ютерної програми, що базуватиметься на представлених у цій статті положеннях.

Постановка завдання. Основним, і принципово важливим для досягнення поставленої мети – створення методу гарантованої генерації випадкових матриць, проблемним питанням є забезпечення алгоритмічної можливості передбачення тупикових ситуацій, які виникають внаслідок накладання додаткових обмежень на неї. Іншим важливим питанням є забезпечення в процесі генерації максимальної випадковості значень кореспонденцій у результуючих матрицях, еталоном якої є розподіл кореспонденцій, які отримуються базовим методом подвійної генерації чергової позиції в матриці для заповнення і власне значення кореспонденції за допомогою рівномірного розподілу [1, 2]. Отже, основною задачею даного дослідження є розробка теоретичних принципів, на яких базуватиметься алгоритм гарантованої генерації випадкових МПК.

Виклад основного матеріалу. Відхід від максимальної випадковості значень кореспонденцій у методі поетапної генерації МПК обумовлений двома його властивостями. По-перше, підсумкові кореспонденції в загальному випадку є сумою рівномірно розподілених випадкових величин, а не однією такою величиною, яка отримується при використанні базового методу генерації. По-друге, за умови завчасного виявлення на деякому етапі генерації неможливості випадковим чином заповнити матрицю на наступних її етапах, виконавши при цьому всі додаткові обмеження, частина кореспонденцій має заповнюватися спрямовано (примусово), а не випадково.

Друга властивість даного методу, як це вже підкреслювалося раніше, є об'єктивною причиною, уникнути якої неможливо при намаганні досягти гарантованого результату генерації МПК за наявності додаткових обмежень. Тобто, власне поява цих обмежень вже сама по собі тягне певну втрату випадковості значень кореспонденцій внаслідок появи додаткових зв'язків між ними. Аналогічне явище в математичній статистиці відображається у врахуванні кількості ступенів свободи при визначенні критеріїв узгодження [13]. Але внаслідок складної перехресної структури цих обмежень на матричній об'єкт, які обумовлені планувальними і транспортними властивостями конкретного міста (або інших територій), аналітичний спосіб встановлення залежності між параметрами розподілу значень кореспонденцій і

кількістю додаткових обмежень на її формування, виглядає неперспективним. У цьому питанні ще не накопичений достатній обсяг знань задля формулювання аксіом, висування гіпотез і подальшої формалізації шуканих взаємозв'язків. Тому, як задача даного дослідження у цьому напрямі, приймається експериментальна оцінка впливу кількості обмежень на характеристики розподілу значень кореспонденцій, яка допоможе виявити вплив додаткових обмежень на значення кореспонденцій і створити основу для подальших досліджень властивостей моделей попиту.

Що стосується першої властивості методу поетапної генерації МПК, то вона вже не має характеру об'єктивно існуючої, оскільки породжується самим методом, і тому має бути оцінена не лише експериментально, а обов'язково аналітично, що дозволить отримати загальну характеристику даного методу для будь-яких умов його застосування. При цьому слід враховувати, що генерація випадкової матриці будь-яким методом, включаючи базовий, обтяжена деякими обмеженнями, у мінімальному випадку – місткостями ТР з відправлення і прибуття. Це приводить до того, що лише деяка частина з кореспонденцій навіть у базовому методі заповнюється вільно, без впливу на них вже заповнених значень кореспонденцій, який в основному полягає у зменшенні початкових значень місткостей після призначення попередніх кореспонденцій, що зменшує праву межу рівномірного розподілу в процесі генерації. Ця вільність є також відносною, оскільки кореспонденції обмежені початковими місткостями ТР з відправлення і прибуття, але на початку процесу генерації вони є єдиним обмеженням, що забезпечує можливість для аналітичного опису розподілу згенерованих випадкових значень кореспонденцій.

Спроба описати розподіл всіх кореспонденцій у матриці можлива при дуже обмеженій кількості ТР у моделі попиту, але заздалегідь приречений на невдачу при розгляді реальних задач, внаслідок дуже високої кількості і комбінаторній природі зв'язків між елементами матриць. З іншого боку, завдання порівняння результатів генерації матриць різними методами не супроводжується обов'язковою вимогою щодо повного охоплення всіх кореспонденцій при порівнянні. Для отримання уявлення про різницю в значеннях кореспонденцій, які виникають внаслідок застосування методу поетапної генерації замість базового методу, цілком достатнім є порівняння характеристик тих значень кореспонденцій, які спираються на лише початкові значення місткостей ТР. Цього уявлення буде достатньо для формулювання висновків щодо особливостей методу поетапної генерації і можливості його застосування при реалізації ІК моделювання попиту.

Повертаючись до основного питання гарантованої генерації МПК – забезпечення алгоритмічної можливості передбачення тупикових ситуацій, які виникають внаслідок накладання додаткових обмежень на неї, доцільно уважно проаналізувати ці обмеження. З накопиченого кафедрою транспортних систем і логістики ХНАДУ досвіду можливо зробити висновок, що на МК накладаються два види обмежень, які вже згадувалися раніше: одиничні та групові.

Без втрати загальності, перші зводяться до заборони заповнення деякої частини матриці позитивними значеннями. Виходячи з накопиченого досвіду, ці обмеження виникають при генерації рейсових МПК за результатами табличних обстежень пасажиропотоків [5]; при розгляді лише транспортних пересувань у великих територіальних об'єктах; при наявності відомих зі сторонніх джерел постійних значень частини кореспонденцій в МК. Вони є найпростішим варіантом обмежень і мають розглядатися як базові, тому при їх наявності, постійно діючі обмеження на відомі місткості ТР з відправлення і прибуття мають вважатися додатковими. Такий підхід

дозволить узагальнити характер додаткових обмежень, відносячи до них всі можливі варіанти групових обмежень, так як місткості ТР є саме такими обмеженнями.

Іншими варіантами групових обмежень є відомі для об'єкту пасажиропотоки або розподіл дальності пересувань. Різниця між ними і одиничними обмеженнями полягає в тому, що всі вони є відомою сумою деяких кореспонденцій, об'єднаних загальною ознакою, із заздалегідь відомим значенням. Тобто, місткість ТР з відправлення – це сума всіх кореспонденцій, які відправляються з даного ТР, а місткість ТР з прибуття – сума всіх кореспонденцій, які прибувають до даного ТР. Відомий за обмеженнями пасажиропотік на окремій ділянці вулично-дорожньої мережі – це сума тих кореспонденцій, які прямують через неї. Відома з функції розселення частота пересувань на деякий діапазон відстаней – це сума всіх кореспонденцій, відстань пересувань для яких потрапляє до цього діапазону (теж саме стосується і розподілу поїздок за часом пересування). Таким самим чином можливо описати і будь-які інші групові обмеження, які можуть з'являтися в конкретних випадках за умови наявності додаткових даних стосовно об'єкта дослідження. Всі вони будуть сумами окремих кореспонденцій, виділених з матриці за відповідною ознакою, оскільки інші дії при створенні матриць з кореспонденціями неможливі за їх фізичним сенсом. Звичайно, що в даному описі зроблене суттєве припущення щодо однозначної належності кореспонденцій до якогось обмеження, що на практиці може не завжди виконуватися у випадку пасажиропотоків. Але для них існує можливість об'єднання у групи пасажиропотоків з однозначним набором кореспонденцій, які прямують через відповідні ділянки, а ті випадки, для яких таке об'єднання неможливо внаслідок особливостей території або недостатнього обсягу досліджень, існує принципова можливість врахувати декілька можливих шляхів для однієї кореспонденції через відповідні часткові коефіцієнти, що можна зробити в рамках загального алгоритму.

Така властивість групових обмежень надає можливості для їх зручної алгоритмізації протягом процесу генерації, для цього необхідно виділити під кожне обмеження окремий шар, упорядкувати обмеження за деякою ознакою і створити матрицю належності кожної кореспонденції до відповідного обмеження. При цьому не обов'язково, щоб усі кореспонденції були розподілені між обмеженнями даного шару, але це важливо для алгоритму розрахунків. Тому, якщо шар обмежень охоплює не всі кореспонденції в матриці, а це може стосуватися в першу чергу пасажиропотоків, останнім обмеженням у шарі необхідно вказати фіктивний шар зі значенням обмеження, рівним сумі всіх кореспонденцій у МК. Тоді кожна кореспонденція прив'язується до якогось обмеження у шарі і на початку генерації може приймати будь-яке значення, яке не перевищує величину відповідного обмеження в даному шарі. Такі дії зі всіма шарами надають кожній кореспонденції її максимально можливе значення, яке доцільно розглядати як її потенціал у ході розрахунків. Цей потенціал є узагальненням величини правої границі рівномірного розподілу кореспонденції [1]

$$Y = \min(D_i; A_j), \quad (1)$$

де D_i – місткість ТР i з відправлення, пас.; A_j – місткість ТР j за прибуттям, пас.

Сума потенціалів кореспонденцій, які належать до конкретного обмеження надає потенціал всього обмеження, який для сумісної системи обмежень на початку розрахунків має перевищувати відому величину обмеження. Під час процесу генерації, після виконання його чергового етапу, згенеровані випадкові кореспонденції зменшують як потенціали обмежень, так і їх величини. Наближення зверху потенціалу обмеження до його величини означатиме наближення до тупикової ситуації. Якщо

потенціал обмеження дорівнює його величині, необхідно перейти від випадкової генерації до спрямованої і замінити значення кореспонденцій їх не нульовими потенціалами.

Розробка методу виконання заданих обмежень при випадковому заповненні МК базується на припущенні про те, що всі обмеження на формування матриць мають вид простої (незваженої, невиваженої – середня арифметична) суми різних наборів кореспонденцій. Цій умові відповідають усі відомі на даний момент обмеження для значень кореспонденцій, що описані у друкованих працях. Необхідною умовою для розробки шуканого методу також є принципова сумісність усіх обмежень, тобто наявність хоча б одного варіанту МК, в якому всі обмеження виконуються. Для його виконання у реальних задачах, з матрицями великих розмірів, на стадії побудови системи обмежень, може виявитися цілком достатнім відстежити, щоб не порушувалася логічна відповідність між різними умовами формування МК. Наприклад, врахування у МК заданої функції розселення навряд чи буде протирічити відомим місткостям ТР для реальної матриці дальності або часу поїздки. Однак на початку і у ході процесу заповнення МК все ж необхідно перевіряти задані обмеження на їх сумісність.

Метод послідовного заповнення матриці надає можливості для оцінювання поточного стану матриці після виконання чергового етапу заповнення. Для проведення такого оцінювання необхідно відшукати показник, що вказуватиме на те, що внаслідок випадковості вибору елементів МК, на наступному етапі заповнення матриці можуть реалізовуватися такі варіанти, котрі не дозволять у подальшому виконати всі задані обмеження. У загальному випадку, внаслідок всієї тієї ж випадковості, такі варіанти можуть реалізовуватися і безпосередньо при формуванні поточного варіанту МК, що треба вміти завчасно запобігати. Крім того, такий показник потрібен для перевірки заданих обмежень на їх сумісність, тому він повинен забезпечувати максимально широкі можливості для оцінювання перспектив заповнення МК на кожному етапі, включаючи початковий.

Можливості для виконання кожного із заданих обмежень визначаються тим, які значення можуть прийняти комірки МК, котрі формують відповідні умови. А значення цих комірок, у свою чергу, визначаються тим, які резерви для заповнення МК залишилися у кожному обмеженні. Ці резерви дорівнюють поточному значенню обмеження перед черговим етапом заповнення МК. Величина кореспонденції у комірці МК, котра заповнюється на поточному етапі, не може перевищувати жодного з обмежень, які відносяться до неї, що дозволяє визначити на кожному етапі заповнення максимально можливі значення кореспонденцій для всієї матриці. Ці максимуми, за своїм сенсом, представляють собою потенціал для заповнення комірок матриці. Сума визначених таким чином потенціалів кореспонденцій, котрі відповідають кожному обмеженню, буде представляти його потенціал, тобто можливість виконання кожного обмеження. При цьому інтерес представляє собою не стільки абсолютні потенціали, скільки їх відносні значення, оскільки вони забезпечують більшу видимість небезпеки невиконання обмежень і враховують поточне значення обмежень у знаменнику відношення.

Тому, для оцінювання станів МК, з точки зору можливості їх подальшого заповнення, для кожного обмеження доцільно ввести поняття відносного потенціалу, котрий у подальшому іменуватиметься «потенціал обмеження». У відповідності з висунутими до нього вимогами, він представляє собою відношення можливостей по

заповненню у поточному варіанті матриці тих комірок, сума яких складає відповідне обмеження, до поточного значення самого обмеження

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} p_i}{r_k}. \quad (2)$$

де P_k – потенціал k -го обмеження, $P_k \geq 0$; p_i – потенціал i -ї комірки МК, яка є елементом k -го обмеження, $p_i \geq 0$; N_k – кількість комірок МК, які є елементом k -го обмеження; r_k – резерв k -го обмеження, тобто його поточне значення перед початком чергового етапу заповнення МК.

Потенціал комірок МК, у свою чергу, визначатиметься її максимально можливою величиною, виходячи з поточних значень обмежень

$$p_i = \min(\forall r_i). \quad (3)$$

де r_i – потенціал i -го обмеження, елементом якого є i -а комірка МК.

Визначений таким чином потенціал достатньо повно характеризує можливості для заповнення МК з урахуванням заданих обмежень. При цьому його значення $P_k > 1$ означатиме, що виконання k -го обмеження можливе на наступному етапі заповнення МК. Значення $P_k = 1$, відповідатиме ситуації, коли для виконання k -го обмеження залишився лише один варіант – цілеспрямоване заповнення відповідних йому комірок з ненульовими потенціалами максимально можливими значеннями.

Менше значення потенціалу, $0 \geq P_k \geq 1$, буде означати, що на попередньому етапі заповнення, МК прийшла до такого стану, коли виконання k -го обмеження на наступних етапах заповнення стало неможливим. У цьому випадку необхідно повернутися до попереднього варіанту матриці та обрати один із двох способів усунення проблеми – або ж знову намагатися заповнити її випадковим чином, у розрахунку на те, що новий варіант заповнення МК вже не приведе до таких значень потенціалів обмежень; або ж діяти так само, як й за умови $P_k = 1$, лише з тією різницею, що заповнювати цілеспрямовано тут потрібно не всі ненульові комірки, а лише їх частину і необов'язково максимально можливими значеннями.

За умов використання першого способу процес заповнення МК може затягнутися невиправдано надовго, та й узагалі не вирішити проблему, оскільки усунення проблеми неможливості виконання одного обмеження, може привести до її появи в інших обмеженнях. А це означатиме, що поставлена задача отримання гарантованого результату при випадковому заповненні МК може не мати рішення в якомусь конкретному випадку.

Другий спосіб приводить до певної втрати випадковості у результатах заповнення, котра буде тим більша, чим частіше він буде застосовуватися. І хоча за обґрунтованих обмежень ця ситуація і є цілком об'єктивною, оскільки елементи МК пов'язані між собою різносторонніми зв'язками, котрі обумовлені діючими обмеженнями, при значенні $P_k > 1$ цілеспрямоване заповнення комірок принципово може бути виконано тільки із застосуванням деякої стратегії їх вибору. Ця проблема не виникає при $P_k = 1$, оскільки тоді існує лише один варіант заповнення, але сподіватися на точне потрапляння потенціалу в 1 у випадковому процесі не приходить. А в міру віддалення від нього, втрати випадковості ставатимуть дедалі більшими. При цьому можливо підвищити ступінь випадковості результатів заповнення МК, шляхом

використання генерації випадкових чисел при виборі потенційних елементів на етапі цілеспрямованого заповнення матриці.

Повний варіант може приводити до помітного збільшення тривалості розрахунків, що особливо проблемним буде у випадку матриць великої розмірності. Тому в алгоритмі, що описується, доцільно використовувати певні проміжні варіанти цілеспрямованого заповнення матриці, у котрих випадковим може бути не весь процес перебору комірок у заповнюваних рядку або стовпчику матриці, або інших наборів елементів МК, що відповідають заданій системі обмежень. Це може бути, наприклад, точка входу в них, з подальшим упорядкованим перебором усіх комірок у розглянутому фрагменті матриці.

У зв'язку з усім вищесказаним, алгоритм випадкового заповнення матриці повинен передбачати встановлення певного граничного (максимального) значення для потенціалів обмежень $\Pi_{\max} > 1$, за якого використовується варіант цілеспрямованого виконання проблемного обмеження. При перевищенні потенціалом цього значення, тобто коли $\Pi_k > \Pi_{\max}$, перевагу слід віддавати повторному випадковому заповненню МК на проблемному етапі, однак при цьому необхідно встановлювати обмеження на кількість повторних спроб заповнення МК для того, щоб зробити процес обчислення кінцевим і перейти до цілеспрямованого заповнення комірок. Передбачити на цьому, попередньому, етапі раціональні значення обох параметрів ($\Pi_{\max}$ і кількості ітерацій на якомусь етапі послідовного заповнення МК) не представляється можливим, тому визначати їх доцільно вже за допомогою експерименту з формування реальних МК, з використанням системи об'єктивних і сумісних обмежень, заснованих на реальних закономірностях транспортного процесу в об'єкті моделювання попиту.

Ще одним важливим керуючим параметром у випадковому процесі заповнення МК є обмеження на максимальну величину кореспонденції, яка назначається на черговому етапі. Чим вище її значення, тим більші зміни відбуваються на кожному етапі заповнення, що найістотнішим чином відбивається на ступені зменшення потенціалів обмежень. Тобто передбачити можливість виникнення ситуацій з неповним заповненням МК гіпотетично стає помітно складніше. З другого боку, підвищення обмеження на значення кореспонденції буде приводити до зростання кількості кореспонденцій з великими значеннями, тобто впливати на їхній розподіл, як основну характеристику випадкової величини. Тому вибір конкретного обмеження у процесі заповнення матриці повинен спиратися на міркування відносно найбільш прийнятного закону розподілу кореспонденцій у МК, виходячи із мети ІК моделювання попиту, котра полягає у забезпеченні максимальної різноманітності випадкових матриць, що генеруються, при виконанні усіх відомих проєктувальнику обмежень на МК. Облік відповідних змін у самому процесі заповнення матриці з точки зору ймовірності появи незакінчених процедур формування МК є вторинним, і повинен просто фіксуватися як факт у ході експериментальних досліджень.

Загалом, введення потенціалів обмежень у розрахунок випадкової МК вже на даному етапі дозволяє зробити попередній висновок про те, що повністю уникнути проблем, які виникають при випадковому заповненні реальних МК з багатовимірною системою обмежень, навряд чи вдасться. Це обумовлено великою кількістю зв'язків між її елементами, котрі реалізуються через встановлені обмеження так, що навіть несумісність обмежень складно діагностувати на початковому етапі моделювання. І чим більше обмежень накладається на МК, тим більш складною стає структура зв'язків між ними, яка визначає значення і швидкість зміни потенціалів. Більш повна формалізація цих процесів, можливо, спроститься після розробки і практичного використання алгоритму послідовного формування випадкової МК, котрий буде

забезпечувати проєктувальника ранньою діагностикою виникаючих у цьому процесі питань і пропонувати відповідні інструменти для їхнього рішення. Однак у даному дослідженні достатнім є створення працюючого механізму випадкового заповнення МК і виробка за допомогою експерименту рекомендацій по раціональним значенням параметрів, керуючих цим процесом. Задача подальшого дослідження потенціалів обмежень і формалізації процесу їх зміни у ході заповнення МК є перспективним варіантом розвитку досліджень у рамках ІК моделювання транспортного попиту.

Висновки. Введення поняття потенціалу для кореспонденції і групових обмежень дозволить передбачити можливість виникнення тупикових ситуацій при генерації випадкових матриць і досягти шуканої мети – безперешкодної реалізації ІК моделювання транспортного попиту.

Розроблена на представлених положеннях комп'ютерна програма гарантованої генерації випадкових МПК повинна стати підґрунтям для експериментального оцінювання працездатності розробленого алгоритму моделювання станів транспортного попиту на пересування пасажирів у рамках застосування ІК моделювання потреб у пересуваннях з урахуванням накладання можливих обмежень.

Список літератури

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. *Центральноукраїнський 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. Горбачов П.Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.01. Харків, 2009. 370 с.
5. Гончаренко С.Ю. Визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в середніх містах : дис. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2015. 182 с.
6. Любий Є.В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Х., 2012. 22 с.
7. Аналіз діючої транспортної мережі м. Конотоп. Проведення обстеження пасажиропотоків. Обробка матеріалів обстеження пасажиропотоків по маршрутах. Розробка заходів щодо оптимізації транспортної мережі м. Конотоп: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0121U112782. Харків, 2021. 124 с.
8. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.
9. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі міста Кіровоград: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0112U00692. Харків, 2012. 115 с.
10. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі м. Олександрія : звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0113U005179. Харків, 2013. 130 с.
11. Моделювання та аналіз маршрутної мережі громадського транспорту міста Нікополя: звіт про НДР (заклучний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0115U004775. Харків, 2015. 197 с.
12. Івахнік В.С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту. *Вісник ВПІ*. 2022. 6 (2022). С. 57–64. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.
13. Neumann C., Schomaker M., Shalabh Introduction to Statistics and Data Analysis: With Exercises, Solutions and Applications in R. Springer. 2023, 584 P.

References

1. Liubiy, Ye., Kovtsur, K., & Qin, X. (2024). Formulation of the problem of random completion of the OD-matrix. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2(23), 152-158. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>
2. Qin, X., & Liubiy, Ye. (2025). Theoretical justification of the results of passenger correspondence matrix generation using a random method. *Advances in mechanical engineering and transport*. 1(24), 438-446. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1751>.

3. Qin, X., & Liubiyi, 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)
4. Horbachov, P.F. (2009). The concept of forming passenger transport systems in cities. Doctor's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
5. Honcharenko, S.Yu. (2015). *The demand determining for passenger route transport service in the middle cities*. PhD thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
6. Liubiyi, Ye.V. (2012). *Trip demand determination of small towns' population for route passenger transportation*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
7. R&D report 0121U112782. (2021). *Analysis of the existing transport network of Konotop. Conducting a passenger flow survey. Processing of passenger flow survey materials by routes. Development of measures to optimize the transport network of Konotop city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
8. R&D report 0117U006848. (2018). *Development of a comprehensive traffic scheme for the Lutsk city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
9. R&D report 0112U00692. (2012). *Development of a rational variant of the route network in Kirovograd city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
10. R&D report 0113U005179. (2013). *Development of a rational variant of the route network in Oleksandriia city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
11. R&D report 0115U004775. (2015). *Modeling and analysis of the public transport route network in Nikopol city*. Kharkiv: KhNAHU [in Ukrainian].
12. Ivakhnik, V.S. (2022). A New Method for Implementing the Interval Concept of Transport Demand Modelling. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 6 (2022), 57–64. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>
13. Heumann, C., Schomaker, M., Shalabh (2023). *Introduction to Statistics and Data Analysis: With Exercises, Solutions and Applications in R*. Springer.

Xiaoxuan Qin, Yevhen Liubiyi, Assoc. Prof., PhD in Engineering
Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

Theoretical Foundations for the Development of an Algorithm for Guaranteed Generation of Random Passenger Correspondence Matrices

This article is devoted to solving the complex problem of constructing models of passenger travel demand. Given the incomplete, heterogeneous, and variable nature of the available input data, it proposes the use of an interval-based concept for demand modeling. This approach allows for the incorporation of uncertainty, behavioral variability among passengers, and the inherent dynamism of real-world transport processes more accurately and flexibly than traditional methods.

The study focuses particularly on the step-by-step generation of random passenger correspondence matrices under a system of constraints. These constraints may include both individual limitations – such as the prohibition of specific matrix entries – and grouped constraints, such as known total flows between specific transport zones, capacity limits for departure and arrival zones, or other aggregate traffic indicators derived from observations or planning requirements.

To enable consistent generation of such matrices while ensuring compliance with all imposed constraints, the concept of potential is introduced. This concept defines the maximum allowable value that each cell in the correspondence matrix may take at a given stage of the generation process, considering the remaining reserves of each constraint. The article details the structure and logic of the proposed algorithm, which ensures both randomness in matrix generation and strict adherence to the constraints.

The algorithm includes mechanisms for detecting and avoiding deadlock situations that occur when further random filling of the matrix becomes impossible due to conflicting constraints. To address such cases, a filling strategy guided by the computed potentials is developed, enabling the matrix to be completed without violating the model's consistency.

This methodological framework is intended for implementation in a computer-based system that supports transportation planning by generating realistic and diverse sets of passenger correspondence matrices. The results of this research provide both a conceptual and practical foundation for the further formalization of interval-based travel demand models and for enhancing the methods used in the planning and design of urban transportation systems.

public transport, interval concept, correspondence matrix, passenger transportation, transport demand

Одержано (Received) 05.08.2025

*Прорецензовано (Reviewed) 29.08.2025
Прийнято до друку (Approved) 23.09.2025*