

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Цинь Сяосюань

УДК 656.072

ДИСЕРТАЦІЯ

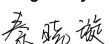
РОЗРОБКА МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ

275 – Транспортні технології (за видами)

27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела

Signed by:
 Цинь Сяосюань
58DCE4541DAB4F6...

Науковий керівник Любий Євген Володимирович, к.т.н., доцент

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Цинь Сяосюань. Розробка методу моделювання пасажирських кореспонденцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)». – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню науково-прикладної задачі удосконалення методів моделювання випадкових станів транспортного попиту на пересування пасажирів у містах шляхом розроблення методу поетапної гарантованої генерації матриць пасажирських кореспонденцій (МПК), використання якого дозволить підвищити точність прогнозів у межах інтервальної концепції (ІК) моделювання транспортних потреб у пересуванні громадським транспортом (ГТ).

Актуальність теми дослідження зумовлена зростанням складності міських транспортних систем (ТС), підвищенням вимог до точності прогнозування попиту на перевезення та необхідністю врахування стохастичної природи пересувань. Сучасні умови функціонування ТС характеризуються варіативністю поведінки користувачів, впливом соціально-економічних, просторових і часових факторів, а також високим рівнем невизначеності вхідних даних. У таких умовах застосування традиційних методів формування матриць кореспонденцій (МК), які передбачають отримання одного розрахункового варіанта матриці, не забезпечує належного рівня адекватності моделей транспортного попиту.

У роботі виконано системний аналіз існуючих методів формування МК, визначено їх переваги, недоліки та межі практичного застосування. Доведено, що традиційні методи не забезпечують належного рівня відтворення випадкової природи попиту на пересування пасажирів, що знижує гнучкість транспортних моделей і обмежує можливості прийняття обґрунтованих

управлінських рішень на основі інформації, отриманої з використанням зазначених методів. Синтетичні (гравітаційні та ентропійні) моделі дозволяють формалізувати процес розподілу попиту, проте не забезпечують формування множини альтернативних станів транспортного попиту. Методи формування вантажних МК у значній мірі є адаптацією пасажирських підходів і не мають самостійної методологічної бази. Також у дисертації обґрунтовано доцільність формування множини допустимих випадкових МК замість одиничного її варіанта. Такий підхід дозволяє враховувати невизначеність і варіативність попиту, підвищує стійкість результатів транспортного моделювання та створює передумови для застосування інтервальної концепції (ІК) моделювання попиту на пересування пасажирів ГТ.

Одним із основних недоліків ІК є відсутність формалізованого інструментарію щодо заповнення діапазону можливих станів транспортного попиту випадковими варіантами МК, на які накладалися б групові обмеження, що характеризують результати транспортного процесу. Базовий метод генерації випадкових МК у цьому випадку є обмеженим і не гарантує успішного результату моделювання матриць за умов накладання додаткових обмежень на їх генерацію матриць.

З метою усунення виявлених недоліків і обмежень розроблено метод гарантованої генерації випадкових МПК, який ґрунтується на принципах інтервального моделювання транспортного попиту, урахуванні одиничних і групових обмежень транспортного процесу, статистичному відтворенні закономірностей розподілу кореспонденцій та забезпеченні максимально можливого рівня випадковості у сформованих матрицях. Метод реалізує поетапний розподіл попиту між транспортними районами (ТР) з урахуванням максимально можливого на сьогоднішній день переліку обмежень на генерацію МПК.

Гарантований характер розробленого методу полягає у забезпеченні виконання заданої системи обмежень із контрольованою величиною допустимих відхилень. У роботі сформульовано критерії прийнятності

згенерованих матриць. Ідеальним вважається варіант, за якого всі обмеження виконуються повністю. Водночас з урахуванням ітераційної природи процесу генерації обґрунтовано допустиму величину нерозподілених кореспонденцій – не більше (0,25–1) % від загального обсягу попиту та не більше 1 % у межах окремих групових обмежень. У роботі доведено, що такі відхилення не призводять до суттєвого викривлення характеристик ТС та можуть розглядатися як статистично несуттєві.

Запропонований метод гарантованої генерації МПК забезпечує збереження високого рівня випадковості сформованих матриць. Доведено, що розподіл величин елементів МК, отриманих із застосуванням розробленого алгоритму, відповідає показниковому закону розподілу (ЗР). Відповідність підтверджено статистичними критеріями згоди Пірсона та Колмогорова–Смирнова. Це свідчить про те, що поетапна процедура не порушує стохастичну природу процесу розподілу попиту, а лише забезпечує його структурну впорядкованість і відповідність заданим обмеженням.

З метою перевірки ефективності запропонованого методу здійснено моделювання множини альтернативних МК за різних значень керуючих параметрів для роботи алгоритму у межах ІК визначення транспортного попиту для системи міського ГТ м. Харкова. Для оцінювання станів згенерованих МПК використано показники транспортної роботи та середньої відстані пересування пасажирів. У результаті встановлено, що найбільш ймовірні значення транспортної роботи з реалізації МПК перебувають у межах [3904482,8;3916649,9] пас.-км, а середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – у межах [8,931;8,959] км.

Результати порівняльного аналізу показали, що застосування розробленого методу забезпечує суттєве звуження інтервалів можливих станів транспортного попиту порівняно з екстремальним теоретичним діапазоном: транспортна робота скорочується у 549 разів (на 99,8 %), а середня відстань пересування – у 545 разів (на 99,7 %). При цьому 76 % згенерованих матриць належать до вузького інтервалу найбільш ймовірних значень транспортної

роботи, що свідчить про стабільність і надійність отриманих результатів.

Отримані у дисертації результати підтвердили доцільність використання ІК моделювання транспортного попиту, яка передбачає формування не одиничної МК, а множини допустимих альтернативних станів. Такий підхід забезпечує більш повне відображення невизначеності транспортного попиту, дозволяє аналізувати спектр можливих сценаріїв розвитку ТС та підвищує стійкість управлінських рішень до змін зовнішніх умов.

Отримані наукові та практичні результати створюють методичне підґрунтя для подальшого розвитку інтервального моделювання транспортного попиту та впровадження розробленого методу у практику транспортного планування в українських і зарубіжних містах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що *вперше* запропоновано метод гарантованої генерації випадкових МК, який, на відміну від існуючих, забезпечує формування заданої кількості допустимих станів транспортного попиту за наявності додаткових, у тому числі групових, обмежень при генерації матриць зі збереженням випадковості заповнення їх елементів і застосуванням механізму попередження тупикових ситуацій при розподілі кореспонденцій.

Отримала подальший розвиток ІК моделювання потреб населення у пересуваннях за рахунок доповнення механізмом формування проміжних станів транспортного попиту всередині допустимого інтервалу, що істотно розширює можливості практичного використання ІК у задачах транспортного планування і моделювання.

Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості використання розробленого методу гарантованої генерації випадкових МК у процесі транспортного планування та моделювання міських транспортних і маршрутних систем за умов обмеженої, неповної або статистично ненадійної вихідної інформації про транспортний попит. Використання отриманих результатів дає змогу здійснювати комплексну оцінку ефективності альтернативних варіантів розвитку ТС з урахуванням випадкового характеру

попиту на пересування, а також підвищувати обґрунтованість управлінських, проєктних рішень у галузі транспортних технологій та оцінювати не лише ефективність, а і надійність їхнього впровадження. Результати дослідження можуть бути застосовані при розробленні та коригуванні комплексних схем транспорту, планів сталої міської мобільності, оптимізації маршрутних мереж ГТ, а також у науково-дослідних і проєктних роботах із використанням сучасних програмних комплексів транспортного моделювання. Положення та висновки дисертаційної роботи доцільно використовувати в освітньому процесі закладів вищої освіти транспортного профілю під час викладання дисциплін, пов'язаних із транспортним плануванням, моделюванням транспортного попиту та аналізом функціонування міських ТС.

Ключові слова: громадський транспорт, закономірності розподілу кореспонденцій, інтервальна концепція, кореспонденція, матриця кореспонденцій, пасажиропотоки, транспортна модель, транспортна система, транспортний попит, транспортні технології.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь С. Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. 2(23). С. 152–158. DOI: <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). С. 438–446. DOI: <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), ч. 2. С. 394–409. DOI: [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. Цинь С., 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. DOI: [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).

5. Цинь С., Любий Є.В. Оцінювання можливостей інтервальної концепції в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2026. 1(96). С. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.22>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Горбачов П. Ф., Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь С. Щодо питання моделювання елементів матриць кореспонденцій в рамках інтервальної концепції формування моделей транспортного попиту // *Напрямки розвитку технологічних систем і логістики в АПВ* : матеріали V-ї Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 23 трав. 2024 р. Харків: ДБТУ. 2024. С. 48–49.

7. Цинь С., Любий Є. Проблеми оцінювання точності моделей транспортного попиту // *Транспортні системи та технології* : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 15–16 трав. 2025 р. Львів: НУ «Львівська політехніка». 2025. С. 124–126.

8. Цинь С. Існуючі метрики оцінки подібності матриць пасажирських кореспонденцій // *Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 22 трав. 2025 р. Харків: ДБТУ. 2025. С. 106–109.

9. Цинь С. Алгоритм гарантованої генерації випадкових матриць кореспонденцій // *Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025' (MAITRI 2025)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 30–31 жовт. 2025 р. Харків: ХНАДУ. 2025. С. 411–414.

10. Qin X. Problems of modeling passenger correspondence matrices // *Сучасні технології промислового комплексу – 2025* : матеріали IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон-Хмельницький, 17–19 верес. 2025 р. Херсон-Хмельницький: ХНТУ. 2025. С. 249–251.

11. Qin X., Orhina A. Analysis of synthetic models for forming matrices of passenger correspondence // *Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом* : матеріали VI-ї Міжнар. наук.-прак. конф., м. Харків, 18–19 листоп. 2025 р. Харків: ХНАДУ. 2025. С. 64–68. DOI: 10.61718/in202512.01.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

12. Любий Є. В., Цинь С. Моделі прогнозування вантажного транспортного попиту // *Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 22–23 жовт. 2024 р. Харків: ХНАДУ. 2024. С. 323–326.

13. Цинь С., Любий Є. В., Мосьпан В. М. Чотирьохетапна модель розрахунку вантажного транспортного попиту // *Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 25–26 листоп. 2024 р. Харків: ХНАДУ. 2024. С. 178–180.

ABSTRACT

Qin Xiaoxuan. Development of a Method for Modelling Passenger Correspondence. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 275 «Transport Technologies (by modes)». – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The thesis is devoted to solving the scientific and applied problem of improving methods for modelling random states of urban passenger transport demand by developing a method for step-by-step guaranteed generation of passenger trip matrices. The use of this method enables increased forecasting accuracy within the framework of the interval concept of public transport travel demand modelling.

The relevance of the research topic is supported by the increasing complexity of urban transport systems, the growing need for accurate transport demand

forecasting, and the need to account for the stochasticity of travel behaviour. Modern transport systems' operation is characterised by variability in user behaviour, the influence of socio-economic, spatial, and temporal factors, and a high level of uncertainty in input data. Under such conditions, the use of traditional methods for obtaining trip matrices that result in a single matrix does not ensure the reliability of the transport demand model.

The thesis presents a systematic analysis of existing trip matrix calculation methods, identifying their advantages and disadvantages, as well as the limitations in practical application. It is proven that traditional approaches do not adequately capture the stochastic nature of passenger travel demand, thereby reducing the flexibility of transport models and limiting the potential for grounded managerial decision-making. Synthetic (gravity and entropy-based) models formalise the demand distribution process but do not enable the formation of multiple alternative demand states. Methods for estimating freight origin-destination matrices are, in most cases, adaptations of passenger approaches and lack an independent methodological background. The thesis substantiates the feasibility of generating a set of admissible random trip matrices instead of a single matrix state. This approach allows consideration of demand uncertainty and variability, increases the robustness of modelling results, and lays the grounds for implementing the interval concept in public transport demand modelling.

One of the main shortcomings of the interval concept is the lack of a formalised tool for estimating the range of possible states of the random trip matrix, subject to group constraints characterising transport process results. In this regard, the basic method for generating random trip matrices is limited and does not guarantee successful matrix formation when additional constraints are imposed.

To eliminate the identified shortcomings and limitations, a method for guaranteed random generation of passenger trip matrices was developed. The method is based on the principles of interval demand modelling, consideration of specific and group constraints imposed by the transport process, statistical representation of trip patterns, and ensuring the highest possible randomness in the

generated matrices. The method implements a step-by-step distribution of demand between origin-destination pairs, taking into account the most feasible set of constraints for generating passenger trip matrices.

The guarantee of obtaining admissible results using the developed method is ensured by compliance with a predefined system of constraints with a controlled level of permissible deviations. Also, the thesis formulates the criteria for the acceptability of generated matrices, and an ideal case is when the matrix meets all the constraints used. However, taking into account the iterative process of matrix generation, an admissible share of undistributed trips is substantiated – no more than (0.25–1) % of total demand and no more than 1 % within individual group constraints. It is proven that such deviations from total demand do not cause significant distortion in the estimation of transport system performance parameters and can be considered statistically insignificant.

The proposed guaranteed passenger trip matrices generation method preserves a high degree of randomness in the resulting matrices. It is demonstrated that the number of trips distributed among matrix cells obtained using the developed algorithm follows an exponential distribution. This was confirmed using Pearson's chi-square and Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit tests. These findings indicate that the step-by-step algorithm does not violate the stochastic nature of demand distribution but ensures its structural consistency and compliance with imposed constraints.

To verify the effectiveness of the proposed method, a set of alternative trip matrices was generated under different control parameter values within the interval concept framework for estimating transport demand for the Kharkiv public transport system. Transport performance parameters and average passenger trip length were used to evaluate the generated passenger trip matrices. The most probable values of passenger-kilometres appeared to be within the range of [3904482.8;3916649.9], and the average trip length – within the range of [8.931;8.959] km.

Comparative analysis showed that the use of the developed method significantly reduces the range of possible transport demand states compared to its

full range: passenger-kilometres can be reduced by 549 times (99.8 %), and average trip length by 545 times (99.7 %). Moreover, 76 % of the generated matrices fall within the narrow range of the most probable passenger-kilometres, confirming the stability and reliability of the results.

The dissertation's findings confirm the feasibility of applying the interval concept in transport demand modelling, which implies generating not a single trip matrix but a set of admissible alternative matrices. This approach ensures a more comprehensive coverage of demand uncertainty, enables analysis of a list of possible scenarios for transport system development, and increases the robustness of management decisions in a dynamic environment.

The scientific novelty of the obtained results is as follows: for the first time, a method for guaranteed generation of random trip matrices which, in contrast to known approaches, ensures obtaining a specified number of admissible transport demand states under additional group constraints while preserving randomness in distributing trips among matrix cells and introducing the mechanism to prevent dead-end situations during trip distribution, is proposed.

The interval concept of transport demand modelling has been further developed by supplementing it with a mechanism for generating intermediate transport demand states within the admissible interval, thereby significantly expanding its practical applicability in transport planning and modelling tasks.

The practical significance of the research results lies in the possibility of applying the developed guaranteed random trip matrix generation method in urban transport planning and modelling under conditions of limited, incomplete, or statistically unreliable input demand data. The use of the obtained results enables a comprehensive evaluation of alternative scenarios for transport system development, considering the travel demand randomness, enhances the validity of managerial and design decisions in the area of transport technologies, and allows assessment not only of the efficiency but also of the reliability of those decisions. The research findings can be applied to developing and updating integrated transportation schemes, sustainable urban mobility plans, and optimising public transport

networks, as well as to research and design projects using modern transport modelling software. The findings and conclusions of the dissertation are recommended for use in transportation higher education institutions for teaching courses related to transport planning, transport demand modelling, and the analysis of urban transport system performance.

Keywords: public transport, trip distribution patterns, interval concept, origin-destination pair, trip matrix, passenger flows, transport model, transport system, transport demand, transport technologies.

List of candidate's publications

Scientific papers in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Liubiyi Ye. V., Kovtsur K. H., Qin X. Formulation of the problem of random completion of the OD-matrix // *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2024, 2(23). P. 152–158. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1537>.

2. Qin X., Liubiyi Ye. V. Theoretical justification of the results of passenger correspondence matrix generation using a random method // *Advances in Mechanical Engineering and Transport*. 2025, 1(24). P. 438–446. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i24.1751>.

3. Qin X., Liubiyi Ye. V. Analysis of existing methods of forming models of passenger travel needs // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. 11(42), part 2. P. 394–409. DOI: [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. Qin X., Liubiyi Ye. V. Theoretical foundations for the development of an algorithm for guaranteed generation of random passenger correspondence matrices // *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. 12(43), part II. P. 295–303. DOI: [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).

5. Qin X., Liubiyi Ye. V. Assessing the potential of the interval concept in improving the reliability of transport demand modeling results. *Bulletin of Kherson National Technical University*. 2026. 1(96). P. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.22>.

Scientific works that certify the testing of the dissertation materials:

6. Horbachov P. F., Liubiyi Ye. V., Kovtsur K. H., Qin X. On the issue of modeling correspondence matrix elements within the framework of the interval concept of transport demand modelling // *Directions for the development of technological systems and logistics in AIP* : proceedings of the V International Scientific and Practical Internet Conference, Kharkiv, 23 May 2024. Kharkiv: DBTU. 2024. P. 48–49.

7. Qin X., Liubiyi Ye. V. Problems of assessing the accuracy of transport demand models // *Transport systems and technologies* : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Lviv, 15-16 May 2025. Lviv: Lviv Polytechnic National University. 2025. P. 124–126.

8. Qin X. Existing metrics for assessing the similarity of passenger correspondence matrices // *Directions for the development of technological systems and logistics in AIP* : proceedings of the VI International Scientific and Practical Internet Conference, Kharkiv, 22 May 2025. Kharkiv: DBTU. 2025. P. 106–109.

9. Qin X. Algorithm for guaranteed generation of random correspondence matrices // *Modern automotive engineering, transport, and road infrastructure '2025' (MAITRI 2025)* : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv 30-31 October 2025. Kharkiv: KhNAHU. 2025. P. 411–414.

10. Qin X. Problems of modeling passenger correspondence matrices // *Modern technologies of the industrial complex – 2025* : proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference, Kherson-Khmelnyskyi, 17-19 September 2025. Kherson-Khmelnyskyi: KhNTU. 2025. P. 249–251.

11. Qin X., Orhina A. Analysis of synthetic models for forming matrices of passenger correspondence // *Innovations in Safety and Traffic Management Systems* : proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 18-19 November 2025. Kharkiv: KhNAHU. 2025. P. 64–68. DOI: 10.61718/in202512.01. ISBN 978-617-7886-89-0.

Scientific works which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

12. Liubiyi Ye. V., Qin X. Models for forecasting freight transport demand // *Modern automotive engineering, automotive technical expertise, automotive transport operation, and training of transport industry specialists* : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 22-23 October 2024. Kharkiv: KhNAHU. 2024. P. 323–326.

13. Qin X., Liubiyi Ye. V., Mospan V. M. Four-stage model for calculating freight transport demand // *Current problems in the functioning of logistics systems. Sustainable development of transport systems: science and practice* : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv, 25-26 November 2024. Kharkiv: KhNAHU. 2024. P. 178–180.

ЗМІСТ

Анотація	2
Abstract	8
Перелік умовних скорочень	18
Вступ.....	19
Розділ 1 Огляд сучасного стану проблеми моделювання транспортного попиту.....	26
1.1 Огляд методів прогнозування попиту на перевезення вантажів і пасажирів.....	27
1.2 Аналіз існуючих методів розрахунку матриць пасажирських кореспонденцій.....	38
1.3 Постановка, мета і задачі дослідження.....	60
1.4 Висновки по розділу	66
Розділ 2 Теоретичні основи моделювання випадкових матриць кореспонденцій з додатковими груповими обмеженнями на значення їх елементів	70
2.1 Теоретичні основи розробки алгоритму реалізації методу гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій.....	71
2.2 Теоретичні основи виконання заданих обмежень при випадковому заповненні матриць пасажирських кореспонденцій.....	76
2.3 Теоретичне обґрунтування результатів генерації матриць пасажирських кореспонденцій власне випадковим методом.....	82
2.4 Прогнозування результатів формування матриць пасажирських кореспонденцій новим методом поетапної генерації.....	91
2.5 Висновки по розділу	103
Розділ 3 Експериментальні дослідження параметрів транспортного попиту.....	106

	16
3.1 Визначення параметрів для генерації моделей транспортного попиту.....	107
3.2 Застосування методу поетапної генерації матриць кореспонденцій на відомих даних попиту на пасажирські пересування у містах	114
3.3 Практична реалізація базового методу генерації матриці пасажирських кореспонденцій.....	126
3.4 Висновки по розділу	133
Розділ 4 Оцінка результатів застосування поетапного методу генерації матриць пасажирських кореспонденцій та розробка практичних рекомендацій.....	136
4.1 Визначення параметрів розподілу кореспонденції, отриманих методом гарантованої випадкової генерації матриць пасажирських кореспонденцій.....	136
4.2 Оцінювання можливостей інтервальної концепції в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту	144
4.3 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування поетапного методу генерації матриць пасажирських кореспонденцій.....	148
4.3.1 Рекомендації щодо роботи із програмою генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій	151
4.3.2 Рекомендації щодо отримання та формування бази вхідної інформації для моделювання матриць пасажирських кореспонденцій.....	156
4.3.3 Рекомендації щодо налаштування керуючих параметрів програми.....	158
4.4 Висновки по розділу	160
Висновки	162
Список використаних джерел	165
Додаток А Листинг програмного коду програми поетапної гарантованої генерації випадкових МПК	181
Додаток Б Результати перевірки вимоги, що накладається на додаткові обмеження згенерованих МПК.....	192

Додаток В Вихідна інформація для визначення виду закону розподілу кореспонденцій у матрицях, сформованих за базовим методом генерації МПК	198
Додаток Г Результати підбору показникового закону розподілу при описі кореспонденцій з матриць, сформованих за базовим методом.....	201
Додаток Д Вихідна інформація для визначення виду закону розподілу кореспонденцій у матрицях, сформованих з використанням поетапного методу	204
Додаток Е Акти впровадження результатів дослідження.....	206
Додаток Ж Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	210

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВВ	–	випадкова величина
ВДМ	–	вулично-дорожня мережа
ГТ	–	громадський транспорт
ЗП	–	зупиночний пункт
ЗР	–	закон розподілу
ІК	–	інтервальна концепція
МК	–	матриця кореспонденцій
МПК	–	матриця пасажирських кореспонденцій
ТР	–	транспортний район
ТС	–	транспортна система
ТСЛ	–	транспортних систем і логістики
TTSAM	–	Trend and Time Series Analyses Methods
EM	–	Elasticity Methods
LNM	–	Logistic Network Models
ADM	–	Aggregate Demand Models
DGDM	–	Disaggregate Demand Models
BBM	–	Behavior-Based Models
IOM	–	Input-Output Models
FSTM	–	Four-Stage Transport Model
TCDM	–	Trip Chaining Demand Models
ABDM	–	Activity Based Demand Models
DDM	–	Direct Demand Models
STDM	–	Simplified Transport Demand Models

ВСТУП

Актуальність теми. Формування достовірних моделей транспортного попиту є одним із ключових і водночас найбільш складних етапів транспортного моделювання міських ТС, оскільки саме МК є базовою формою кількісного представлення потреб населення у пересуваннях. На практиці пошук і моделювання найбільш ймовірних станів транспортного попиту для великих міст ускладнюється як обмеженістю та неповнотою вхідної інформації про транспортні потреби, так і випадковим характером поведінки пасажирів, що не дозволяє адекватно описати попит єдиним детермінованим варіантом МК.

Найбільш поширені на сьогодні синтетичні методи розрахунку МК, зокрема гравітаційні та ентропійні моделі, як вихідні дані використовують результати ресурсномістких польових обстежень роботи транспорту, не забезпечуючи при цьому достатньої точності і варіативності результатів, особливо в умовах моделювання великих і складних ТС. Додатковою проблемою є обмежена придатність таких моделей для реалізації ІК моделювання транспортного попиту, що зумовлено їх неспроможністю формувати широку множину можливих станів попиту, які відповідали би одночасно декільком характеристикам транспортного процесу.

Незважаючи на наявність сучасних програмних інструментів калібрування МК, зокрема спеціалізованих модулів транспортного моделювання, їх ефективне застосування потребує додаткових польових досліджень потреб у пересуваннях, доступу до високоякісного програмного забезпечення та відповідного рівня фахової підготовки спеціалістів з транспортного моделювання. Все це суттєво обмежує можливості їх використання в умовах вітчизняної практики транспортного планування і моделювання. За таких обставин особливої актуальності набуває розвиток методів математичного моделювання, здатних забезпечити генерацію достатньої кількості допустимих випадкових станів МК у стислі терміни з

урахуванням додаткових обмежень, що висуваються потребою відповідності моделі реальним характеристикам транспортного процесу.

Розробка нових і вдосконалення існуючих методів моделювання МК, спрямоване на поєднання високого рівня випадковості з гарантованим виконанням заданих обмежень, є необхідною передумовою підвищення точності, надійності та практичної придатності транспортних моделей у межах ІК формування попиту на пересування населення у містах. Це обумовлює актуальність обраної теми та її значущість для розвитку сучасних методів транспортного моделювання і прийняття обґрунтованих управлінських рішень, особливо у сфері планування та розвитку систем міського ГТ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів наукових досліджень у галузі транспортних технологій та транспортного планування і пов'язана з науково-дослідними роботами, що виконуються на кафедрі транспортних систем і логістики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (0122U201092, 0124U004261 «Проблеми формування та функціонування транспортних і логістичних систем»). Проблематика удосконалення методів генерації моделей транспортного попиту в містах відповідає Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року та операційному плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках, схвалених постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550, Стратегії сталого розвитку України до 2030 року, розробленої за підтримки Програми розвитку ООН в Україні та Глобального екологічного фонду в рамках проекту «Інтеграція положень Конвенцій Ріо в національну політику України», Указу Президента України від 30.09.2019 № 722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», цілям стійкого розвитку ТС, затвердженим резолюцією Генеральної Асамблеї ООН від 25.09.2015 № 70/1 «Перетворення нашого світу: Порядок денний в області стійкого розвитку на період до 2030 року», проекту ООН SD21 «Стійкий розвиток в 21 столітті».

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в розробці методу гарантованої генерації МК, який забезпечує формування допустимих станів транспортного попиту із дотриманням групових обмежень, що накладаються фактичними характеристиками транспортного процесу, і збереженням випадковості заповнення матриць. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи формування моделей транспортного попиту на пересування вантажів і пасажирів у містах;
- розробити метод поетапної гарантованої генерації випадкових МК і встановити закономірності розподілу кореспонденцій у сформованих матрицях;
- змоделювати МК із застосуванням базового випадкового методу генерації МК та експериментально перевірити схожість параметрів розподілу елементів МК, сформованих із застосуванням базового та розробленого методів;
- оцінити можливості розробленого методу генерації МК у межах ІК моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ та розробити практичні рекомендації щодо його застосування.

Об'єкт дослідження – процес формування попиту на пересування пасажирів міським ГТ.

Предмет дослідження – взаємозв'язок характеристик процесу перевезення населення міським ГТ, що визначають формування пасажирських кореспонденцій.

Методи дослідження. Системний аналіз застосовано для дослідження процесів формування транспортного попиту та функціонування систем міського ГТ як складних багаторівневих систем, а також для обґрунтування структури МК і взаємозв'язків між її елементами за умов дії групових обмежень з боку транспортного процесу. Методи математичного моделювання використано для формалізації задачі генерації випадкових станів МК, удосконалення базового випадкового методу та розроблення

поетапного методу гарантованої генерації МК. Методи теорії ймовірності та математичної статистики застосовано для забезпечення максимально можливого рівня випадковості при заповненні елементів МК, а також для оцінювання розподілу елементів згенерованих матриць. Алгоритмічні методи та методи комп'ютерного експерименту застосовано для реалізації розробленого методу поетапної генерації і порівняння отриманих результатів із результатами базового випадкового методу. Методи порівняльного аналізу використано для оцінювання ефективності запропонованого методу генерації МК, зокрема за критеріями коректності отриманих матриць, дотримання заданих обмежень, а також для визначення можливості застосування розробленого методу в межах ІК моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів міським ГТ.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що *вперше* запропоновано метод гарантованої генерації випадкових МК, який, на відміну від існуючих, забезпечує формування заданої кількості допустимих станів транспортного попиту за наявності додаткових, у тому числі групових, обмежень при генерації матриць зі збереженням випадковості заповнення їх елементів і застосуванням механізму попередження тупикових ситуацій при розподілі кореспонденцій.

Отримала подальший розвиток ІК моделювання потреб населення у пересуваннях за рахунок доповнення механізмом формування проміжних станів транспортного попиту всередині допустимого інтервалу, що істотно розширює можливості практичного використання ІК у задачах транспортного планування і моделювання.

Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості використання розробленого методу гарантованої генерації випадкових МК у процесі транспортного планування та моделювання міських транспортних і маршрутних систем за умов обмеженої, неповної або статистично ненадійної вихідної інформації про транспортний попит. Використання отриманих результатів дає змогу здійснювати комплексну оцінку ефективності

альтернативних варіантів розвитку ТС з урахуванням випадкового характеру попиту на пересування, а також підвищувати обґрунтованість управлінських, проєктних рішень у галузі транспортних технологій та оцінювати не лише ефективність, а і надійність їхнього впровадження. Результати дослідження можуть бути застосовані при розробленні та коригуванні комплексних схем транспорту, планів сталої міської мобільності, оптимізації маршрутних мереж ГТ, а також у науково-дослідних і проєктних роботах із використанням сучасних програмних комплексів транспортного моделювання. Положення та висновки дисертаційної роботи доцільно використовувати в освітньому процесі закладів вищої освіти транспортного профілю під час викладання дисциплін, пов'язаних із транспортним плануванням, моделюванням транспортного попиту та аналізом функціонування міських ТС. Запропонований метод поетапної генерації випадкових МК прийнятий до уваги Департаментом будівництва та шляхового господарства Харківської міської ради та Відділом житлово-комунального господарства, транспорту та благоустрою Балаклійської міської ради Харківської області для прогнозування розвитку систем ГТ. Результати дисертаційної роботи також впроваджені в освітній процес при підготовці здобувачів другого (магістерського) і третього (освітньо-наукового) рівнів вищої освіти, які навчаються на факультеті транспортних систем Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за спеціальністю J8 Автомобільний транспорт.

Особистий внесок здобувача. Всі положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно та наведені у роботах [1-13]. У наукових працях, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: проаналізовані існуючі методи моделювання і прогнозування транспортного попиту при перевезенні вантажів і пасажирів [3, 7, 8, 10, 12, 13]; формалізовано процес випадкового заповнення МК [1]; обґрунтовано результати генерації МПК базовим методом [2]; формалізовано алгоритм гарантованої генерації

випадкових МК [4]; проведено оцінювання можливостей ІК в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту на прикладі даних транспортної моделі м. Харкова [5], виявлено проблемні питання у процесі формування моделей транспортного попиту, зокрема у межах ІК моделювання потреб населення у пересуванні міським ГТ [1-6, 9, 11-13]; розроблено практичні рекомендації щодо використання імітаційного моделювання для генерації випадкових МК [1-6, 11].

Особистий внесок співавторів в опубліковані наукові праці. У роботі [1] особистий внесок Ковцур К.Г. полягає в розробці теоретичних положень випадкової процедури генерації елементів МК.

У роботах [1-5] особистий внесок Любого Є.В. полягає в аналітичному описі проблематики моделювання випадкових МПК та виявленні недоліків базового методу генерації МК, розробці теоретичних основ щодо обґрунтування результатів генерації МПК із застосуванням базового методу, аналітичному огляді моделей формування транспортного попиту, що відносяться до групи ймовірнісних, розробці принципів побудови поетапного методу гарантованої генерації випадкових МПК, розробці методики оцінювання можливостей ІК в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту.

Апробація результатів дисертації. Матеріали та результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на:

– V Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Напрямки розвитку технологічних систем і логістики в АПВ» (ДБТУ, м. Харків, 23 травня 2024 р.);

– Міжнародній науково-практичній конференції до Дня автомобіліста та дорожника «Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт» (ХНАДУ, м. Харків, 22-23 жовтня 2024 р.);

– Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем:

наука і практика» (ХНАДУ, м. Харків, 25-26 листопада 2024 р.);

– Міжнародній науково-практичній конференції «Транспортні системи та технології» (НУ «Львівська політехніка», м. Львів, 15-16 травня 2025 р.);

– VI Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ» (ДБТУ, м. Харків, 22 травня 2025 р.);

– IX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2025» (ХНТУ, м. Херсон-Хмельницький, 17-19 вересня, 2025 р.);

– Міжнародній науково-практичній конференції до Дня автомобіліста та дорожника та з нагоди 95-річчя ХНАДУ «Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025' (MAITRI 2025)» (ХНАДУ, м. Харків, 30-31 жовтня 2025 р.);

– VI Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом» (ХНАДУ, м. Харків, 18-19 листопада 2025 р.);

– 88, 89 науково-технічній та науково-методичній конференції Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Секція транспортних систем і логістики (ХНАДУ, м. Харків, 2024-2025 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях України, 8 тез у збірниках матеріалів вітчизняних та міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертаційної роботи становить 139 сторінок, 17 рисунків та 9 таблиць, 7 додатків на 30 сторінках, список використаних джерел включає 138 найменувань, розміщених на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ

Одним із головних завдань при моделюванні транспортних і маршрутних систем міст є отримання надійної та актуальної інформації про перевезення вантажів і пасажирів, яка характеризує існуючий транспортний попит і є невід'ємною частиною сучасних транспортних моделей, використання яких дозволяє вирішити широке коло задач, пов'язаних із підвищенням ефективності транспортного процесу [14-16].

На даний час, нажаль, українські фахівці галузі транспортних технологій суттєво обмежені у різного роду ресурсах щодо отримання актуальних даних про транспортний попит. Це пов'язано з достатньо великою кількістю проблем, серед яких основними можна вважати [17, 18]:

- відсутність або обмеженість у використанні джерел фінансування робіт і проєктів, які направлені на підвищення ефективності функціонування транспортних і маршрутних систем;

- відсутність регулярної практики збору інформації про перевезення пасажирів і вантажів органами місцевого самоврядування;

- недосконалість існуючої системи збору статистичної інформації про перевезення пасажирів і вантажів на рівні держави, області, міста або територіальної громади – практично відсутня можливість перевірки (верифікації) отриманих даних від приватних перевізників;

- обмежене використання інструментів автоматизованого збору і моніторингу даних про транспортний попит. На даний момент в Україні для збору інформації про транспортний попит здебільшого використовуються натурні методи обстеження, які потребують достатньо великої кількості фінансових і людських ресурсів, а отримані результати далеко не завжди є надійними і точними, особливо за умов проведення масштабних (суцільних) обстежень;

– відсутність на державному рівні загальнозатверджених методик отримання даних та прогнозування транспортного попиту та ін.

Зрозуміло, що дані, отримані за рахунок проведення натурних спостережень, можна використовувати для вирішення певних локальних завдань щодо підвищення ефективності функціонування міських транспортних і маршрутних систем, але для розробки стратегій розвитку міст або територіальних громад цих даних, звісно, недостатньо, тим паче коли постає питання прогнозування обсягів перевезень та дослідження закономірностей формування транспортного попиту.

З огляду на це, доцільним є огляд методів прогнозування попиту на перевезення пасажирів і вантажів, а також методик формування МК як основної форми представлення транспортного попиту на перевезення пасажирів і вантажів.

1.1 Огляд методів прогнозування попиту на перевезення вантажів і пасажирів

Прогнозування попиту є важливою частиною етапу планування і оцінки будь-якого проєкту, пов'язаного з інфраструктурою різних видів і систем транспорту. У найбільш загальному розумінні під попитом розуміється потреба, яка підкріплена покупною спроможністю і представлена на ринку для задоволення [19]. У свою чергу, згідно з [20] транспортним попитом є «потреби мешканців, суб'єктів господарювання та інших установ у переміщенні території, що визначається відповідно до системи розселення, просторового розміщення ділових центрів, виробничих об'єктів, об'єктів соціальної та транспортної інфраструктури». Інформація про ці потреби всіх учасників транспортного ринку є основою для оцінки існуючого рівня транспортного обслуговування користувачів транспортних послуг, а також розробки заходів для підвищення його ефективності.

Надійні результати прогнозування попиту на вантажні і пасажирські перевезення є необхідними вхідними даними для планування, проектування і оцінювання ТС і ланцюгів постачань, тому завдання отримання точних прогнозів щодо змін обсягів транспортного попиту є дуже важливою частиною загальної оцінки інфраструктурних проєктів [21].

На попит на вантажні і пасажирські перевезення впливає велика кількість параметрів, які враховуються в різних прогнозних моделях [15, 17]. Виходячи із кількості користувачів транспортними послугами пасажирські перевезення характеризуються більшою складністю організації, планування систем доставки, випадковістю, та, відповідно, прогнозування транспортного попиту. В свою чергу, на попит на вантажні перевезення автомобільним транспортом суттєво впливають сезонні коливання, зовнішньополітична ситуація в країні та тенденції розвитку транспортного ринку України, які формуються переважно під впливом влади [14].

Аналіз методів прогнозування транспортного попиту доцільно почати із огляду методів, які використовуються в галузі вантажного транспорту і логістики, оскільки у переважній більшості випадків вони є більш спрощеними на відміну від моделей, що використовуються на пасажирському транспорті, і ґрунтуються на різноманітній статистичній інформації за минулі проміжки часу. До основних моделей, що використовуються для прогнозування транспортного попиту в галузі вантажних автомобільних перевезень, можна віднести [22-25]:

- моделі аналізу трендів і часових рядів (Trend and Time Series Analyses Methods, TTSAM);
- моделі еластичності (Elasticity Methods, EM);
- моделі логістичних мереж (Logistic Network Models, LNM);
- моделі сукупного попиту (Aggregate Demand Models, ADM);
- дезагреговані моделі попиту (Disaggregate Demand Models, DGDM);
- поведінкові моделі (Behavior-Based Models, BBM);
- моделі «витрати – випуск» (Input-Output Models, IOM);

– чотирьохетапна транспортна модель (Four-Stage Transport Model, FSTM).

Моделі TTSAM дають змогу прогнозування попиту на вантажні перевезення з урахуванням історичних закономірностей, що сформувалися у попередні періоди. Залежно від обсягу та якості наявної інформації, цей підхід до моделювання попиту на вантажоперевезення може мати різний рівень складності. Найбільш спрощена трендова модель базується на визначенні коефіцієнту зростання за ретроспективними агрегованими даними щодо обсягів вантажних перевезень, який відображає середньорічний складний темп їх зростання та використовується для оцінки майбутніх обсягів транспортування вантажів. З метою урахування часових коливань і взаємозв'язків між показниками TTSAM зазвичай доповнюються застосуванням більш розвинених статистичних методів аналізу часових рядів, зокрема методів згладжування, аналізу автокореляції, авторегресійних моделей ковзного середнього, а також використанням нейронних мереж [15, 22-24, 26].

Моделі EM застосовуються для оцінювання того, яким чином відбувається розподіл вантажів між різними видами транспорту. Такі моделі ґрунтуються на припущенні, що вибір конкретного виду транспорту визначається загальними логістичними витратами, пов'язаними з кожним видом транспорту або їх комбінаціями. До цих витрат належать прямі транспортні витрати (витрати перевізника), а також інші логістичні витрати, які виникають у процесі перевезення. Основна ідея полягає в тому, що збільшення загальних логістичних витрат стимулює частину вантажів переорієнтовуватися на інші, конкурентні види транспорту. Такий підхід узгоджується з економетричними моделями вибору виду транспорту, у яких оцінюється чутливість попиту щодо змін загальних витрат і часу перевезення [27, 28].

Фахівці широко використовують цінову еластичність, яка визначає, наскільки відправники вантажів реагують на зміни загальних логістичних

витрат, пов'язаних із використанням певного виду транспорту, щоб з'ясувати, як ці зміни впливають на обсяг попиту на кожен із видів перевезень. Така еластичність дозволяє кількісно виміряти, наскільки 1 % зміни логістичних витрат зменшує або збільшує обсяг попиту на перевезення конкретним видом транспорту [29].

Найчастіше оцінювання еластичності здійснюється двома основними способами [30]:

- зміна обсягу попиту на конкретний вид транспорту у відповідь на зміну ціни його власних послуг – пряма еластичність;
- зміна обсягу попиту на один вид транспорту у відповідь на зміну ціни на послуги іншого, конкуруючого виду – перехресна еластичність.

Тут варто розуміти, що ЕМ розподілу попиту на перевезення за видами транспорту не повністю охоплюють загальний попит на вантажоперевезення, тому їх доцільно використовувати разом із іншими моделями загального попиту. Оцінку перенаправлення вантажних потоків на інший вид транспорту можна проводити на основі дезагрегованих даних (DGDM) про окремі відправлення або, за відсутності таких даних, на основі більш агрегованих даних (ADM) за ключовими ознаками (наприклад, типом вантажу). Оцінки зміни розподілу вантажів за видами транспорту можуть ґрунтуватися на зміні загальних логістичних витрат або припущенні, що інші логістичні витрати залишаються незмінними при зміні вартості перевезень [31].

Основне завдання LNM моделей – це призначення потоків товарів відповідним видам транспорту і маршрутам у мережі так, щоб мінімізувати загальні транспортні витрати, враховуючи просторове розміщення місць економічної активності [32]. Моделі LNM використовуються для прогнозування того, як попит на вантажні перевезення розподіляється між видами транспорту, перевізниками та транспортними коридорами між пунктами відправлення та призначення. Подібно до ЕМ моделей, такі LNM моделі зазвичай застосовуються разом із загальними моделями попиту на вантажоперевезення. Вони корисні тим, що розглядають систему вантажних

перевезень як цілісний комплекс, у якому взаємодіють виробники, споживачі, відправники вантажів, перевізники та державні регулятори.

Зазвичай фахівці з планування логістичних мереж обирають один із двох підходів:

– моделі рівноваги вантажної мережі – зосереджені на взаємодії вантажовідправників і перевізників у транспортній мережі за умови заданих обсягів перевезення вантажів між регіонами. У межах цих моделей вантажні потоки розподіляються між маршрутами та видами транспорту так, щоб досягти рівноваги, за якої жоден учасник не може зменшити свої витрати односторонньою зміною маршруту. Оптимізація враховує транспортні витрати, пропускну спроможність мережі та можливі перевантаження [33];

– просторові моделі цінової рівноваги – додатково враховують взаємодію виробника, споживача і відправника. Такі моделі включають функції попиту і пропозиції товару у кожному регіоні, а транспортні витрати розглядаються як фіксовані або як функції потоків у мережі. Передбачається, що відправники ведуть себе відповідно до двох основних принципів: якщо існує потік товару i з регіону A до регіону B , то ціна товару i в A плюс витрати на транспортування з A до B дорівнює ціні товару в B ; якщо ж сукупна ціна в A разом із транспортними витратами перевищує ціну в B , то такого потоку не виникає. Це співвідноситься з класичною концепцією просторової рівноваги у транспортно-логістичних моделях [32-34].

ADM моделі використовуються для оцінювання вантажних перевезень на основі агрегованих даних, які узагальнюють вплив ключових економічних і логістичних факторів. Переважно ці моделі спрямовані на прогнозування загального обсягу товарних потоків, а не окремих перевезень, і можуть застосовуватися для моделювання попиту за видом транспорту, типом вантажу або парою «пункт відправлення – пункт призначення» [32, 35]. Найпростіші ADM моделі застосовують підхід загального потоку, використовуючи регресійний аналіз для оцінки сукупного попиту на вантажні перевезення, де основним чинником зазвичай є обсяг економічного

виробництва [28]. Інший підхід ґрунтується на моделюванні відносних потоків, тобто визначенні частки загального обсягу перевезень, що припадає на кожен вид транспорту [36]. Такі моделі дозволяють ефективно аналізувати модальний розподіл вантажопотоків за допомогою регресійних методів.

У свою чергу, моделі DGDM розвивають сукупні підходи прогнозування попиту на перевезення, переходячи до оцінювання окремих вантажних поїздок, їхніх маршрутів і вибору виду транспорту в межах логістичної мережі. На відміну від ADM, вони дозволяють детально розрізняти попит за маршрутами, видами транспорту, типами вантажів і парами «пункт відправлення – пункт призначення», забезпечуючи вищу точність прогнозування. Такі моделі часто інтегруються з чотирьохетапними транспортними моделями для комплексного планування вантажних перевезень [32, 35]. Один із ключових підходів у межах DGDM-моделювання ґрунтується на ринкових опитуваннях вантажовідправників, які оцінюють важливість факторів вибору виду транспорту, зокрема вартості транспортування, часу доставки, надійності, безпеки, регулярності, рівня сервісу, відстані перевезення та можливостей виконання інтермодальних перевезень [37, 38]. Отримані результати формують матрицю модальних переваг, що використовується для прогнозування обсягів вантажних перевезень за видами транспорту для різних напрямків.

Певною альтернативою DGDM є моделі BBM, які використовуються для прогнозування попиту на вантажні перевезення через аналіз рішень менеджерів фірм-відправників або одержувачів. Головною перевагою цих моделей є те, що вибір виду транспорту відбувається на максимально дезагрегованому рівні, наприклад, для окремих відправлень конкретних компаній. На відміну від моделей, заснованих на опитуваннях, BBM використовують дані про фактичний (виявлений) вибір, а не суб'єктивні міркування вантажовідправників. Вони базуються на припущенні, що компанії максимізують корисність, враховуючи характеристики виду транспорту, вантажу, фірми та логістичних умов, які впливають на рішення

щодо модального вибору [39-42].

На відміну від наведених вище моделі ІОМ є одними з найпростіших підходів до прогнозування попиту на вантажні перевезення та застосовуються переважно для попереднього або регіонального планування, особливо за умов обмеженої доступності даних. Вони ґрунтуються на аналізі економічних зв'язків між секторами економіки, використовуючи показники витрат ресурсів і обсягів випуску для оцінки рівня виробництва та споживання [43-45]. У межах цих моделей вхідні економічні ресурси формують матрицю міжгалузевих потоків, яка дозволяє оцінити виробництво товарів і послуг за галузями, регіонами та часовими періодами. Отримані економічні результати перетворюються на прогнозні обсяги вантажних перевезень, необхідні для задоволення попиту на товари та послуги.

Останнім часом для формування моделей вантажного транспортного попиту науковцями і практиками використовується чотирьохетапна прогнозна модель, яка є дуже поширеною в галузі пасажирських перевезень і складається з чотирьох основних етапів [23, 32], рисунок 1.1:

- генерація перевезень (Trip Generation);
- розподіл перевезень (Trip Distribution);
- поділ за видами транспорту (Mode Choice);
- розподіл за маршрутами прямування (Trip Assignment).

Перший етап FSTM передбачає використання економічних та демографічних показників для прогнозування обсягів вантажів (вантажопотоків) або кількості транспортних засобів, що прибувають до або вибувають із певної території за визначений період. Основними вхідними змінними є чисельність населення та рівень зайнятості, на основі яких розраховуються щоденні товарні потоки за видами вантажів або типами транспортних засобів. Моделювання здійснюється на рівні ТР за умов наявності детальних базових і прогнозних даних. Для кожної товарної групи або типу вантажних транспортних засобів формуються окремі регресійні рівняння для розрахунку обсягів виробництва та привабливості вантажних

перевезень [23, 32, 46].

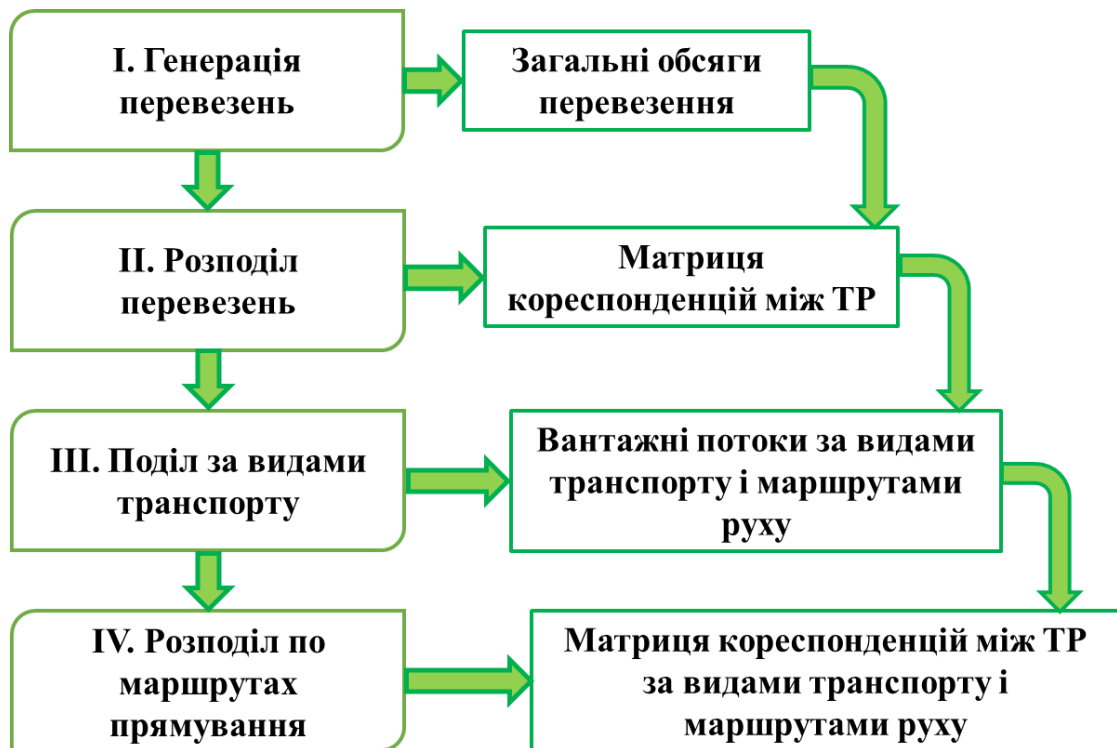


Рисунок 1.1 – Взаємозв’язок між етапами FSTM на прикладі вантажних перевезень (розроблено на основі [23, 32])

Другий етап розрахунку FSTM присвячений формуванню МК, у якій відображається розподіл кількості вантажів, розрахованої на етапі генерації, між парами пунктів відправлення та призначення – ТР. Для моделювання МК може бути використано достатньо великий набір методів і підходів, серед яких основним є гравітаційний підхід [35, 47-50], який враховує обсяги перевезень між ТР та узагальнені витрати перевезення – відстань, час, вартість, інші характеристики складності (опору) шляхів сполучення і маршрутів прямування). Опір моделюється через однойменну функцію, параметри якої найчастіше можуть калібруватися на основі даних опитувань або значення середньої відстані перевезення [23]. Як така функція часто використовується від’ємна експоненціальна функція часу або вартості перевезення між ТР.

У межах третього етапу FSTM відбувається моделювання вибору виду транспорту, результатами якого є формування матриць перевезень окремо по

кожному виду транспорту. Найчастіше рішення базується на чотирьох ключових групах чинників: характеристиках товару (тип, обсяг, вартість); параметрах транспорту (швидкість, надійність, пропускна спроможність); загальних логістичних витратах (запаси, втрати, рівень сервісу); логістичних умовах перевезення (відстань і частота відправок).

Четвертий етап FSTM орієнтований на розподіл вантажних їздок або транспортних потоків по дорожній мережі з визначенням маршрутів їх руху. Під час моделювання враховуються ключові фактори – час їздки, пропускна спроможність шляхів сполучення, вплив заторів (функції затримки) та обмеження або заборони руху вантажного транспорту [23, 25, 32].

На відміну від моделей прогнозування попиту на перевезення вантажів у галузі пасажирських перевезень можна окреслити наступні чотири групи моделей, які доповнюються FSTM [32, 51, 52]: засновані на поданні попиту у вигляді ланцюгів пересувань (Trip Chaining Demand Models, TCDM); засновані на представленні попиту як наслідку певної діяльності людей (Activity Based Demand Models, ABDM); моделі безпосереднього попиту (Direct Demand Models, DDM); спрощені моделі (Simplified Transport Demand Models, STDM).

Моделі першої групи – TCDM – розглядають пересування людини за певний період як ланцюг взаємопов'язаних поїздок, які впливають одна на одну. Для моделювання таких ланцюгів існує обмежена кількість моделей без єдиної стандартизованої математичної форми. Найближчою до традиційних підходів є модель, що базується на основному виді діяльності або основному пункті призначення [52-55]. Основний вид діяльності тут може визначатися кількома чинниками – значущістю мети поїздки (перевага надається роботі та навчанню), тривалістю діяльності та відстанню від місця проживання. Попри потенціал, TCDM-моделі поки що є малопоширеними через складність математичного апарату та обмеженість у врахуванні механізмів формування ланцюгів поїздок, оскільки вони прогнозують вибір лише серед наперед заданих сценаріїв [52].

Обмежені можливості моделей TCDM спонукали розробку ABDМ-

моделей, які зосереджуються на видах діяльності осіб і домогосподарств як основного джерела транспортного попиту [52, 56]. Вони дозволяють прогнозувати формування та вибір ланцюгів поїздок, розглядаючи осіб і домогосподарства як суб'єктів прийняття рішень на основі принципів економетрики, теорії корисності, теорії ймовірностей і комп'ютерної симуляції [57]. Ключовими компонентами моделей ABDM є модулі довго- та середньострокових рішень і симулятор типового дня окремої особи. Разом із тим застосування ABDM-моделей потребує детальних даних про домогосподарства та поведінку людей, і, відповідно, проведення традиційних транспортних обстежень й опитувань заявлених переваг, що ускладнює збір інформації та валідацію моделей. Практичне використання таких моделей для окремих домогосподарств або малих вибірок вимагає високого рівня деталізації вхідної інформації [52].

Моделі DDM поєднують перші три етапи FSTM формуючи при цьому єдиний математичний вираз. Вони поділяються на повністю безпосередні (оцінюють попит за напрямками і категоріями пасажирів) та квазі-безпосередні (розмежовують етапи модального вибору і розрахунок МК) [32]. DDM-моделі зазвичай мають мультиплікативну форму, базуються на соціально-економічних характеристиках ТР і враховують рівень транспортного сервісу різних систем транспорту [58]. Попри перевагу інтеграції кількох етапів FSTM, ці моделі потребують великої кількості емпіричних параметрів та є більш придатними для міжміських, ніж для міських пересувань [52].

Більшість проаналізованих у цьому підрозділі моделей прогнозування транспортного попиту потребують значних фінансових, часових і трудових ресурсів для збору даних та калібрування. Щоб зменшити витрати різних ресурсів фахівцями з транспортного планування було розроблено моделі STDМ, які є особливо актуальними для країн, що розвиваються, де масштабні транспортні обстеження часто недоступні. Моделі STDМ базуються на відносно дешевих методах оцінки поточного транспортного попиту на

пересування пасажирів і його екстраполяції на майбутні періоди [52].

Найбільш поширеними серед моделей STDM є: моделі еластичності, що описують реакцію попиту на зміну вартісних параметрів транспортного процесу чи, наприклад, рівня автомобілекористування [52, 59, 60]; ідеалізовані моделі, які враховують вплив місцевої транспортної політики [52, 61, 62]; методи ескізного планування, що адаптують параметри існуючих моделей до нових територій [52, 63]; pivot-point-моделі, що прогнозують попит на основі поточних даних і змін у характеристиках пасажирських поїздок [64] і у більшості випадків потребують знання функції попиту, яка представляється моделлю дискретного вибору [65] (інкрементні моделі зростання попиту та моделі, побудовані на результатах обстежень пасажиропотоків). У свою чергу, інкрементні моделі прогнозують зміну попиту залежно від тарифів, часу поїздки та інших параметрів через коефіцієнти еластичності, а моделі, засновані на обліку результатів роботи ГТ, використовуються для відновлювання МПК шляхом калібрування синтетичних моделей (наприклад, гравітаційної), допускаючи контрольовану похибку. Загалом, моделі STDM цілком можна вважати менш ресурсомісткою альтернативою класичному чотирьохетапному підходу моделювання транспортного попиту, зберігаючи його ключові принципи при нижчих витратах [52].

На основі проведеного аналізу слід відзначити, що основним способом представлення транспортного попиту є МК, яка містить інформацію про обсяги і напрямки перевезення вантажів і пасажирів. Формування відповідної МК є одним із головних і найбільш складних етапів FSTM, від правильної реалізації якого залежать загальні результати роботи транспортної моделі та можливі сценарії прогнозування розвитку вантажного і пасажирського транспорту з прив'язкою до певної території. Окрім цього, треба брати до уваги той факт, що пошук єдиного варіанту МК для опису існуючого або потенційного транспортного попиту не є найбільш правильним підходом, оскільки через ймовірнісний характер формування транспортних зв'язків і вибору маршрутів прямування попит може представлятися кількома станами,

що відповідає положенням ІК моделювання потреб у пересуваннях [66].

Також за результатами проведеного аналізу методів прогнозування транспортного попиту можна дійти висновку, що у вантажних перевезеннях методи їх моделювання не мають самостійного характеру, а здебільшого є спробою використання методів, первісно призначених для прогнозування пасажирських перевезень, незважаючи на те, що напрямки вантажних перевезень значно менше залежать від відстаней доставки і у набагато більшому ступені обумовлені зв'язками між виробниками і споживачами в ланцюгах постачань.

З урахуванням того, що вантажні перевезення виконуються переважно в рамках взаємодії приватних суб'єктів економічної діяльності, основним джерелом інформації про напрямки вантажних перевезень автомобільним транспортом є існуючі вантажопотоки на автомобільних дорогах. МК у цьому випадку відтворюються за допомогою різного роду процедур калібрування матриць для приведення їх у відповідність до спостережуваних потоків, наприклад, таких, що вбудовані у PTV VISUM [67]. Тому у таких умовах ІК моделювання транспортних потреб цілком може бути реалізована шляхом відповідного переналаштування цих процедур на випадковий старт процесу налаштування, що буде забезпечувати генерацію достатньої кількості випадкових матриць вантажних кореспонденцій. Тому, як наслідок, у цій дисертаційній роботі основну увагу зосереджено на генерації матриць саме пасажирських пересувань як найбільш складного та проблемного етапу моделювання транспортного попиту зокрема та транспортної моделі у цілому.

1.2 Аналіз існуючих методів розрахунку матриць пасажирських кореспонденцій

Результати аналізу методів прогнозування транспортного попиту на перевезення вантажів і пасажирів свідчать, що найпроблемнішим етапом

моделювання потреб населення у перевезеннях як з позиції складності самого процесу взагалі, так і з позиції складності реалізації ІК моделювання попиту [66], є генерація МПК.

Основна складність процесу формування реальної МПК на прикладі міста та (або) територіальної громади полягає в обмеженості фахівців у джерелах та інструментах з транспортного моделювання для отримання надійної інформації про фактичні пасажирські кореспонденції, які є базою для моделювання якісної МК. При цьому особливо гостро ця проблема проявляється при необхідності моделювання МПК великих міст, маршрутні системи яких характеризуються значними розмірами і різноманіттям напрямків перевезення пасажирів.

Основними двома кардинально різними підходами до формування МПК прийнято вважати [52, 68-72]:

- розрахунок МПК на основі проведених натурних спостережень за роботою ГТ (талонне, табличне-опитувальне обстеження пасажиропотоків, опитування користувачів міського пасажирського транспорту на зупинках);
- створення МПК з використанням різноманітних моделей (статистичні, синтетичні, ймовірнісні).

Перевагою використання першого підходу є можливість отримання точної, якісної і достовірної вхідної інформації для формування реальної МПК, яка характеризуватиме фактичний стан транспортного попиту на пересування пасажирів у відповідний проміжок часу. У свою чергу, можливими недоліками використання цього підходу для створення МПК можна вважати:

- високу трудомісткість і фінансові витрати. Організація та проведення обстежень вимагають значної кількості персоналу та часу. Витрати на організацію досліджень (зарплата спостерігачів, обладнання, обробка даних) можуть бути досить високими;
- обмежена точність даних. Обліковці можуть допускати помилки під час фіксації інформації (наприклад, неточне визначення пункту посадки чи

висадки пасажирів). Також людський фактор може впливати на об'єктивність отриманих даних;

- неповна ширина охоплення. Натурні спостереження найчастіше застосовуються на окремих видах транспорту (наприклад, у ГТ), що не дозволяє комплексно оцінити всі пересування пасажирів у місті. У багатьох випадках досліджуються лише трудові пересування;

- вплив зовнішніх факторів. Погодні умови, дорожні затори, аварії або сезонні зміни можуть спотворювати реальну картину пересувань населення під час спостережень;

- складність збору повної інформації про пересадки. Спостереження на зупинках та у транспорті не завжди дозволяють точно визначити кінцеву точку поїздки пасажирів, особливо якщо він здійснює пересадки;

- складність масштабування та оновлення. Для розширення досліджень необхідно залучати більше ресурсів. Отримані дані швидко втрачають актуальність, тому їх потрібно регулярно оновлювати, що додатково підвищує витрати;

- обмеженість у зборі основних соціально-демографічних характеристик. Натурні спостереження не дозволяють отримати детальну інформацію про пасажирів (вік, стать, мету поїздки), що ускладнює сегментацію попиту.

Через ці основні недоліки натурні спостереження зазвичай поєднують з іншими методами збору даних, такими як анкетування, GPS-моніторинг або аналіз даних мобільних операторів, точність результатів поєднання яких також потребує додаткової перевірки.

Моделі, що відносяться до другого підходу, можна розділити на три ключових групи [52, 66, 68-76]:

- статистичні;
- синтетичні (апріорні, теоретичні);
- ймовірнісні.

Статистичні моделі розрахунку МПК дають змогу поширити наявні

значення кореспонденцій поточного або раніше дослідженого періоду на майбутній період аналізу. До таких методів належать метод єдиного коефіцієнту росту, метод середніх коефіцієнтів росту, метод Фернесса (Фратара), детройтський метод, моделі середнього арифметичного коефіцієнту росту, паризький метод [52, 68, 70-72].

Загальний сенс моделей коефіцієнтів росту полягає у пропорційному коригуванні існуючої МПК для її використання при описі можливого стану транспортної або маршрутної системи на майбутнє. Найпростішим серед моделей даного виду є метод єдиного коефіцієнту росту:

$$h_{ij} = \tau \cdot r_{ij}, \quad (1.1)$$

де r_{ij} – величина кореспонденції між ТР i та j базової (існуючої) МПК, пас.;

τ – коефіцієнт росту для об'єкту, що досліджується.

Складнішим в рамках цієї групи моделей є метод Фратара, який передбачає використання для кожного ТР власних коефіцієнтів [32, 77]:

$$h_{ij} = r_{ij} \cdot t_i \cdot H_j \cdot B_i \cdot V_j, \quad (1.2)$$

де t_i, H_j – коефіцієнти росту кореспонденцій для ТР i та j ;

B_i, V_j – коефіцієнти для балансування.

Серед переваг моделей цієї групи можна відзначити їхню зрозумілість і простоту, а серед недоліків – потребу у початковій (базовій) МПК, на отримання якої необхідно витратити велику кількість ресурсів; значна залежність від точності початкової (базової) МПК; неврахування змін у транспортній пропозиції; обмеженість використання (короткострокове планування).

Наступну групу моделей для формування МПК в рамках другого підходу складають синтетичні (теоретичні) моделі, засновані на апріорних

гіпотезах стосовно закономірностей формування кореспонденцій [52, 68-74]. Використання моделей цієї групи вимагає значно менших витрат різних ресурсів для створення МПК, але не гарантують одержання достатньо точних результатів моделювання матриці. Найбільшого поширення серед моделей цієї групи отримали гравітаційні, ентропійні моделі, а також метод проміжних можливостей, але слід розуміти, що ці моделі відносяться лише до етапу розподілу кореспонденцій між парами ТР [52, 68-73].

Однією з перших синтетичних моделей, застосованих для встановлення та оцінки міжрайонних кореспонденцій, була гравітаційна модель [78-83]. Модель базується на простому принципі – кореспонденція між районом i та районом j пропорційна загальному обсягу відправлень із району i , загальному обсягу прибуттів у район j та деякій функції індивідуальних витрат на пересування c_{ij} , яка зазвичай залежить від відстані між цими районами. Відстань між ТР відображає рівень доступності транспортної системи, враховуючи швидкість і комфортність пересувань, що забезпечуються транспортною мережею. Спосіб визначення цього параметра (складності пересування) може змінюватися залежно від конкретного варіанту моделі.

За аналогією із законом Ньютона, гравітаційну модель для розрахунку пасажирської кореспонденції можна представити як

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j}{c_{ij}^2}, \quad (1.3)$$

або

$$h_{ij} = D_i \frac{A_j \cdot c_{ij} \cdot \omega_j}{\sum_m^n A_m \cdot c_{im} \cdot \omega_m}, \quad (1.4)$$

де ω – константа (коефіцієнт калібрування);

D_i – місткість ТР i з відправлення, пас.;

A_j – місткість ТР j з прибуття, пас.;

c_{ij} – функція індивідуальних витрат пасажирів на пересування (складність пересування між ТР);

n – кількість ТР районів для об'єкту моделювання, од.

Слід розуміти, що гравітаційні моделі передбачають процедуру обов'язкового калібрування результатів моделювання кореспонденцій для виконання умови балансу розрахункових їх значень з вхідними чисельними значеннями місткостей ТР:

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad (1.5)$$

$$\sum_{i=1}^n h_{ij} = A_j, \quad (1.6)$$

$$\sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j, \quad (1.7)$$

$$h_{ij} > 0. \quad (1.8)$$

Калібрування гравітаційної моделі здійснюється доти, доки не будуть виконані умови (1.5)–(1.8). Тут також слід розуміти, що процедура калібрування призводить до суттєвих змін отриманих за залежністю (1.4) кореспонденцій на початковому етапі, що говорить про низьку достовірність і точність результатів розрахунків МПК за цією моделлю. Різниця між розрахунковими і вхідними (реальними) значеннями при моделюванні пасажирських кореспонденцій може бути дуже суттєвою [68, 84].

Також розповсюдженими є й інші варіанти представлення залежності для розрахунку пасажирських кореспонденцій за гравітаційною моделлю [71]:

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i^\alpha \cdot A_j^\beta}{c_{ij}^\gamma}, \quad (1.9)$$

$$h_{ij} = \omega \cdot \frac{D_i \cdot A_j \cdot f(c_{ij})}{\sum_m^N A_m \cdot f(c_{im})}, \quad (1.10)$$

де α, β, γ – емпіричні константи.

Автором [85] запропоновано процедуру одночасного розрахунку кореспонденції за гравітаційною моделлю з їхнім калібруванням щодо фактичних даних про переміщення між ТР. Цільова функція задачі визначення кореспонденцій за цим методом має такий вигляд:

$$F(h_{ij}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h'_{ij} - h_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (1.11)$$

де $F(h_{ij})$ – функція відхилення від потенційних кореспонденцій;

h'_{ij} – потенційні кореспонденції між ТР, розраховані за залежністю (1.3) без урахування ω , пас.;

h_{ij} – кореспонденції між ТР, пас.

На думку автора [85] ключовою перевагою запропонованого підходу по зрівнянню із методикою, що базується на використанні коефіцієнтів коригування, є забезпечення найбільш повної аналогії взаємозв'язку між ТР і гравітаційним законом тяжіння фізичних тіл. Для розв'язання задачі (1.11) автором використано множники Лагранжа, що дозволять знайти відносний екстремум функції. Для оптимізації функцію (1.11) записано у вигляді

$$\begin{aligned}
 L(h_{11}, h_{12}, \dots, h_{nn}, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{(2n-1)}) &= \\
 &= F(x) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \left(\sum_{j=1}^n h_{ij} - D_i \right) + \sum_{i=n+1}^{2n-1} \lambda_i \cdot \left(\sum_{j=1}^n h_{ij} - A_i \right), \quad (1.12)
 \end{aligned}$$

де n – кількість ТР, од.;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{(2n-1)}$ – множники Лагранжа.

На відміну від «класичних» гравітаційних моделей запропонований у [85] підхід дає можливість розрахувати значення пасажирських кореспонденцій за умов виконання обмежень (1.6), (1.7), але при цьому недоліком, як і для більшості модифікацій гравітаційних моделей, є врахування лише одного транспортного фактору – відстані між ТР [70, 71].

Слід розуміти, що модифікації гравітаційної моделі, в основному, будуються навколо змін, що стосуються форми представлення функції тяжіння (складності сполучення між ТР). Формування цієї функції ґрунтується на основі даних про переваги у виборі пар ТР відправлення і прибуття або ж при порівнянні розрахункових і фактичних (емпіричних) значень пасажирських кореспонденцій. Варіативність виду функції тяжіння є дуже широкою: показникова, степенева, гіперболічна, комбіновані варіанти, встановлена на основі закону розподілу випадкових величин, на основі даних про розселення населення тощо [70, 71].

Нижче представлено модифікації функцій тяжіння, що найчастіше застосовувалися в рамках створення МПК з використанням гравітаційної моделі:

– «класична» функція тяжіння – визначається з урахуванням зворотнопропорційного впливу відстані між ТР на величину пасажирської кореспонденції між ними

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}, \quad (1.13)$$

де n – ступінь впливу параметру, що характеризує складність пересування між парою ТР (в «класичній» гравітаційній моделі $n = 1$, в моделі Якшина – $n = 2$, а за параметр складності пересування між ТР приймається час поїздки між ними. У інших дослідженнях пропонується варіювання значення n в залежності від зміни величини c_{ij} , що, на думку авторів, дозволяє точніше відбити фактичні потреби пасажирів у пересуваннях);

- показникова функція тяжіння

$$f(c_{ij}) = e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (1.14)$$

де β – емпіричний коефіцієнт;

– комбінована функція тяжіння

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}, \quad (1.15)$$

$$d_{ij} = \frac{1}{(1 + c_{ij})^{\varphi(c_{ij})}} \quad (1.16)$$

за умови, що

$$\varphi(c_{ij}) = \frac{E}{1 + e^{(F-G \cdot c_{ij})}}, \quad (1.17)$$

де E, F, G – коефіцієнти калібрування;

– функції тяжіння, що ґрунтуються на законах розподілу випадкових величин (за аргумент розподілу використовується якийсь транспортний фактор):

$$d_F = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.18)$$

$$d_{ij} = \frac{4 \cdot t^2}{\alpha^3 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{-t^2}{\alpha^2}}. \quad (1.19)$$

За умов, що відомі значення середньої, мінімальної і максимальної дальності пересування пасажирів, то згідно [86] функцію тяжіння можна представити через щільності ймовірності розподілу Сімсона

$$f(l) = \begin{cases} \frac{2 \cdot (l - l_{\min})}{(l_{\max} - l_{\min})(l_0 - l_{\min})}, & \text{при } l_{\min} \leq l \leq l_0, \\ \frac{2 \cdot (l_{\max} - l)}{(l_{\max} - l_{\min})(l_{\max} - l_0)}, & \text{при } l_0 \leq l \leq l_{\max}, \\ 0, & \text{у всіх інших випадках,} \end{cases} \quad (1.20)$$

де σ – параметр закону розподілу, $\sigma = \frac{T_{\max}}{3}$;

t – час пересування між парою ТР, год. (хв.);

l_{\max}, l_{\min} – відповідно, максимальне і мінімальне значення випадкової величини;

l_0 – мода випадкової величини.

Загальним недоліком розглянутих вище варіантів представлення функції тяжіння є використання лише одного параметру – часу або відстані поїздки між парою ТР за фактор, що характеризує складність сполучення між ними. До цього слід також додати, що авторами робіт [66, 70, 71, 87] підтверджено гіпотезу про незначний вплив транспортних факторів на формування попиту на пересування.

Ще однією модифікацією гравітаційної моделі можна вважати підхід запропонований у [88], в якому використовується комбінована функція тяжіння EVA. Не дивлячись на це, розподіл кореспонденцій виконується на основі одного параметру – часу пересування між ТР, а точність отриманих результатів розрахунку кореспонденцій перевіряється за допомогою функції

$$\sum_{i=1}^n |E_i| = \sum_{i=1}^n |F_i - F_i'| \rightarrow \min, \quad (1.21)$$

де F_i, F_i' – відповідно, значення емпіричних і розрахункових пасажиропотоків, пас.

Результати аналізу різноманіття модифікацій гравітаційної моделі розрахунку МПК наводять на висновок про те, що основними недоліками цієї частини групи синтетичних моделей є: необхідність проведення процедури калібрування моделі для виконання умов рівності місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів (1.5)–(1.7), що суттєво впливає на достовірність результатів моделювання пасажирських кореспонденцій; на точність результатів розрахунку впливає вид обраної функції тяжіння, для визначення параметрів якої необхідно проводити натурні спостереження за пересуваннями пасажирів; використання транспортних факторів (час пересування або відстань між ТР) у функції тяжіння не в повній мірі відбиває процес формування транспортного попиту при пересуванні населення міською територією; сумнівна коректність застосування «гравітаційного закону» до моделювання поведінки населення під час поїздок.

Серед групи синтетичних моделей розрахунку МПК значного поширення також отримали ентропійні моделі, які базуються на аналогії між процесами, що відбуваються у ТС, і термодинамічними процесами [32, 52, 69, 89]. Цікавість цих моделей полягає в тому, що тут формалізується гіпотеза про рівноважну і випадкову поведінку елементів системи при формуванні її станів. За умов наявності такої гіпотези, найбільш ймовірним є стан системи, за якого

її невизначеність, що вимірюється величиною ентропії, максимальна [68]. Використання цього принципу на прикладі вирішення задачі розрахунку пасажирських кореспонденцій передбачає розв'язок залежності

$$\max E = \max\left(-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln(h_{ij})\right), \quad (1.22)$$

де E – ентропія системи;

n – кількість ТР для об'єкту моделювання.

За умов практичної реалізації гіпотеза про випадковість поведінки пасажирів замінюється на гіпотезу про наявність апріорних даних про переваги (уподобання) пасажирів при виборі пар ТР. Тоді залежність для розрахунку трансформується у

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \ln\left(\frac{s_{ij}}{h_{ij}}\right) \rightarrow \max, \quad (1.23)$$

де s_{ij} – «ідеальні» кореспонденції, які відповідають апріорним перевагам (уподобанням) пасажирів при пересуванні.

При цьому враховуються обмеження, які є схожими з (1.5)–(1.8):

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{ij} \geq 0; \\ \sum_{j=1}^n h_{ij} = D_i, \quad j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{i=1}^m h_{ij} = A_j, \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot h_{ij} = B_{\text{заг}}, \end{array} \right. \quad (1.24)$$

де m, n – кількість районів прибуття та відправлення, од.;

$B_{заг}$ – загальні транспортні витрати на здійснення пересувань.

Основними перевагами ентропійних моделей є незначна трудомісткість виконання розрахунків (проста комп'ютерна програмна реалізація) і простота сприйняття оптимізаційного критерію. Серед ключових недоліків цих моделей можна відзначити наступні: створення МПК можливе лише за умови замкненості транспортної системи, тобто без додавання нових або закриття наявних ділянок вулично-дорожньої мережі, а також за умов незмінності витрат на пересування ГТ; при розрахунку МПК враховується лише один транспортний фактор, хоча на процес формування транспортного попиту впливає багато факторів, і не тільки транспортних; сумнівна аналогія між процесами, що відбуваються в термодинамічних системах, і транспортними [52, 69, 71, 87, 89].

Аналіз групи синтетичних (теоретичних) моделей формування МПК можна продовжити методом зустрічних можливостей [32]. Сенс цього методу полягає в тому, що кожен користувач ГТ при здійсненні поїздок має можливість задовольнити свої потреби у пересуванні по мірі віддалення від початкового пункту, і чим довший шлях він долає, тим більше виникає цих можливостей. Тобто при розрахунку величини кореспонденції враховуються ймовірності закінчення пасажиром пересування в альтернативних пунктах призначення (з урахуванням можливості задовольнити потребу пасажира у пересуванні в цих пунктах), які знаходяться на шляху прямування. Математична формалізація моделі розрахунку величини кореспонденції за методом зустрічних можливостей наступна:

$$h_{ij}^y = D_i \frac{(e^{-p \cdot n_{y-1}} \cdot e^{-p \cdot n_y})}{(1 - e^{-p \cdot n_A})}, \quad (1.25)$$

де h_{ij}^y – величина кореспонденції між ТР i та j , на шляху прямування між якими є у альтернативних пунктів, що характеризуються потенційною можливістю

закінчення пересування;

p – ймовірність задоволення потреби у пересуванні одним можливим пунктом призначення (єдина можливість);

n_{y-1}, n_y – накопичена кількість можливих альтернативних пунктів закінчення пересування до пункту y ;

A – загальна кількість альтернативних пунктів завершення пересувань.

Недоліками цього методу є той факт, що він базується на припущенні про відносну однорідність розподілу альтернативних пунктів можливого закінчення пересування в межах зони, в рамках якої проводиться дослідження, а також використання лише одного транспортного фактору – відстані поїздки, при розрахунку величини пасажирської кореспонденції [32, 69, 72].

У межах групи синтетичних моделей також можна відзначити моделі, які базуються на встановлених авторами закономірностях розселення населення міською територією [70, 71]. Прикладом розрахункової залежності може бути наступна:

$$F_{j(t_1, t_2)} = A_j \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{T_{\max}} \ln \frac{T_{\max}}{t_n} dt, \quad (1.26)$$

де $F_{j(t_1, t_2)}$ – потік пасажирів із зони, що знаходиться між ізохронами t_1 і t_2 , у зону j .

Отже, всі синтетичні моделі розрахунку пасажирських кореспонденцій мають спільний недолік – вони недостатньо обґрунтовано спираються лише на один фактор, що характеризує складність пересування між ТР, і найчастіше це відстань або час пересування (поїздки) пасажирів. Крім того, у таких моделях використовується обмежений набір показників для визначення кореспонденцій, причому їхній вибір часто базується на суб'єктивних міркуваннях. Це не дозволяє повною мірою відобразити ймовірнісний і багатофакторний характер транспортних зв'язків при формуванні МПК, у

результаті чого отримані дані можуть суттєво відрізнятися від реальних, тоді як допустима похибка у прогнозуванні попиту на транспортні послуги не повинна перевищувати (20–25) % [71, 90].

Проблеми і недоліки формування МПК з використанням синтетичних моделей стали поштовхом у розвитку ймовірнісного підходу до формування моделей транспортного попиту. У рамках цього підходу особливої уваги заслуговують моделі дискретного вибору [32, 71, 73, 91]. Ці моделі базуються на припущеннях про вибір шляху пересування пасажиром з певного набору альтернатив з урахуванням соціально-економічних факторів і їхньої привабливості [91-93]. Найпоширенішими моделями дискретного вибору є:

- мультиноміальна логіт-модель;
- ієрархічна логіт-модель;
- мультиноміальна пробіт-модель;
- змішана логіт-модель.

На відміну від синтетичних, моделі дискретного вибору більш детально враховують уподобання пасажирів щодо свого пересування, але оцінка точності результатів моделювання кореспонденцій за їх використання суттєво ускладнюється потребою у точній, достовірній інформації про фактичні пересування, яку можна отримати лише за рахунок проведення натурних спостережень або анкетування.

До групи ймовірнісних можна віднести регресійні моделі, сенс яких в рамках задачі створення МПК полягає у використанні широкого набору факторів, які характеризують потреби пасажирів у пересуваннях і їх вплив на формування пасажиропотоків через визначення коефіцієнтів регресійної моделі [66, 69-71, 91].

Також до цієї групи моделей розрахунку МПК відносяться моделі безпосереднього попиту, які використовуються для розв'язання одразу трьох задач з моделювання транспортного попиту – створення, розподіл і поділ [71, 93, 94]. Мультиплікативна модель визначення кореспонденцій представляється наступним чином [95]:

$$h_{ijk} = \varphi(P_i \cdot P_j)^{\theta_{T1}} (I_i \cdot I_j)^{\theta_{T2}} \prod_m \left[(t_{ij}^y)^{\alpha_{ry}^{(1)}} (c_{ij}^y)^{\alpha_{ry}^{(2)}} \right], \quad (1.27)$$

де φ, θ, α – параметри моделі;

P_i, P_j – чисельність населення ТР i та j ;

I_i, I_j – рівень доходів населення ТР i та j ;

t_{ij}^y – час поїздки між ТР i та j з використанням шляху пересування y ;

c_{ij}^y – вартість поїздки між ТР i та j з використанням шляху пересування y ;

T – вид транспорту, яким можна користуватися при пересуванні між районами i та j .

Основним недоліком моделі безпосереднього попиту є необхідність використання значної кількості параметрів, які отримуються за рахунок емпіричних досліджень. До цього ж слід додати її обмежене використання в розрізі моделювання саме міських МПК.

Іншим напрямом розвитку ймовірнісних моделей розрахунку МПК є запропонована фахівцями ХНАДУ ІК моделювання потреб населення у пересуваннях [66, 96]. Ця концепція ґрунтується на гіпотезі про те, що попит на пересування пасажирів (трудові пересування) носить випадковий характер і повинен бути описаний не однією МК, а їх множиною, кожна з матриць якої характеризує один із можливих станів транспортного попиту. Згідно з ІК граничними станами МПК є такі, що відповідають мініимальному і максимальному значенням транспортної роботи з реалізації пересувань пасажирів у межах об'єкту дослідження. Таким чином формалізований підхід до моделювання потреб у пересуваннях базується на твердженні про те, що кожен користувач системи ГТ має можливість використати альтернативні варіанти прямування до місця прикладання праці, а також змінювати місце роботи або проживання. За показники, що використовуються для оцінювання точності розрахункових МК, обрано різницю у транспортній роботі (1.28) та відхилення значень кореспонденцій (1.29):

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot l_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h'_{ij} \cdot l_{ij}, \quad (1.28)$$

$$\Delta H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (h_{ij} - h'_{ij})^2}, \quad (1.29)$$

де h_{ij} , h'_{ij} – відповідно, значення кореспонденції між ТР i та j у базовій і розрахунковій МПК, пас.;

l_{ij} – відстань між ТР i та j , км.

Основним недоліком ІК моделювання потреб населення у пересуваннях є занадто широкий діапазон можливих станів МПК.

Для ліквідації цього недоліку на прикладі міст різних категорій (великі, середні, малі) науковцями ХНАДУ розроблені підходи щодо звуження діапазону можливих станів МК [68, 70, 71].

Так, на прикладі малих міст [68, 75, 76] авторами запропоновано методику формування МПК на основі маршрутних МК кожного маршруту ГТ, які можна отримати за рахунок натурних спостережень. Зв'язок між кореспонденціями і місткостями зупиночних пунктів з відправлення і прибуття пасажирів описуються системою рівнянь (1.30), на основі якої було виведено загальні аналітичні залежності для розрахунку маршрутних кореспонденцій (1.31).

Основною перевагою даної методики створення МПК є висока точність вхідної інформації про маршрутні кореспонденції, що отримуються за результатами натурних обстежень. Недоліком є обмеженість застосування підходу для інших категорій міст, оскільки маршрутні мережі малих міст характеризуються незначною часткою пересувань з пересадками і малою кількістю міських маршрутів.

Отримані в [68] результати дозволили більше ніж у 10 разів скоротити інтервал можливих станів МПК в рамках реалізації ІК моделювання

транспортного попиту, досягти повної відповідності значень розрахункових та емпіричних обсягів перевезення пасажирів на маршрутах ГТ та забезпечити достовірну оцінку результатів транспортного моделювання з використанням PTV VISUM на прикладі малих міст.

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 = h_{13} + \dots + h_{1(n-1)} + h_{1n} = \sum_{j=3}^n h_{1j}, \\ \dots, \\ D_e = \sum_{j=e+1}^n h_{ej}, \quad e \in [2; n-2], \\ \dots, \\ A_r = \sum_{i=1}^{r-1} h_{ir}, \quad r \in [3; n-1], \\ \dots, \\ A_n = h_{1n} + h_{2n} + \dots + h_{(n-2)n} = \sum_{i=1}^{n-2} h_{in}. \end{array} \right. \quad (1.30)$$

$$h_j = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e \quad \text{або} \quad h_j = \sum_{r=1}^{\alpha} A_r, \quad \text{або} \quad h_j = \sum_{e=1}^{\alpha} D_e + \sum_{r=1}^{\alpha} A_r, \quad (1.31)$$

де α – кількість місткостей зупинок з відправлення або прибуття, $[1; n]$;

e, r – індекси місткостей зупинок, впорядковані в межах множини $[1; \alpha]$.

Розвитком [68] цілком можна вважати роботу [69], в якій запропоновано методику формування МПК на прикладі середніх міст. Представлена методика базується на результатах вибіркового табличного обстеження пасажиропотоків на міських маршрутах з подальшим використанням імітаційної моделі для генерації місткостей зупиночних пунктів за законом Пуассона і, відповідно, розподілом поїздок між зупинками. Далі отримані таким чином матриці маршрутних кореспонденцій агрегуються в загальну МПК з урахуванням приналежності кожної зупинки ГТ до відповідного ТР.

За аналогією із [68] в рамках запропонованої методики розрахунку МПК для середніх міст використано припущення про відсутність впливу пересадок на формування моделі попиту, що було підтверджено результатами натурних обстежень маршрутних мереж міст цієї категорії. Реалізація розробленої методики в [69] дозволила досягти суттєвого скорочення витрат різних ресурсів на проведення транспортних обстежень і формування загальної МПК.

На прикладі великих і найкрупніших міст [70] ІК було удосконалено за рахунок врахування випадкових факторів при розрахунку пасажирських кореспонденцій

$$h_{ij} = f(D_i, A_j, \varepsilon), \quad (1.32)$$

де ε – випадкові фактори.

Для формування можливих станів МПК автором [70] запропоновано рівноймовірнісний підхід, який базується на моделі (1.33)

$$h_{ij} = Q \cdot p_i \cdot p_j, \quad (1.33)$$

в свою чергу

$$p_i = \frac{D_i}{Q}, \quad p_j = \frac{D_j}{Q}, \quad \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{j=1}^n A_j = Q, \quad (1.34)$$

де p_i, p_j – відповідно, ймовірність відправлення і прибуття з ТР i та в ТР j ;

Q – загальна кількість пересувань пасажирів за розрахунковий період (сума по МК), пас.

Для формування можливих станів МПК автором розроблено імітаційну модель, що дозволило досягти суттєвого скорочення меж діапазону розрахункових МК в рамках інтервального підходу до моделювання потреб у

пересуваннях. Результати моделювання системи ГТ м. Харкова з використанням PTV VISUM свідчать, що сформована за методикою [70] МПК характеризується достатньо високим рівнем точності – середня помилка моделювання пасажиропотоків на мережі склала майже 8 %. Недоліком у розробленій методиці, в свою чергу, є достатньо велика кількість нульових кореспонденцій у згенерованих матрицях, для ліквідації якого необхідно враховувати додаткове обмеження щодо забезпечення відповідності між змодельованими МПК і фактичною МК за кількісною ознакою.

У цьому ж напрямку також слід відзначити роботу [71], в рамках якої авторам також вдалося суттєво звузити діапазон можливих станів МПК у рамках ІК моделювання транспортного попиту за рахунок використання функції розселення населення міською територією при розрахунку кореспонденцій. Такий результат досягнуто за рахунок використання лише тих станів МК, що відповідають фактичним закономірностям трудового розселення населення.

До того ж, слід відзначити ефективність використання інтервального підходу до моделювання потреб населення у пересуваннях у розрізі вирішення завдання щодо визначення місця розташування міжміської автостанції та встановлення її впливу на розподіл міських пасажиропотоків [52].

Представлені у [68, 70, 71] методики формування МПК для різних категорій міст дозволили досягти суттєвого звуження діапазону можливих станів попиту на пересування пасажирів і покращити розуміння положень і припущень ІК моделювання потреб у пересуваннях, а також отримали широке практичне застосування при виконанні реальних науково-дослідницьких робіт і проєктів, спрямованих на оптимізацію роботи систем ГТ в українських містах [97-103].

З розвитком технологій у науковій літературі почали з'являтися нові підходи до вирішення задачі формування МПК. Наприклад, авторами [104] для моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів використано елементи теорії нечіткої логіки. Значення кореспонденцій за цим

підходом визначаються наступним чином:

$$h_{ij} = \frac{2^{\frac{1}{\ln 2} C_{h_{ij}}}}{n_i \cdot n_j \sum_{r=1+m_b(i)}^{m_e(i)} \sum_{s=1+m_b(j)}^{m_e(j)} 2^{\frac{1}{\ln 2} C_{h_{rs}}}} \cdot t_{ij}, \quad (1.35)$$

де n_i, n_j – відповідно, кількість «вищих» (укрупнених) і звичайних ГР;

t_{ij} – тривалість пересування між ГР;

$C_{h_{ij}}, C_{h_{rs}}$ – компоненти, що встановлюються з використанням теорії нечіткої логіки на основі транспортного фактору – відстані від зупиночних пунктів мережі до потенційних пунктів тяжіння.

Іншим прикладом використання елементів нечіткої логіки і генетичних алгоритмів є робота [105], де розглядається задача визначення кореспонденцій з подальшим їх розподілом для сукупності промислових міст і територій відпочинку (туристичні місця) авіаційним транспортом. За результатами тестових прогонів розробленої моделі отримано достатньо точну оцінку розрахункових значень пасажиропотоків при їх порівнянні з реальними даними.

Моделі розрахунку та розподілу кореспонденцій, сформовані на основі нечіткої логіки та генетичних алгоритмів, що представлені як у [105], так і в інших роботах [106-112], розроблені та апробовані не на прикладі міської МПК, що відбиває пересування пасажирів ГТ. У більшості випадків за об'єкт дослідження обрано авіасполучення між містами або містами і туристичними зонами, або ж розглядається окрема система ГТ, наприклад, швидкісне залізничне сполучення.

Слід зауважити, що моделі розрахунку загальноміської МПК на основі теорії нечіткої логіки та генетичних алгоритмів не отримали широкого застосування на практиці. Основними причинами цього слід вважати відсутність якісної вхідної інформації – базової (фактичної) МК, на основі якої

існувала б можливість якісного «навчання» цих моделей, а також суб'єктивність при виборі параметрів функцій належності [73, 93, 111, 113].

Також з розвитком техніки і технологій, а також цифровізації галузі міського пасажирського транспорту, з'явилися підходи до створення МПК на основі аналізу та агрегування даних операторів стільникового зв'язку [113], інформації з петлевих детекторів, GPS-датчиків і ANPR-камер [114], інформації з різноманітних платіжних систем [115] тощо. Слід відзначити, що на даний час, на жаль, використання подібної інформації для створення МПК в українських містах і в Україні в цілому, є обмеженим. Причинами цього є: по-перше, впровадження військового стану в країні; по-друге, відсутність загальноприйнятого підходу на рівні міських територіальних громад щодо автоматизованого збору і аналізу даних про пересування населення ГТ; по-третє, більшість міст не мають відповідного бюджету на реалізацію проєктів з впровадження електронних систем оплати проїзду в ГТ і аналізу пасажиропотоків; по-четверте, відсутність ініціативи у пасажирських перевізників (в першу чергу приватних) щодо обладнання транспортних засобів технікою, необхідною для збору інформації про перевезених пасажирів, через небажання виведення з тіні даних про реальні обсяги перевезення.

Недоліки представлених у даному підрозділі дисертаційної роботи підходів до формування МПК свідчать про те, що навіть найбільш розповсюджені методи розрахунку МК (гравітаційна, ентропійна моделі) не гарантують необхідної точності результатів моделювання попиту на перевезення пасажирів у містах і є лише джерелом отримання якогось проміжного стану попиту, який зафіксовано в результаті обстеження пасажиропотоків на маршрутній мережі міста. Отримані в такий складний спосіб МПК використовуються фахівцями з транспортного моделювання лише для надання первинних якісних оцінок функціонування системи ГТ, а їх застосування для прогнозування розвитку систем ГТ є практично неможливим через необхідність суттєвого оновлення вхідних даних про місткості ТР. Це

підтверджує той факт, що задача моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ є складним не до кінця вирішеним питанням як з практичної, так і наукової точки зору, розв'язання якого потребує подальшого розвитку методів формування МПК з урахуванням сучасних тенденцій розвитку галузі транспортного планування.

Окремої уваги в рамках проведеного аналізу заслуговує ІК моделювання потреб населення у пересуваннях, яка ґрунтується на випадковому виборі пасажирів джерел і напрямків поїздок [66]. Хоча реалізація концепції і гарантує достовірність результатів розрахунків [68, 70, 71, 96], вона не містить механізму створення проміжних станів попиту, що ускладнює її практичне використання.

Складність формування МПК з точки зору реалізації ІК моделювання потреб населення в пересуваннях ГТ полягає у розробці множини альтернативних варіантів МК, які б характеризували можливі стани транспортного попиту в рамках обмежень на мінімальну і максимальну транспортну роботу по реалізації МК [52, 66]. Використання найбільш розповсюджених на даний час методів формування МПК не гарантує отримання й частини можливого переліку станів МПК для реалізації ІК.

1.3 Постановка, мета і задачі дослідження

Аналіз існуючих методів розрахунку МПК показав, що їх ключовою проблемою є точність відображення реального попиту на перевезення пасажирів ГТ. У реальних умовах такий попит має виражений випадковий характер, що ускладнює його адекватне відтворення в розрахункових матрицях, які використовуються у процесі транспортного планування. Ця випадковість обумовлена як непов'язаними з транспортним процесом причинами виникнення необхідності здійснення поїздок, так і з вільним вибором напрямів поїздок користувачами транспортної системи. Якщо

перший фактор може бути подоланий завдяки великій кількості користувачів, яка приводить до стабілізації попиту на рівні групових характеристик ТС на кшталт місткостей ТР або пасажиропотоків, то другий фактор являється постійно діючим завдяки різноманіттю сполучень місць генерації та поглинання пересувань. Тому спроба описати випадковий попит деяким одним варіантом МПК апіорі є не зовсім продуктивною, а у найбільш складних випадках моделювання ТС великих міст існуючі методи розрахунку матриць взагалі не в змозі надати такий її варіант, який би відповідав усім відомим характеристикам транспортного процесу, до яких у мінімальному варіанті відносяться все ті ж місткості ТР і пасажиропотоки на деяких ділянках ВДМ.

У такій ситуації єдиним шляхом забезпечення достатньої точності оцінки транспортного попиту є реалізація ІК його моделювання, яка передбачає створення декількох різних варіантів МПК, які відповідають всім відомим груповим характеристикам транспортного процесу, перелік яких не обмежується лише місткостями ТР і пасажиропотоками, а може бути доповнений іншими характеристиками, наприклад, відомою функцією розподілу дальності пересувань. Тоді наявність декількох різних варіантів МПК, що відповідають випадковому характеру попиту, дозволить отримати відповідну кількість шуканих оцінок ефективності альтернативних варіантів ТС і, тим самим, забезпечить осіб, відповідальних за прийняття рішень, комплексною оцінкою наслідків реалізації альтернатив, яка буде відображати не лише власне ефективність системи за обраними показниками, а ще її надійність та в деякому сенсі стійкість.

Задля досягнення цієї мети багатоваріантна модель попиту має забезпечувати максимальний рівень випадковості результатів генерації, яка дозволить досягти найширшого охоплення можливих станів попиту в межах відомих обмежень. Тому, при звичайній генерації випадкових матриць з обмеженнями лише на місткості ТР з прибуття та відправлення використовується прямокутний (рівномірний) розподіл, генератор випадкових

чисел за яким доступний у найбільш популярних пакетах офісних комп'ютерних програм. Він забезпечує максимально рівномірний розкид випадкових чисел у заданому діапазоні, що власне й вимагається. Сам генератор видає перелік випадкових чисел, рівномірно розподілених у межах інтервалу $[0; 1]$, а для переходу до іншого, фіксованого інтервалу необхідно зробити відповідний перерахунок. При визначенні випадкових чисел, рівномірно розподілених в межах інтервалу $[0; Y]$, які безпосередньо потрібні для генерації матриць, кінцевий результат досить просто визначається через множення виданого генератором випадкового значення на величину відомої правої границі розподілу Y .

При розрахунках номеру поточної клітинки МПК сама матриця представляється у вигляді лінійного вектору як послідовність розташованих одного за іншим її рядків у порядку зростання їх номерів, а права границя визначається через поточну розмірність матриці:

$$Y = N^2 - 1, \quad (1.36)$$

де N – кількість ТР в МПК.

Перехід від згенерованого випадкового номеру до індексів, які визначають місце поточної клітинки в МПК, здійснюється за наступними формулами:

$$i = \left\lfloor \frac{y - \text{MOD}(y; N)}{N} \right\rfloor + 1, \quad j = \text{MOD}(y; N), \quad (1.37)$$

де y – згенерований у межах $[0; N^2 - 1]$ випадковий номер поточної клітинки;

i – номер рядку (ТР відправлення) поточної клітинки в МПК;

j – номер стовпця (ТР прибуття) поточної клітинки в МПК;

$\text{MOD}(y; N)$ – залишок від цілочисельного ділення y на N .

Для визначення величини кореспонденції в поточній клітинці МПК h_{ij} права границя випадкового рівномірно розподіленого числа визначається як

$$Y = \min(D_i; A_j). \quad (1.38)$$

де D_i – місткість ТР i за відправленням;

A_j – місткість ТР j за прибуттям.

Після генерації поточної кореспонденції обидві місткості, яких вона стосується, зменшуються на згенероване значення

$$A'_i = A_i - y; \quad D'_j = D_j - y, \quad (1.39)$$

де A_i , A'_i – місткість ТР i з відправлення відповідно до та після чергової генерації;

D_j , D'_j – місткість ТР j з прибуття відповідно до та після чергової генерації;

y – величина згенерованої кореспонденції.

Після такого коригування процес продовжується генерацією нового номеру наступної поточної кореспонденції та її значення. Цей метод подвійної генерації, у подальшому – базовий метод, забезпечує максимально можливий рівень випадковості при генерації матриць, який може вважатися еталонним для всіх альтернативних методів, необхідність створення яких обумовлена тим, що наявність додаткових обмежень на МПК призводить до виникнення ситуацій, коли повне заповнення матриці стає неможливим.

Для подолання цієї проблеми необхідно створити новий метод генерації матриць, який гарантовано забезпечить формування нових МПК при всіх відомих додаткових обмеженнях. Для цього доцільно скористатися пропозицією, яка відображена в роботі [116] і спирається на здатність базового методу забезпечувати повне заповнення матриць при відсутності інших

обмежень, окрім місткостей ТР з прибуття та відправлення. При цьому процедура виконання додаткових обмежень відокремлюється від процедури генерації значень кореспонденцій, а їх дотримання забезпечується вже після того, коли вся МПК була заповнена. Тобто в запропонованому в роботі [116] методі генерації МПК заповнюється точно так само, як у першому випадку, а це безперешкодна процедура з гарантованим результатом. Потім з метою виконання обмежень з неї видаляються кореспонденції із заздалегідь відомими значеннями, які являються одним з можливих видів обмежень. І тут слід відзначити, що цей метод [116] спрямований на подолання лише однієї з причин виникнення тупикових ситуацій у процесі генерації матриць, яка виникає, наприклад, при генерації рейсових МПК за результатами табличних обстежень пасажиропотоків. Цим прикладом всі аналогічні ситуації не обмежуються, оскільки вони також поширюються на випадки ненульових, заздалегідь відомих значень кореспонденцій, але без втрати спільності ці значення також можна вважати нульовими, тому що коректним є шлях виділення їх в окрему матрицю та формування моделі попиту як суми двох МПК – випадкової та заданої, заздалегідь відомої. Дане обмеження на відомі значення окремих кореспонденцій не охоплює інших ситуацій, з груповими обмеженнями, які є сумою декількох кореспонденцій. До числа таких відносяться відомі пасажиропотоки на окремих ділянках ВДМ, відома функція розподілу дальності пересувань або інші групові характеристики транспортного процесу, які не можуть бути подолані шляхом простого видалення зайвих кореспонденцій.

Тому цей метод [116] не може претендувати на повноту вирішення проблеми генерації випадкових матриць з додатковими обмеженнями, до чого слід додати відсутність в інформаційному просторі результатів його практичного застосування. У той же час, він надає можливості для поетапного формування МПК, яке доцільно використати при створенні нового, практично придатного методу реалізації ІК моделювання попиту. Це обумовлене тим, що для проміжних матриць, які отримуються на кожному етапі генерації, можуть

бути розраховані деякі оцінні показники, які потенційно зможуть дозволити передбачити виникнення на наступному етапі генерації можливих тупикових ситуацій із заповненням матриць i , відповідно, уникнути їх перед тим, як виконувати цей наступний етап. Уникнути тупикових ситуацій із заповненням матриць можливо шляхом виконання критичних на даному етапі розрахунку обмежень через спрямоване заповнення необхідних для цього значень кореспонденцій і відповідного коригування місткостей ТР.

При реалізації базового методу і наявності заборони на заповнення деяких клітинок МПК після видалення з матриці заборонених для заповнення кореспонденцій у випадковій МПК залишаються лише ті з них, які не попадають під заборону, що й вимагається в підсумку. При цьому при врахуванні групових додаткових обмежень з матриці мають видалятися кореспонденції, позитивні значення яких призводять до порушення цих обмежень.

Тут варто розуміти, що місткості ТР після цієї операції можуть залишатися до кінця не вичерпаними, оскільки частина кореспонденцій була видалена з матриці, а деякі з них у загальному випадку мали ненульові значення. З цих ненульових значень видалених кореспонденцій формуються нові місткості ТР як залишок від попередніх місткостей та місткостей МПК, очищеної від зайвих значень задля виконання обмежень:

$$|A_{k+1}| = |A_{k-1}| - |A_k|; |D_{k+1}| = |D_{k-1}| - |D_k|, \quad (1.40)$$

де $|A_k|$, $|D_k|$ – відповідно матриці-вектори з місткостей ТР з відправлення та прибуття на k -му кроці моделювання попиту, $k \geq 1$.

При $k = 1$ значення $|A_0|$ та $|D_0|$ відображають початкові місткості ТР з відправлення та прибуття, які є вихідними даними для моделювання. Ці початкові місткості мають бути повністю вичерпаними по закінченню процесу формування підсумкової випадкової МПК. Вона у цьому методі є сумою всіх

МПК, згенерованих за залишковими місткостями до досягнення нульових векторів відправлення та прибуття:

$$K = k, \text{ при } |A_{k+1}| = |D_{k+1}| = |0|, \quad (1.41)$$

де K – випадкова кількість кроків на шляху імітації підсумкової випадкової МПК за новим методом, од.

Таким чином базовий метод генерації матриць [116], доповнений можливістю врахування групових обмежень, може забезпечити подолання проблеми невідомого заздалегідь результату генерації матриць за умови знаходження показників, які дозволять в процесі генерації визначати критичні обмеження, задля виконання яких слід спрямовано заповнювати декілька кореспонденцій відповідними значеннями. Очевидно, що такі дії в деякому ступені знижують випадковість процесу формування МПК, що має бути досліджено в даній роботі, але також зрозуміло, що ця втрата випадковості є неминучою платою за можливість врахування об’єктивно існуючих і відомих транспортним планувальникам характеристик транспортного процесу при реалізації ІК моделювання транспортного попиту.

1.4 Висновки по розділу

1. Прогнозування попиту на перевезення вантажів і пасажирів є однією з найбільш складних і водночас критично важливих задач транспортного планування, оскільки результати прогнозу безпосередньо впливають на формування маршрутних мереж, розподіл транспортних ресурсів, інвестиційні рішення та ефективність функціонування ТС. При цьому реальний транспортний попит має динамічний і значною мірою випадковий характер, що ускладнює його точне відтворення традиційними детермінованими моделями.

2. Сучасні підходи до моделювання вантажних МК не сформували самостійної методологічної бази та переважно є адаптацією або модифікацією методів, розроблених для пасажирських перевезень. Такий підхід не враховує специфіку формування вантажних потоків, які у значно більшому ступені обумовлені сталими зв'язками між виробниками і споживачами транспортних послуг у межах логістичних ланцюгів постачань, а також впливом економічних чинників і виробничо-складської структури територій. У результаті це призводить до обмеженої точності та зниженої практичної придатності результатів моделювання.

3. Узагальнення та аналіз існуючих методів формування МПК показали, що найпоширеніші синтетичні підходи (гравітаційні, ентропійні, тощо) мають низку суттєвих обмежень. Зокрема, вони значною мірою залежать від повноти та якості вихідних даних, потребують трудомістких польових обстежень, не завжди здатні адекватно відобразити випадкову природу транспортного попиту та обмежувати множину можливих станів попиту в умовах невизначеності.

4. Визначальна роль міського ГТ та його чутливість до просторово-часової варіативності попиту зумовлюють пріоритетність дослідження задачі моделювання МПК саме для систем ГТ. На відміну від вантажних перевезень, пасажирські пересування у системах ГТ формуються під впливом значної кількості чинників, зокрема індивідуальної поведінки пасажирів, змін у режимах роботи міських об'єктів, сезонних і соціально-економічних факторів, а також особливостей організації маршрутних мереж і розкладів руху. За цих умов саме МПК виступають ключовим елементом, що визначає адекватність прогнозування попиту, ефективність планувальних і управлінських рішень для розвитку систем ГТ.

5. Результати застосування традиційних методів формування МПК переважно відображають лише один умовно усереднений стан транспортного попиту, що не дозволяє врахувати варіативність поведінки пасажирів, вплив зовнішніх факторів та ймовірні сценарії зміни попиту в часі. Такий підхід

знижує адаптивність транспортних моделей і обмежує можливості прийняття обґрунтованих управлінських рішень у довгостроковій перспективі. Для врахування стохастичної природи транспортного попиту доцільно використовувати ІК моделювання транспортних потреб на пересування ГТ, у межах якої може бути сформовано сукупність станів МПК, що забезпечує більш повне відображення діапазону можливих станів матриці, підвищує надійність прогнозних рішень та розширює можливості аналізу альтернативних сценаріїв розвитку ТС.

6. Слід відзначити, що ефективна реалізація ІК неможлива без застосування спеціалізованих методів генерації множини МК, здатних відбивати допустимі, статистично обґрунтовані та взаємоузгоджені випадкові стани транспортного попиту. При цьому використання традиційних синтетичних методів не забезпечує необхідного рівня варіативності та повноти представлення можливих станів МК у межах ІК.

7. Проаналізований базовий метод випадкової генерації МПК, попри його потенціал щодо відображення стохастичної природи попиту, не гарантує отримання коректних і допустимих результатів за умов накладання додаткових групових обмежень на моделювання МК, особливо для ТС великого розміру. Це зумовлює необхідність удосконалення існуючих підходів і розроблення нових алгоритмів із вбудованими механізмами контролю коректності генерації випадкової МПК.

8. Розробка нового методу генерації випадкових МПК повинна базуватися на поєднанні принципів математичного та імітаційного моделювання. Такий метод має забезпечувати одночасне дотримання балансових обмежень на місткості ТР з відправлення та прибуття пасажирів, системи додаткових обмежень, наприклад, у вигляді фактичних пасажиропотоків на ділянках ВДМ або розподілу дальності пересування пасажирів, збереження статистичних характеристик попиту та формування максимально можливого рівня випадковості результатів моделювання МПК.

9. Перспективним напрямом удосконалення методів формування МПК є

застосування поетапної генерації випадкових станів транспортного попиту, яка дозволяє поступово формувати МК з контролем виконання заданих обмежень на кожному етапі. Такий підхід створює передумови для отримання гарантовано допустимих матриць, розширює можливості практичного використання ІК та підвищує достовірність результатів транспортного моделювання.

Основні результати досліджень, проведених в рамках цього розділу, опубліковані в роботах [1, 3, 6-10, 12, 13].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ МАТРИЦЬ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ З ДОДАТКОВИМИ ГРУПОВИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ НА ЗНАЧЕННЯ ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ

Метод моделювання транспортного попиту, який за наявності несуперечливих додаткових обмежень дозволяє гарантовано отримувати задану кількість випадкових матриць, достатню для практичної реалізації ІК формування моделей потреб пасажирів у пересуваннях, необхідно створювати, переслідуючи мету максимального збереження ступеню випадковості елементів матриць, що генеруються. Вирішення проблеми протиріччя між цією метою і необхідністю дотримання системи додаткових обмежень на формування матриці, незважаючи на зовні звичний вигляд такої постановки завдання, є зовсім нетривіальним завданням.

Це обумовлене специфічним характером обмежень на двомірні матриці, для яких властиві перехресні вимоги, коли кожне значення кореспонденції визначається декількома різними обмеженнями, що значно ускладнює досліджуване питання. У таких умовах для розробки відповідного алгоритму розрахунків спочатку необхідно створити надійну теоретичну основу, яка складається з принципів і правил роботи методу гарантованої генерації випадкових МПК, та заздалегідь переконатися у достатності ступеню випадковості результатів генерації з додатковими обмеженнями для досягнення цілей ІК формування моделей транспортного попиту на пересування пасажирів. Останнє питання слід вирішувати шляхом аналітичного порівняння потенційних результатів застосування нового методу формування МК з аналогічними результатами базового методу випадкової генерації МПК.

2.1 Теоретичні основи розробки алгоритму реалізації методу гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій

Основним і принципово важливим проблемним питанням для досягнення поставленої мети – створення методу гарантованої генерації випадкових матриць – є забезпечення алгоритмічної можливості передбачення тупикових ситуацій, які виникають внаслідок накладання додаткових обмежень на значення кореспонденцій. Іншим важливим питанням є забезпечення в процесі генерації максимальної випадковості значень кореспонденцій у результуючих матрицях, еталоном якої є розподіл кореспонденцій, який отримується базовим методом для вибору позиції (клітинки) в матриці і власне заповнення її значенням кореспонденції, згенерованим з використанням рівномірного розподілу.

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.

Інша 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 згоди [117], але внаслідок складної перехресної структури цих обмежень при їх

застосуванні до матриць і залежності від планувальних і транспортних властивостей 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 породжується самим методом, і тому в дослідженні 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 приречена на невдачу при розгляді реальних задач внаслідок дуже високої кількості і

комбінаторної 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.

Питанням оцінки різниці між кореспонденціями, які генеруються базовим і поетапним методами, присвячені наступні підрозділи дисертаційної роботи.

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 (ТСЛ) ХНАДУ досвіду можливо зробити висновок, що на матриці 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 наявного на кафедрі ТСЛ досвіду, ці обмеження виникають: при генерації рейсових МПК за результатами табличних обмежень пасажиропотоків [69]; при розгляді лише транспортних пересувань у великих територіальних об'єктах; при наявності відомих зі сторонніх джерел постійних значень частини кореспонденцій в матриці. 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 являються саме такими обмеженнями.

Іншими варіантами групових обмежень є відомі для об'єкту пасажиропотоки, розподіл дальності пересувань та обсяги перевезень пасажирів на маршрутах. Різниця між ними і одиничними обмеженнями полягає в тому, що всі вони є відомою сумою деяких кореспонденцій, об'єднаних загальною ознакою. 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 обстеженнями пасажиропотік на окремій ділянці ВДМ – 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 (те ж 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. Ті випадки, для яких таке об'єднання незастосовуване внаслідок особливостей території або недостатнього обсягу досліджень, існує принципова можливість врахувати декілька альтернативних шляхів для однієї кореспонденції через відповідні часткові коефіцієнти, що має сенс зробити в рамках загального алгоритму.

Така властивість групових обмежень надає можливості для зручної алгоритмізації їх врахування 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 матриці. 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 (1.38).

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 ненульовими потенціалами.

Але розраховувати на такій збіг не варто і у загальному випадку слід виконувати ці дії у тому разі, коли потенціал обмеження наблизився до його величини на деяке критичне значення. Передбачити його на теоретичному рівні поки що неможливо, але це критичне значення цілком піддається експериментальній оцінці, виходячи з тих міркувань, що чим ближче воно до залишкової величини обмеження, тим краще, тому що це знижує кількість

спрямованих призначень кореспонденцій і тим самим підвищує ступінь випадковості підсумкової матриці. З іншого боку, занадто мале критичне значення буде призводити до виникнення тупикових ситуацій і, відповідно, до відсутності результатів моделювання.

2.2 Теоретичні основи виконання заданих обмежень при випадковому заповненні матриць пасажирських кореспонденцій

Розробка методу виконання заданих обмежень при випадковому заповненні МК базується на припущенні про те, що всі обмеження на формування матриць мають вид простої 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 поїздок. Однак на початку і у ході процесу заповнення МК все ж необхідно перевіряти задані обмеження на їх сумісність.

Послідовне заповнення матриці надає можливості для оцінювання поточного стану МК після виконання чергового етапу заповнення. Для 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 все тієї ж випадковості такі варіанти можуть реалізовуватися і безпосередньо

при формуванні поточного варіанту МК, чому треба вміти завчасно запобігти. 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. 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 (дробу).

Тому, для оцінювання станів матриць з точки зору можливості їх подальшого заповнення для кожного обмеження доцільно ввести поняття відносного потенціалу, котрий у подальшому іменуватиметься просто «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:

$$\Pi_k = \frac{\sum_i^{N_k} \Pi_i}{r_k}. \quad (2.1)$$

де Π_k – потенціал k -го обмеження, $\Pi_k \geq 0$;

Π_i – потенціал i -ї комірки МК, яка є елементом k -го обмеження, $\Pi_i \geq 0$;

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 його максимально можливою величиною, виходячи з поточних значень обмежень

$$\Pi_i = \min(\forall r_i). \quad (2.2)$$

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

Визначений таким чином потенціал достатньо повно характеризує можливості для заповнення МК з урахуванням заданих обмежень. При цьому значення $\Pi_k > 1$ означатиме, що виконання k -го обмеження можливе на наступному етапі заповнення МК. Значення $\Pi_k = 1$ 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, $0 \geq \Pi_k \geq 1$, 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 не приведе до таких значень потенціалів обмежень, або ж діяти так само, як і за

умови $\Pi_k = 1$, але 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 на невиправдано довгий час і взагалі не вирішити проблему, оскільки усунення проблеми неможливості виконання одного обмеження може привести до її появи в інших обмеженнях. Це означатиме, що поставлена у даній роботі 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 діючими обмеженнями, при значенні $\Pi_k > 1$ цілеспрямоване заповнення комірок принципово може бути виконано тільки із застосуванням деякої стратегії їх вибору. Ця проблема не виникатиме при $\Pi_k = 1$, оскільки тоді існує лише один варіант заповнення, але сподіватися на гарантоване набуття потенціалом значення, рівного одиниці, у випадковому процесі не приходиться. 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 реалізації методу може приводити до помітного збільшення тривалості розрахунків, що буде особливо проблемним 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.

Згідно 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 скінченним і перейти до цілеспрямованого заповнення комірок. Передбачити на цьому, попередньому, етапі раціональні значення обох параметрів (Π_{\max} і кількості ітерацій на певному 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.

Ще одним важливим керуючим параметром у випадковому процесі заповнення МК є обмеження на максимальну величину кореспонденції, яка генерується 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 іншого боку, зростання значень цього керуючого параметру 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 прийняттого 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 фахівцям з транспортного моделювання обмежень на МК. Врахування відповідних змін у самому процесі заповнення матриці з точки зору ймовірності появи незакінчених процедур формування МК є вторинним і повинне 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 інженерів і дослідників ранньою діагностикою виникаючих у цьому процесі питань і пропонувати відповідні інструменти для їх 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.

Таким чином, можна констатувати, що 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 у даному і попередньому підрозділах

дисертаційної роботи положеннях комп'ютерна програма гарантованої генерації випадкових МПК наведена в додатку А у вигляді написаного на мові Visual Basic for Applications (VBA) програмного коду, реалізованого в MS Excel. Такий спосіб реалізації програми дозволяє використовувати всі можливості MS Excel при формуванні системи обмежень, що є дуже актуальним, так як це завдання не є простим, враховуючи розмірність реальних матриць і кількість обмежень, які можуть на них накладатися.

2.3 Теоретичне обґрунтування результатів генерації матриць пасажирських кореспонденцій власне випадковим методом

Особливості запропонованого методу генерації МПК викликають питання щодо відповідності між отриманими за його допомогою матрицями і матрицями, які є результатом їх випадкової генерації у чистому вигляді, без обмежень. В обох випадках базою для отримання матриць виступає описаний раніше метод подвійної генерації, де на першому кроці випадковим чином визначається поточний номер клітинки МПК, на другому – ця клітинка заповнюється кореспонденцією шляхом доповнення її поточного значення новою випадковою величиною. Також в обох випадках для генерації використовується рівномірний розподіл, який забезпечує максимально можливий розкид результатів.

Обидва методи генерації МПК, базовий та новий, формують у підсумку випадкові матриці, кожна клітинка в яких містить випадкову величину (ВВ). Варто зауважити, що отримані кореспонденції являються різними ВВ, оскільки методи їх генерації помітно відрізняються між собою. Відповідно, властивості цих величин мають бути різними, незважаючи на однакові вхідні дані для генерації. Необхідно оцінити цю різницю між кореспонденціями для розуміння того, наскільки новий метод відрізняється від базового за результатами. Оскільки базовий метод забезпечує максимальний рівень

випадковості при генерації матриць, відмінності нового методу в значному ступені будуть відображати деякі втрати випадковості в результатах моделювання МПК. Однак, незважаючи на практичну неможливість кількісної оцінки цих втрат, сама по собі різниця у значеннях кореспонденцій є важливою для розуміння не лише відмінностей у отримуваних результатах моделювання попиту в рамках ІК, а й можливостей забезпечення з їх використанням інтервальних оцінок показників функціонування ТС.

Основною та найбільш повною характеристикою ВВ є її закон розподілу (ЗР) [118], який в деякій формі (зазвичай табличній або аналітичній) відображає взаємозв'язок між значеннями цієї величини та ймовірністю їх виникнення. Тому й порівнювати значення кореспонденцій, отриманих за допомогою базового та нового методу генерації МПК, слід за їх ЗР. Задля цього спочатку необхідно отримати уявлення про ЗР кореспонденцій у підсумкових випадкових матрицях, а потім – його залежність від вхідних даних, тобто місткостей ТР за відправленням та прибуттям. Останні, в свою чергу, також є випадковими та мають свій ЗР, який можливо оцінити лише емпіричним шляхом внаслідок відсутності теоретичних передумов їх формування на сучасному рівні розвитку методів транспортного моделювання.

Основну увагу в цьому процесі слід приділити процесу визначення саме ВВ кореспонденції в матриці, оскільки з точки зору результатів генерації перший випадковий вибір – її поточного номеру – означає лише вибір конкретної реалізації випадкових значень місткості ТР з відправлення та прибуття пасажирів. Його вплив реалізується через залежність значень кореспонденцій на певному кроці генерації, для яких поточні місткості ТР з відправлення та прибуття відрізняються від стартових місткостей A_0 та D_0 . Взагалі-то кажучи, кількість таких кореспонденцій, залежних від попередніх реалізацій, є чималою, але врахувати ці взаємозалежності між кореспонденціями для реальних МПК практично неможливо внаслідок великого розміру останніх, який значно перевищує доступну для розгляду

кількість ТР, наприклад, у (5-6) одиниць. Розгляд матриць надто великого розміру не має сенсу внаслідок відсутності для них реальних даних щодо місткостей ТР з відправлення та прибуття.

Тому для оцінки різниці у результатах застосування базового та нового методів генерації МПК слід зупинитися на розгляді лише тих кореспонденцій, які формуються на початку заповнення МПК та не залежать від реалізації попередніх етапів алгоритму генерації матриць. Власне цього буде достатньо для оцінки різниці між методами генерації МПК, а вибір поточного номеру кореспонденції в даному випадку не здійснює впливу на ЗР кореспонденцій, що робить можливою аналітичну оцінку виду та параметрів ЗР для них.

Задача отримання аналітичного виразу для ЗР кореспонденцій, сформованих базовим методом, являє собою визначення параметрів ВВ, яка виникає в результаті генерації рівномірно розподіленої ВВ з постійною лівою межею 0 та випадковою правою межею розподілу Y . Ця задача, з випадковою межею рівномірного розподілу, не є тривіальною. Для її вирішення спочатку необхідно наочно уявити собі особливості цього процесу задля отримання коректного перетворення випадкових місткостей ТР у випадкові кореспонденції за таких умов.

Незважаючи на те, що місткості ТР з відправлення та прибуття зазвичай є безперервними ВВ, та мінімальне значення серед усіх наявних місткостей також буде безперервним, на початку краще розглянути процес їх перетворення на прикладі дискретно розподілених місткостей. Це значно спрощує сприйняття процесу виникнення нової ВВ завдяки наявності чітко визначених проміжків між дискретними значеннями правої межі рівномірного розподілу кореспонденцій. До того ж дискретні місткості ТР з відправлення та прибуття все ж не є забороненими в транспортній науці, а тому при появі завдання на моделювання попиту з дискретними місткостями ТР перетворення, отримане тут як допоміжне рішення, стане до нагоди, що для даної роботи буде означати отримання загального рішення.

Як відомо, щільність рівномірного розподілу ВВ не залежить від значення аргументу, а залежить лише від довжини відрізка, на якому визначений розподіл [118]. У випадку кореспонденції h з лівою (нижньою) межею 0 та правою межею Y вона виглядає як

$$f(h) = \frac{1}{Y}, \quad h > 0. \quad (2.3)$$

Якщо Y є дискретною ВВ, розподіленою за якимось відомим законом, то вона має щільність розподілу, тобто зв'язок між її значенням та ймовірністю його виникнення у нескінченій серії випробувань. У дискретному випадку властивості місткостей ТР відносять праву межу рівномірного розподілу кореспонденцій до множини натуральних чисел $Y \in [0; \infty]$, а знання ЗР забезпечує для кожного значення з цієї множини відому ймовірність $P(y)$. Так як випадок, коли $Y = 0$, не змінює МПК в процесі її генерації, то у подальшому буде розглядатися дискретна права межа, розподілена на промені $Y \in [1; \infty]$. На цій основі можна записати, що кореспонденції в МПК будуть розподілені наступним чином:

$$f(h) = \frac{1}{y} \text{ з ймовірністю } P(y), \quad (2.4)$$

де y – реалізація ВВ Y , мінімуму з місткостей ТР.

Тобто у даному випадку всі кореспонденції є рівномірно розподіленими на окремих відрізках з відомою ймовірністю

$$f(h) = \begin{cases} 1, & \text{з ймовірністю } P(1); \\ \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } P(2); \\ \dots & \\ \frac{1}{y}, & \text{з ймовірністю } P(y). \end{cases} \quad (2.5)$$

Для кращого розуміння процесу генерації кореспонденцій на рисунку 2.1 наведений приклад їх розподілу за умови відповідності мінімуму з місткостей ТР з відправлення та прибуття закону Пуассона з параметром $\lambda = 6$, що відображається відповідним розташуванням відрізків вздовж вертикальної осі графіку.

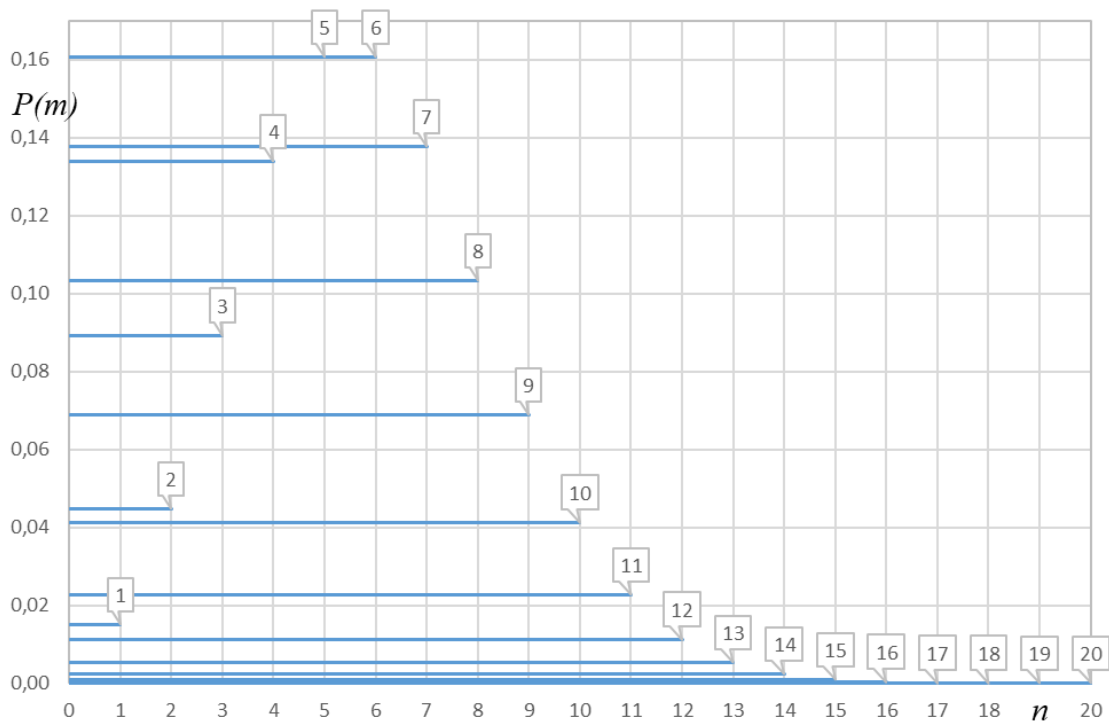


Рисунок 2.1 – Розподіл кореспонденцій в МПК за базовим методом за умови відповідності розподілу правої межі значень кореспонденцій закону Пуассона з параметром $\lambda = 6$

При такому процесі властивість рівномірного розподілу мати однакову щільність вздовж всього відрізка, на якому реалізується ВВ, дозволяє

стверджувати, що у випадку, коли права межа розподілу, наприклад, дорівнює 2, щільність розподілу кореспонденції може бути переписана наступним чином:

$$f(h) = \frac{1}{2} \text{ з ймовірністю } P(2) = \begin{cases} 1, & \text{з ймовірністю } \frac{P(2)}{2}; \\ \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } \frac{P(2)}{2}. \end{cases} \quad (2.6)$$

Для даного випадку це обумовлене тим, що рівномірно розподілена на відрізку $[0;2]$ ВВ з рівною ймовірністю розподілена на двох відрізках $[0;1]$ та $]1;2]$. Відповідно до цього, у загальному випадку, для $y = m$

$$f(h) = \frac{1}{m} \text{ з ймовірністю } P(n) = \begin{cases} 1, & \text{з ймовірністю } \frac{P(m)}{m}; \\ \frac{1}{2}, & \text{з ймовірністю } \frac{P(m)}{m}; \\ \dots \\ \frac{1}{n}, & \text{з ймовірністю } \frac{P(m)}{m}. \end{cases} \quad (2.7)$$

Тобто кожне значення правої межі рівномірного розподілу створює відрізок від 0 до себе та завдяки властивостям рівномірного розподілу надає всім елементарним відрізкам, з яких складається повний відрізок між 0 та Y , ймовірність, яка дорівнює $\frac{P(m)}{m}$, рисунок 2.2.

Тобто стартова ймовірність рівномірного розподілу на відрізку $[0;2]$, яка у відповідності до закону Пуассона дорівнює $P(2)=0,0446$, насправді приводить до генерації кореспонденцій на відрізках $[0;1]$ та $]1;2]$ з ймовірністю $P(2)=0,0223$.

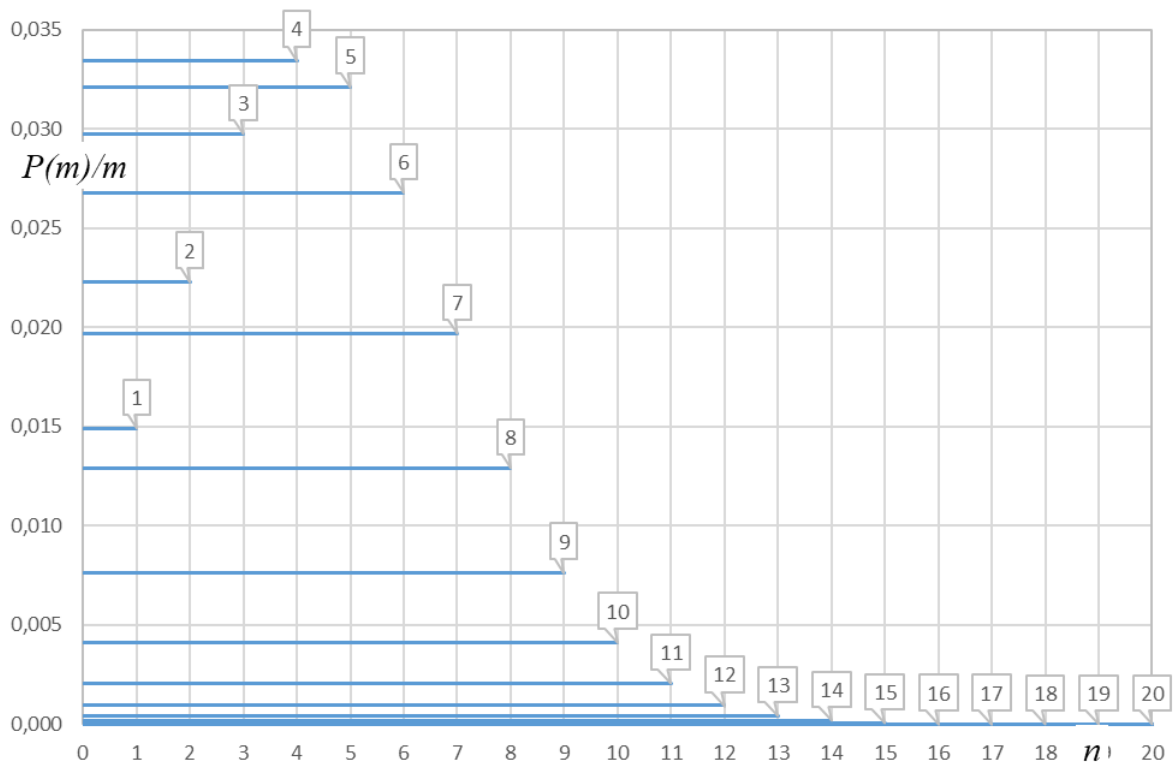


Рисунок 2.2 – Ймовірність виникнення кореспонденцій, яка створюється кожним значенням їх дискретної правої межі

Після підстановки (2.7) у (2.5) з'являється можливість перегрупувати рівномірно розподілені між дискретними значеннями правої межі кореспонденції шляхом об'єднання в єдиний елемент всіх виразів з однаковим знаменником. Для першого натурального числа цей вираз буде виглядати таким чином:

$$f(h) = 1, \text{ з ймовірністю } \sum_{m=1}^{\infty} \frac{P(m)}{m}. \quad (2.8)$$

Для $u=2$

$$f(h) = \frac{1}{2}, \text{ з ймовірністю } \sum_{m=2}^{\infty} \frac{P(m)}{m}. \quad (2.9)$$

Відповідно, у загальному випадку для всіх u

$$f(h) = \frac{1}{y}, \text{ з ймовірністю } \sum_{m=y}^{\infty} \frac{P(m)}{m}. \quad (2.10)$$

Отриманий вираз (2.10) являє собою шукану щільність розподілу величини кореспонденції в МПК, згенерованої за допомогою базового методу для випадку дискретних місткостей ТР з відправлення та прибуття. Він дозволяє легко перейти до випадку безперервних місткостей ТР з відправлення та прибуття. Ключовим результатом у (2.10) є той факт, що завдяки властивостям рівномірного розподілу, його одиничні відрізки дублюються в інших таких же відрізках, що знаходяться правіше від них до самої правої межі з відповідною ймовірністю, що відображається нижньою межею сумування у виразі (2.10).

Цей процес добре ілюструється рисунком 2.3, на якому наведений результат перетворення дискретних місткостей ТР з відправлення та прибуття в розподіл кореспонденцій при заповненні МПК базовим методом.

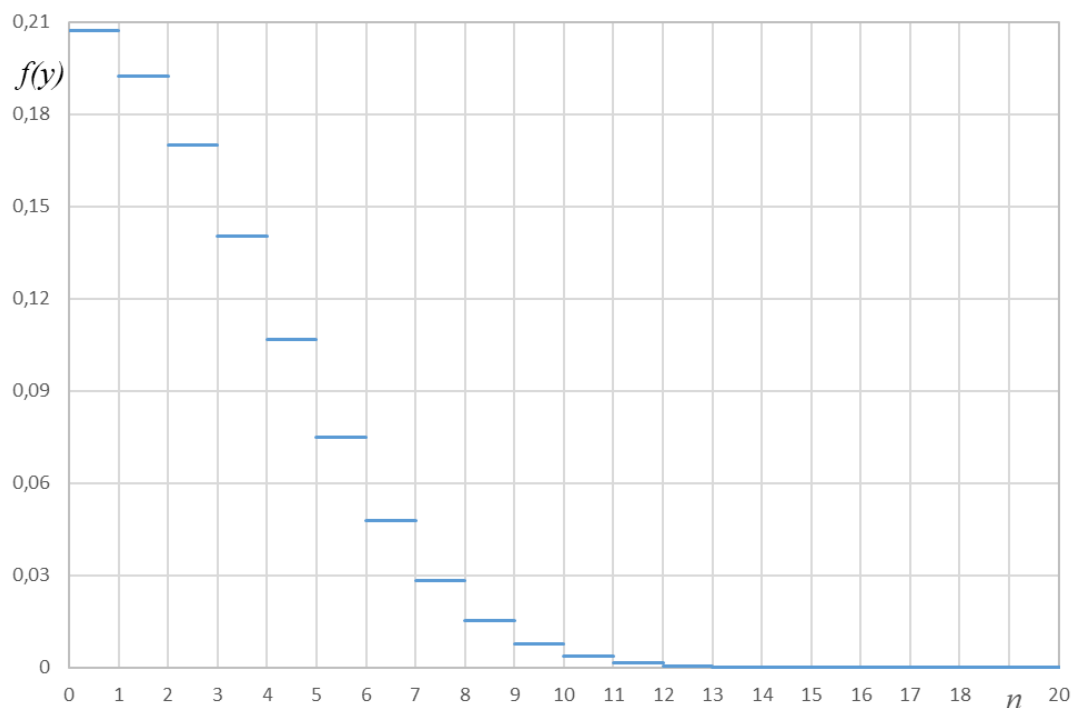


Рисунок 2.3 – Розподіл кореспонденцій в МПК за умови відповідності розподілу правої межі значень кореспонденцій закону Пуассона з параметром $\lambda = 6$

Цей результат свідчить про те, що базовий метод генерації МПК не є чутливим до розподілу мінімуму з місткостей ТР з відправлення і прибуття та в реальних умовах завжди буде приводити до монотонно спадаючого розподілу кореспонденцій, що має бути враховано при реалізації ІК моделювання МПК.

При переході від дискретного до безперервного розподілу довжини відрізків між окремими значеннями правої межі рівномірного розподілу прагнуть до нуля, значення індексу n , який позначає окреме дискретне значення правої межі цих відрізків $n \rightarrow y$, а сума перетворюється на інтеграл. Тому, якщо щільність розподілу правого кінця відрізка – носія рівномірного розподілу кореспонденцій на відріжку $[0; Y]$ – позначена як $g(y)$, то аналогічний (2.10) вираз для безперервного випадку має наступний вигляд:

$$f(h) = \int_h^{\infty} \frac{g(y)}{y} dy, \quad (2.11)$$

де $g(y)$ – щільність розподілу мінімуму з місткостей ТР з відправлення та прибуття.

Цей вираз описує перетворення рівномірно розподілених випадкових значень, які виникають в процесі генерації МПК, в розподіл кореспонденцій в підсумковій матриці. Користуючись ним, можливо оцінювати ЗР ВВ кореспонденції $f(h)$, якщо задати функцію щільності розподілу мінімуму з місткостей ТР відправлення і прибуття для МПК.

Як підсумок, задачу теоретичного обґрунтування результатів генерації МПК базовим, власне випадковим методом, можна вважати вирішеною для загального випадку. При цьому ЗР мінімуму з місткостей ТР відправлення і прибуття для кореспонденцій, як вже відзначалась раніше, може бути визначений лише емпіричним шляхом за допомогою обробки експериментальних даних з існуючих моделей транспортного попиту. Тому

завдання перевірки коректності отриманої моделі результатів генерації МПК за допомогою базового методу має бути висвітлене в наступному, експериментальному розділі роботи.

2.4 Прогнозування результатів формування матриць пасажирських кореспонденцій новим методом поетапної генерації

У цьому підрозділі необхідно визначити вид і параметри ЗР кореспонденцій у матрицях, створених як сума окремих випадкових МПК, згенерованих базовим методом зі спадними місткостями. Це має забезпечити загальний характер результатів дослідження, незалежний від набору конкретних даних з місткостей ТР з відправлення та прибуття. Різноманіття видів об'єктів транспортування, географічні особливості регіонів і міст, специфічний характер взаємодії економічних суб'єктів та індивідуальний характер транспортних моделей приводять до дуже широкого спектру можливих варіантів розподілу місткостей ТР з відправлення та прибуття.

Таке ж різноманіття буде властиве й мінімуму з місткостей ТР, на пересіченні яких генерується кожна нова кореспонденція. З метою спрощення сприйняття параметрів ЗР правої межі рівномірного розподілу, всі міркування стосовно них в подальшому будуть виконуватися власне для місткостей ТР з відправлення та прибуття, виходячи з того, що розподіл мінімуму з двох ВВ успадковує загальні властивості розподілу змінних, які його породжують.

Охопити всі потенційно можливі розподіли місткостей в одному дослідженні практично неможливо, тим більше, що постійний розвиток транспортного моделювання та розширення сфери його застосування забезпечують регулярне доповнення до цього спектру. У таких умовах варто зупинитися на найбільш загальних варіантах розподілу кореспонденцій або місткостей ТР з відправлення та прибуття.

Різноманіття умов виникнення останніх та велика кількість факторів, що впливають на їх значення, частка з яких перелічена в попередніх підрозділах роботи, наводять на думку про те, що розподіл місткостей у більшості випадків має бути наближеним до нормального ЗР Гауса. Проте, цей закон є двобічно нескінченим, що означає можливу наявність від'ємних значень у розподілі місткостей, які не мають реального сенсу, оскільки місткості ТР з відправлення та прибуття завжди є не меншими нуля. При визначенні закономірностей коливання таких величин доцільно використовувати інший закон – гамма-розподіл, для якого нормальний розподіл є граничним випадком з параметром форми, що прямує до нескінченності [119]. Саме цей закон у різних його варіантах, тобто з різними параметрами форми, буде вважатися загальною формою розподілу місткостей ТР з відправлення та прибуття в даному дослідженні.

Це не виключає можливості використання інших законів, подібних за формою до гамма-розподілу. Дане застереження виникло тому, що неможливо отримати явний аналітичний вираз для значень кореспонденцій з рівняння (2.11) для правої межі рівномірного розподілу, яка відповідає гамма-розподілу, внаслідок відсутності аналітичного вирішення інтегралу. Тому гамма-розподіл у даному дослідженні буде виступати в ролі орієнтиру для розподілу місткостей ТР з відправлення та прибуття, а його конкретний вигляд буде визначатися з урахуванням можливостей аналітичного моделювання.

Більш надійною основою для вирішення задачі даного підрозділу є розподіл значень кореспонденцій, отриманих за допомогою базового методу генерації МПК. Властивості перетворення місткостей у значення кореспонденцій, які були відзначені в попередньому підрозділі дисертації, та низька чутливість результату генерації до розподілу місткостей з впевненістю дозволяють стверджувати, що шукані кореспонденції, згенеровані за базовим методом, з високою ймовірністю будуть мати монотонно спадний характер з максимумом у початку координат, як це видно з рисунку 2.3. Серед відомих та розповсюджених ЗР в найбільшому ступені цій закономірності відповідає

показниковий закон з функцією щільності

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x), \quad x \geq 0, \quad 0 < \lambda < 1. \quad (2.12)$$

де λ – параметр ЗР, $\lambda = \frac{1}{a}$;

a – математичне сподівання ВВ.

Тому саме показниковий закон буде вважатися основною гіпотезою для розподілу кореспонденцій в МПК, сформованої за допомогою базового методу генерації.

Виходячи з цього, варто оцінити, який теоретичний розподіл буде мати права межа рівномірного розподілу в даному випадку, та порівняти його з гама-розподілом як найбільш загальним законом для місткостей ТР з відправлення та прибуття. З цією метою необхідно вирішити зворотну по відношенню до залежності (2.11) задачу – визначити ЗР мінімуму з місткостей ТР з відправлення та прибуття $g(y)$ на основі заданої щільності розподілу кореспонденцій $f(h)$. Для цього необхідно диференціювати праву та ліву частини рівності (2.11) по змінній h .

Нехай функція $g(y)$ безперервна на промені $[0; \infty)$ і існує кінцевий інтеграл $\int_0^{\infty} g(y) dy$. Розглянемо приріст функції

$$f(x + \Delta x) - f(x) = \int_{x+\Delta x}^{\infty} g(y) dy - \int_x^{\infty} g(y) dy = - \int_x^{x+\Delta x} g(y) dy. \quad (2.13)$$

За теоремою про середнє значення [120], існує точка $C \in (x; x + \Delta x)$ така, що

$$\int_x^{x+\Delta x} \frac{g(y) dy}{\Delta x} = g(C), \quad x < C < x + \Delta x. \quad (2.14)$$

Межа відношення приросту функції до приросту аргументу, коли приріст аргументу прагне до нуля, дорівнює похідній функції у відповідній точці

$$\begin{aligned} \frac{df(x)}{dx} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{- \int_x^{x+\Delta x} g(y) dy}{\Delta x} = \\ &= - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} g(C) = - \lim_{C \rightarrow x} g(C) = -g(x), \end{aligned} \quad (2.15)$$

оскільки $x < C < x + \Delta x$, а функція $g(x)$ безперервна в точці $x \geq 0$ і при $\Delta x \rightarrow 0$, $C \rightarrow x$.

Тобто похідна по нижній межі від невластного інтеграла зі змінною нижньою межею дорівнює взятому з протилежним знаком значенню функції під знаком інтеграла в нижній межі.

Тоді з (2.11) можна записати

$$\frac{df(h)}{dh} = -\frac{g(h)}{h}, \quad h > 0. \quad (2.16)$$

З виразу (2.16) слідує, що

$$g(h) = -h \frac{df(h)}{dh}, \quad h > 0 \quad \text{або} \quad g(y) = -y \frac{df(y)}{dy}, \quad y > 0. \quad (2.17)$$

Тепер отримане перетворення (2.17) можна застосувати для визначення ЗР мінімуму з місткостей ТР з відправлення та прибуття на основі кореспонденцій, розподілених за показниковим законом (2.12):

$$g(y) = -y \frac{d(\lambda \exp(-\lambda y))}{dy} = -y \lambda \exp(-\lambda y). \quad (2.18)$$

Тобто права границя рівномірного розподілу в даному випадку має лінійно-показникову щільність. Цей розділ не відноситься до числа типових, але він має форму, дуже наближену до гамма-розподілу, рисунок 2.4.

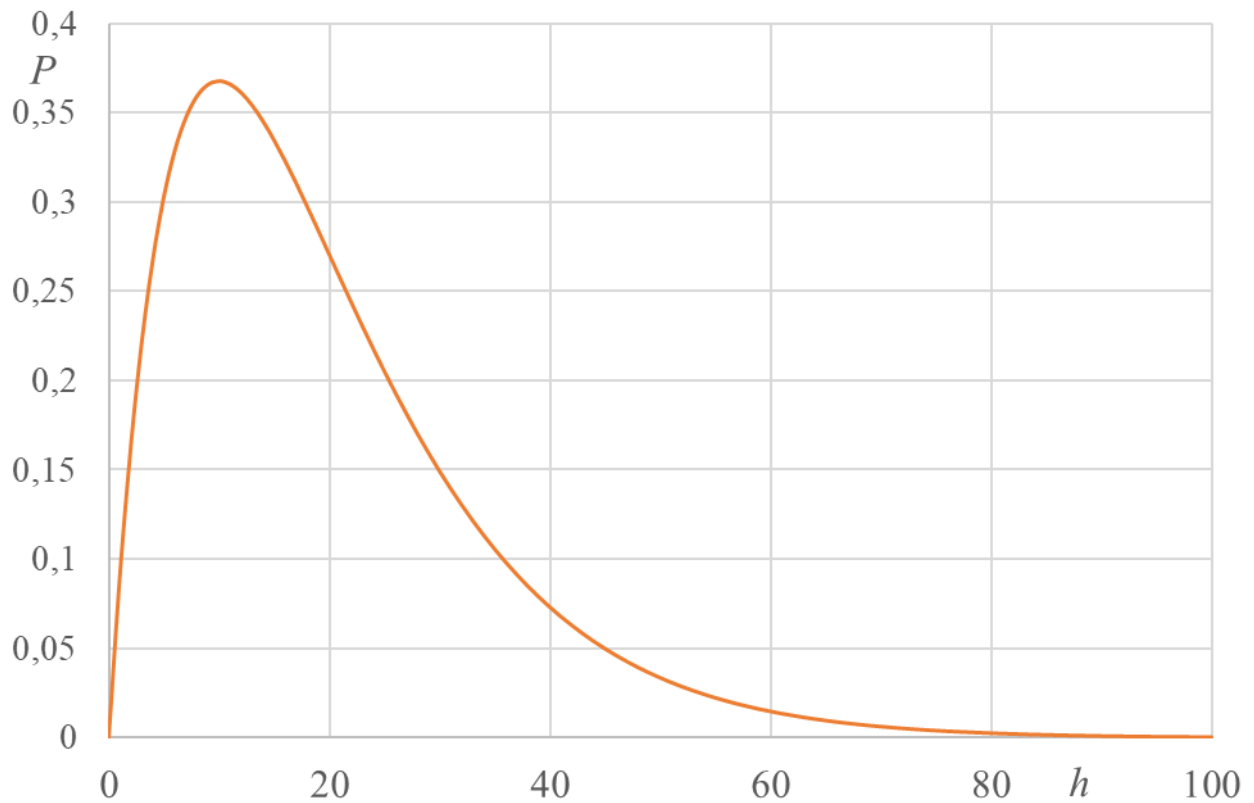


Рисунок 2.4 – Лінійно-показникова щільність розподілу з параметром $\lambda = 0,1$

Така відповідність загальній формі розподілу місткостей ТР з відправлення та прибуття надає змоги вважати, що розглянутий випадок є близьким до гіпотетично загального як за місткостями ТР, так і за кореспонденціями, та на його основі можна будувати оцінку ЗР кореспонденцій, згенерованих новим методом генерації МПК.

Технологія побудови МПК поетапним методом передбачає покрокове коригування місткостей ТР після виконання обмежень за залежністю (1.40). Звичайно, що результат генерації матриць буде суттєво залежати від того, яка частина МПК підпадає під додаткові обмеження. З багаторічного досвіду реального транспортного моделювання кафедри ТСЛ ХНАДУ відомі різні

варіанти обмежень у моделях попиту, кожний з яких обумовлює власний набір «заборонених» клітинок МПК. Найменші з них складаються з декількох клітинок, максимальні обмеження охоплюють більше половини матриці. Зі збільшенням кількості обмежень, зростають залишкові місткості ТР на черговому кроці та, відповідно, збільшується кількість кроків на шляху створення підсумкової матриці. Чим більше часткових матриць складається у підсумкову, тим, вочевидь, значніше будуть відрізнятися кореспонденції в МПК, побудованій за допомогою поетапного методу, від результатів генерації за базовим методом. Ця загальна тенденція приводить до висновку, що оцінювати різницю в ЗР кореспонденцій у різних методах генерації моделей транспортного попиту доцільно на випадках з максимальною кількістю «заборонених» клітинок МПК, тоді коли різниця між кореспонденціями буде найзначнішою.

Така ситуація має місце у випадку генерації рейсових МПК на маршрутах ГТ, коли всі кореспонденції реалізуються лише у правій верхній частині матриці, обмеженій знизу її головною діагоналлю. Загальна кількість обмежень тут дорівнює $N(N-1)/2$, але у подальшому, задля спрощення розуміння процесу, буде розглядатися ситуація, в якій кількість «заборонених» клітинок охоплює рівно половину МПК

$$R = \frac{N^2}{2}, \quad (2.19)$$

де R – кількісна характеристика обмежень, повна кількість клітинок у підсумковій МПК з наперед відомим, нульовим значенням кореспонденції, од.

Базовий метод генерації матриць на кожному кроці гарантує повністю випадкове заповнення її клітинок, що дозволяє перейти від кількості клітинок до їх значень на основі обґрунтованого припущення, що частка кореспонденцій, яка підпадає під обмеження, буде пропорційною кількості «заборонених» клітинок. Тоді з (2.19) та (1.40) слідує, що

$$|A_{k+1}| \approx \frac{1}{2}|A_k|; |D_{k+1}| \approx \frac{1}{2}|D_k|. \quad (2.20)$$

Знак приблизної рівності в (2.20) використаний внаслідок випадковості процесу заповнення матриць, але він не вносить ніяких змін у процес пошуку закономірностей розподілу кореспонденцій. Це співвідношення дозволяє перейти до оцінки математичного сподівання місткостей ТР на кожному кроці генерації МПК. За умови збереження ненульових значень у всіх місткостях

$$\overline{A}_{k+1} = \frac{1}{2}\overline{A}_k; \overline{D}_{k+1} = \frac{1}{2}\overline{D}_k, \quad (2.21)$$

де $\overline{A}_k, \overline{D}_k$ – математичне сподівання місткостей ТР з відправлення та прибуття на k -му кроці моделювання попиту відповідно.

Відповідно до (1.38) і права межа рівномірного розподілу в процесі формування підсумкової матриці буде змінюватися аналогічно (2.21)

$$\overline{Y}_{k+1} = \frac{1}{2}\overline{Y}_k, \quad (2.22)$$

де \overline{Y}_k – математичне сподівання мінімуму з місткостей ТР на k -му кроці моделювання попиту.

Тоді з (2.12) слідує, що

$$\lambda_{k+1} = 2\lambda_k. \quad (2.23)$$

Знання процесу зміни параметру ЗР кореспонденцій дозволяє перейти до формалізації процедури формування підсумкової МПК поетапним методом. Вона у цьому методі є сумою всіх МПК, згенерованих за залишковими

місткостями до досягнення нульових значень для всіх відправлень та прибуттів

$$H = \sum_{k=1}^K H_k, \quad h = \sum_{k=1}^K h_k, \quad (2.24)$$

де H , H_k – МПК підсумкова та проміжна на k -му кроці моделювання попиту відповідно;

h , h_k – елемент (клітинка) підсумкової матриці та проміжної на k -му кроці моделювання попиту відповідно.

Так як елементи проміжних матриць є ВВ із показниковим розподілом, то елементи підсумкової матриці є ВВ з щільністю розподілу

$$f(h) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \lambda_k \exp(-\lambda_k h), \quad (2.25)$$

У зв'язку зі змінним характером параметру λ показникового ЗР доданків, цей вираз не є сумою незалежних, однаково розподілених ВВ, який при достатній їх кількості приводить до нормального закону Гауса, що було би швидким, але невірним результатом. У цьому випадку необхідно аналітично визначити вид розподілу кореспонденцій у підсумковій матриці, ґрунтуючись на властивостях доданків суми та їх кількості.

Кількість доданків визначається кількістю кроків на шляху поетапної генерації, яка є випадковою та, з огляду на (2.21), може бути нескінченною. Але для реального процесу це не так, тому що параметр показникового розподілу λ згідно з (2.12) обмежений зверху значенням 1, що означає, що середні місткості ТР з відправлення та прибуття мають бути більше одиниці. Для переважної більшості реальних моделей попиту таке обмеження є досить реальним, тому що такі залишкові значення місткостей ТР не вважаються значущими. В інших випадках необхідно уважно переглянути одиниці виміру

для об'єкту транспортування, щоб зробити результати моделювання більш прийнятними для користувачів.

Завдяки цьому кількість кроків на шляху поетапної генерації є випадковою, але обмеженою зверху, тобто кінцевою величиною, що є дуже важливим для властивостей підсумкових кореспонденцій.

Доданки суми розподілені показниково, що дуже ускладнює оцінку результатів їх підсумовування. Але ця функція має аналітичний аналог у вигляді ряду Тейлора [121], який за своїми властивостями повністю співпадає з оригіналом при нескінченній кількості членів ряду. На першому кроці генерації показникова функція, розкладена у ряд Тейлора, виглядає таким чином:

$$\exp(-\lambda x) = 1 + \frac{-\lambda x}{1!} + \frac{-\lambda^2 x^2}{2!} + \frac{-\lambda^3 x^3}{3!} + \dots + \frac{-\lambda^n x^n}{n!} + \dots,$$

на другому, з урахуванням (2.23),

$$\exp(-2\lambda x) = 1 + \frac{-2\lambda x}{1!} + \frac{-2^2 \lambda^2 x^2}{2!} + \frac{-2^3 \lambda^3 x^3}{3!} + \dots + \frac{-2^n \lambda^n x^n}{n!} + \dots,$$

на третьому

$$\exp(-4\lambda x) = 1 + \frac{-4\lambda x}{1!} + \frac{-4^2 \lambda^2 x^2}{2!} + \frac{-4^3 \lambda^3 x^3}{3!} + \dots + \frac{-4^n \lambda^n x^n}{n!} + \dots.$$

У загальному випадку відповідний ряд виглядає наступним чином:

$$\exp(-2^k \lambda x) = 1 + \frac{-2^k \lambda x}{1!} + \frac{-2^{2k} \lambda^2 x^2}{2!} + \frac{-2^{3k} \lambda^3 x^3}{3!} + \dots + \frac{-2^{nk} \lambda^n x^n}{n!} + \dots,$$

$$k \in [0, K - 1]. \quad (2.26)$$

Нумерація кроків у (2.26) змінена та в подальшому буде використовуватися в такому вигляді для більшої зручності запису формул.

Тоді розподіл кореспонденцій у проміжних матрицях буде мати наступний вигляд:

$$f(h_k) = 2^k \lambda + \frac{2^{2k} \lambda^2 (-h)}{1!} + \frac{2^{3k} \lambda^3 (-h)^2}{2!} + \frac{-2^{4k} \lambda^4 (-h)^2}{3!} + \dots \\ \dots + \frac{-2^{(n+1)k} \lambda^{n+1} (-h)^n}{n!} + \dots \quad (2.27)$$

Після підсумовування (2.27) згідно з (2.25) розподіл кореспонденцій у підсумковій матриці виглядатиме наступним чином:

$$f(h) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left[2^k \lambda + \frac{2^{2k} \lambda^2 (-h)}{1!} + \frac{2^{3k} \lambda^3 (-h)^2}{2!} + \frac{-2^{4k} \lambda^4 (-h)^2}{3!} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{-2^{(n+1)k} \lambda^{n+1} (-h)^n}{n!} + \dots \right] \quad (2.28)$$

У цьому виразі доцільно перегрупувати доданки задля відокремлення окремих членів ряду:

$$f(h) = \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^k \lambda}{K} + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{2k} \lambda^2 (-h)}{K \cdot 1!} + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{3k} \lambda^3 (-h)^2}{K \cdot 2!} + \\ + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{-2^{4k} \lambda^4 (-h)^2}{K \cdot 3!} + \dots + \sum_{k=0}^{K-1} \frac{-2^{nk} \lambda^n h^n}{K \cdot n!} + \dots \quad (2.29)$$

Далі доцільно винести параметр показникового ЗР за загальні дужки та у кожному доданку зробити аналогічну операцію із залишковими константами, які не змінюються при підсумовуванні. Це робиться задля того, щоб мати можливість наочно порівняти отримані результати зі стартовим виглядом ряду Тейлора для показникової функції:

$$f(h) = \lambda \left[\begin{aligned} & \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^k}{K} + \frac{-\lambda h}{1!} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{2k}}{K} + \frac{-\lambda^2 h^2}{2!} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{3k}}{K} + \\ & + \frac{-\lambda^3 h^3}{3!} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{4k}}{K} + \dots + \frac{-\lambda^n h^n}{n!} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{(n+1)k}}{K} + \dots \end{aligned} \right]. \quad (2.30)$$

З (2.30) добре видно, що після підсумовування окремих кореспонденцій підсумкова кореспонденція має подібний до показникового розподілу вигляд, де кожний з членів ряду Тейлора отримав власний коригуючий коефіцієнт, який дорівнює $\sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{(n+1)k}}{K}$ за умови $n \in [0, \infty]$. Отримані множники є кінцевими внаслідок обмеженості K . Це дає підстави очікувати того, що поетапний метод генерації не змінює виду ЗР кореспонденцій, властивого базовому методу генерації, але потребує подальшої перевірки властивостей отриманого у вигляді ряду Тейлора ЗР (2.30).

Зважаючи на те, що калібрувальна умова з рівності одиниці площі під функцією (2.30) виконується автоматично завдяки тому, що вона є середньою з K таких одиничних площ, зазначену перевірку можна зробити по ключових точках показникового розподілу на початку та в кінці розподілу.

На початку розподілу, при $h=0$, $f(h) = \frac{\lambda}{K} \sum_{k=0}^{K-1} 2^k$, тобто початкове значення параметру показникового розподілу збільшується на множник у вигляді геометричної прогресії, ділений на кількість кроків генерації МПК. Скорегований таким чином параметр ЗР буде відповідати показниковому розподілу за умови $\lambda < 1$, виконання якої залежить від початкового значення λ . Для максимальної системи обмежень, що розглядається, множник при ньому сягає значення 10 на сьомому кроці генерації, тобто існують достатні можливості для формування підсумкової МПК зі збереженням умов відповідності кореспонденцій у ній показниковому розподілу. Вихід за ці межі, як вказувалося раніше, неможливий для реальних об'єктів моделювання.

На правому кінці розподілу слід переконатися в тому, що при $h \rightarrow \infty$,

$f(h) \rightarrow 0$, тобто знайти відповідну межу ряду (2.30). Його доданки, без врахування константи λ та першого доданку, які не впливають на результат оцінки, дорівнюють

$$a(n) = \frac{(-\lambda h)^n}{1!} \sum_{k=0}^{K-1} \frac{2^{nk}}{K}, \quad n \geq 1. \quad (2.31)$$

Сума членів геометричної прогресії $\sum_{k=0}^{K-1} q^k = \frac{q^K - 1}{q - 1}$, $q \neq 1$, при $q = 2^n$ та з

врахуванням множника $\frac{1}{K}$ дорівнює $\frac{1}{K} \frac{2^{nK} - 1}{2^n - 1}$.

Межа відношення наступного члена до попереднього визначається за допомогою тотожних перетворень і виділення головних частин множників різниць у чисельнику і знаменнику відповідного граничного процесу:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a(n+1)}{a(n)} &= (-\lambda h) \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n!}{(n+1)!} \left(\frac{(2^{(n+1)K} - 1)(2^n - 1)}{(2^{nK} - 1)(2^{n+1} - 1)} \right) \right] = \\ &= (-\lambda h) \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{(2^{(n+1)K} - 1)2^n}{(n+1)2^{nK}2^{n+1}} \right] = (-\lambda h)2^K \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{n+1} \right] = 0. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Тобто, для будь-яких наперед заданих та фіксованих λ , h та K , згідно з ознакою Даламбера [121], ряд (2.30) сходиться до 0. Це також свідчить про відповідність результуючого розподілу кореспонденцій, згенерованих поетапним методом у випадку максимальних обмежень на МПК, показниковому ЗР.

Звідси можна стверджувати, що поетапний метод генерації МПК не перетворює показниковий ЗР кореспонденцій на інший навіть при максимальних обмеженнях на МПК. Тут також слід розуміти, що отриманий результат дійсно відображає максимальну різницю між розподілом

кореспонденцій у базовому та поетапному методах, так як у виводі підсумкового розподілу не враховувались такі пом'якшуючі результати процеси, як наявність незаповнених клітинок МПК на усіх кроках генерації та постійне зменшення кількості заповнених клітинок, яке об'єктивно відбувається при просуванні в процесі генерації та зменшенні значень місткостей ТР.

Для інших реальних випадків, які виникають у процесі моделювання транспортного попиту, кількість обмежень є набагато меншою, що приведе до більш короткого шляху поетапної генерації з одиничними кроками на ньому. Зміни у параметрі показникового розподілу кореспонденцій у таких умовах взагалі будуть маловідчутними.

Таким чином, поетапний метод генерації матриць забезпечує збереження показникового розподілу кореспонденцій, який властивий максимальному рівню випадковості в процесі формування моделі транспортного попиту, що свідчить на користь його практичної реалізації в рамках ІК моделювання потреб населення у пересуваннях.

2.5 Висновки по розділу

1. Представлені у розділі теоретичні засади формують методологічне підґрунтя для побудови механізму гарантованої генерації МПК, основна мета якого полягає у забезпеченні можливості моделювання МК, що відповідають усім заданим обмеженням і при цьому максимально зберігають випадковість. Основними проблемами при розробці нового методу випадкової генерації МК є наявність тупикових ситуацій, що виникають через накладання додаткових обмежень на матрицю, а також втрата випадковості, спричинена як сумуванням багатьох випадкових величин, так і потребою спрямованого (примусового) заповнення частини кореспонденцій у критичних ситуаціях.

2. Використання потенціалу обмеження дозволяє прогнозувати ризик

невиконання умов моделювання та визначати момент переходу від випадкового до цілеспрямованого заповнення матриці. Надмірне цілеспрямоване заповнення, хоча й знижує випадковість при генерації МК, але є необхідним для гарантованого виконання обмежень, а контроль потенціалів забезпечує баланс між випадковістю та коректністю представлення результатів моделювання транспортного попиту.

3. Теоретично обґрунтовано, що базовий метод генерації МПК формує кореспонденції з монотонно спадаючим розподілом, у якому максимальні ймовірності властиві малим значенням, що узгоджується з показниковим законом. ЗР кореспонденцій у МПК, генерованих за допомогою базового методу, є універсальним і практично не залежить від конкретного розподілу місткостей ТР, що забезпечує передбачуваність статистичних властивостей значень у клітинках матриць. Основою для порівняння результатів роботи нового, поетапного методу генерації МК з результатами генерації МПК за базовим методом є відповідність ЗР кореспонденцій у них та їх статистичних характеристик.

4. Теоретично доведено, що поетапний метод генерації МПК зберігає показниковий характер розподілу кореспонденцій навіть у найекстремальніших умовах з великою кількістю обмежень. Параметр показникового розподілу змінюється на кожному кроці генерації МК, проте кількість кроків скінченна, що забезпечує математичну керованість процесу та стабільність підсумкового розподілу. Сума проміжних МПК не змінює форму розподілу, що підтверджує практичну придатність поетапного методу для застосування у рамках ІК моделювання транспортного попиту та збереження максимальної випадковості результатів.

5. Запропонований алгоритм поетапної генерації МПК надає підґрунтя для реалізації експериментального дослідження процесу формування моделей транспортного попиту та підвищення точності відтворення МПК у рамках ІК моделювання потреб населення у пересуваннях.

6. Розроблена комп'ютерна програма для генерації МК дозволяє

ефективно реалізувати гарантоване випадкове заповнення МПК і є інструментом для практичного прогнозування тупикових ситуацій, пов'язаних із обмеженістю представлення моделей транспортного попиту.

Основні результати досліджень, проведених в рамках цього розділу, опубліковані в роботах [1, 2, 4, 11].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНОГО ПОПИТУ

Наявність комп'ютерної програми для генерації МПК створює підґрунтя для експериментального оцінювання працездатності розробленого алгоритму моделювання станів транспортного попиту на пересування пасажирів з урахуванням накладання можливих обмежень.

Всі обмеження на структуру матриць, що генеруються з використанням розробленої програми, можна розділити на три категорії: базові, позиційні та додаткові. З метою забезпечення зручності підготовки даних для генерації МК кожна з представлених категорій обмежень повинна бути сформована і введена в програму до початку запуску макросу.

Для отримання якісного результату генерації МК потрібна валідована вхідна інформація, яка отримана за підсумками соціологічних, транспортних обстежень або обстежень мобільності населення, і з використанням якої сформовані моделі транспортного попиту, які, в свою чергу, стали основою для оцінювання ефективності функціонування існуючого варіанту транспортного обслуговування населення міським пасажирським транспортом і розробки заходів з удосконалення роботи систем ГТ у містах. Така інформація може бути отримана з раніше проведених дисертаційних досліджень за тематикою даної дисертаційної роботи [66-72] та підсумків виконаних фахівцями кафедри ТСЛ ХНАДУ госпдоговірних робіт у різні часи [97-103]. Інформації, отриманої з таких джерел, повинно бути достатньо для опису і представлення всіх категорій обмежень при генерації МК з використанням розробленого алгоритму поетапного формування матриць.

Отже, даний і наступний розділи дисертаційної роботи будуть присвячені експериментальному підтвердженню працездатності розробленого методу поетапної генерації МК, який дозволяє врахувати всі можливі категорії обмежень, шляхом порівняння результатів моделювання МК за розробленим

алгоритмом і базовим (власне випадковим) методом. Для співставлення результатів генерації МК за цими двома методами за критерій доцільно використовувати відповідність виду ЗР кореспонденцій у згенерованих матрицях.

3.1 Визначення параметрів для генерації моделей транспортного попиту

Метою даного підрозділу дисертаційної роботи є вибір і обґрунтування параметрів, що будуть використані для генерації станів транспортного попиту на пересування пасажирів з використанням базового (випадкового) методу і методу поетапної генерації МПК.

Для досягнення мети необхідно обрати такий об'єкт, який створюватиме надійну основу для використання всіх категорій обмежень у межах розробленого алгоритму генерації МПК. За такі обмеження доцільно прийняти найбільш стабільні характеристики пересувань, до яких відносяться місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів і функція (крива) розселення населення. Вибір саме цих характеристик обумовлений тим, що інші групові обмеження такі як пасажиропотоки на ділянках маршрутної мережі та обсяги перевезень пасажирів на маршрутах не є такими стабільними та найчастіше використовуються як параметри для калібрування розрахункових варіантів МПК.

Кількість місткостей ТР з відправлення і прибуття пасажирів визначає кількість рядків і стовпчиків генерованої МК, які, взагалі кажучи, можуть не співпадати, і тоді результуюча матриця буде не квадратною, а прямокутною. Суми місткостей ТР з відправлення і прибуття повинні бути рівними між собою і відповідати загальній кількості пересувань у МК.

Слід розуміти, що базові обмеження у програмі генерації МК враховуються автоматично, але тільки для тих комірок, для яких у матриці потенціалів вказане значення є не меншим за значення будь-якої з місткостей

основне призначення яких полягає у можливості побудови специфічних матриць, в котрих частина кореспонденцій завідома не може реалізуватися. Такі ситуації виникають у тих випадках, коли, наприклад: 1) модель попиту не містить внутрішньорайонних пересувань; 2) стоїть задача формування рейсової МК на якомусь окремому маршруті; 3) частина матриці вже повністю відома і у такому випадку вона повинна бути виключена із розрахунку; 4) заздалегідь відомо, що якісь частини матриці можуть бути тільки нульовими, оскільки зв'язки між ТР відсутні, тощо. Така можливість забезпечується введенням нульових значень у відповідні комірки матриці потенціалів (рисунок 3.1), котра, як було вказано раніше, представляє собою масив даних, аналогічний за розмірністю до МК, що генерується. Нульове значення потенціалу кореспонденції, з урахуванням передбаченої у програмі неможливості збільшення стартового значення потенціалу, приводить до отримання нульового значення самої кореспонденції у підсумковій МК.

Наступною категорією обмежень є додаткові обмеження, що служать для врахування фактичних даних, відомих із результатів обстежень або інших джерел інформації і відображають об'єктивні параметри транспортного процесу, врахування яких дозволяє підвищити точність його моделювання. Такими даними можуть бути, наприклад, розподіл поїздок по «складності» (часу або відстані) сполучення або відома на усіх або окремих ділянках ВДМ кількість поїздок (транспортні або пасажирські потоки) за період аналізу. Можуть існувати й інші параметри, придатні для використання як додаткові обмеження, для яких відомі суми визначених наборів кореспонденцій або ж їх можна визначити та які можуть бути виокремлені з МК за певними ознаками.

Додаткові обмеження представляють собою умову, за якої кореспонденції певним чином прикріплюються до заданих їх наборів – кишень, – причому кожне значення може бути віднесене тільки до однієї кишені. Відсутність закріплення за кишенею не допускається для жодної комірки і буде приводити до помилки при роботі програми. Якщо суми елементів відомі не для всіх комірок матриці, то слід створювати додаткову

«фіктивну» кишеню, до котрої повинні бути прикріплені кореспонденції з невідомим для них закріпленням. Закріплення певної кореспонденції за неіснуючою кишенею, коли вказується дуже великий номер, має не такі критичні наслідки – просто ця кореспонденція ніколи не буде заповнена. Це те саме, що позиційне обмеження для неї вказати рівним 0.

Кількість кишень, взагалі то кажучи, може бути будь-якою. При цьому лише варто мати на увазі, що чим більше кишень буде в додаткових обмеженнях, тим складніше буде отримати повністю заповнену МК внаслідок зменшення кількості варіантів матриці, що забезпечують дотримання всіх обмежень.

Обмеженнями на генерацію МК виступають задані для кожної кишені сумарні значення кореспонденцій, що відносяться до них. Їх аналогом є місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів, у яких приналежність кореспонденції до певної кишені повністю визначається її позицією в МК. У додаткових обмеженнях закріплення кореспонденцій за кишнями здійснюється на основі інших даних, котрі не відносяться безпосередньо до МК.

Приналежність елементів МК до кишень задається у вигляді матриці приналежності, аналогічної за розмірністю МК. У ній вказуються натуральні числа, що відповідають номерам кишень. Наявність у цій матриці значень, відмінних від номерів кишень, для котрих задані обмеження, буде призводити до помилок при генерації МК. У такому варіанті представлення додаткових обмежень кожній кишені буде відповідати своє значення сумарного обсягу пересування пасажирів у межах конкретного інтервалу потрапляння відстаней пересувань пасажирів за умов використання у вигляді додаткових обмежень кривої розселення населення.

За умов відсутності додаткових обмежень у переліку обмежень на генерацію МК слід ввести 0 або залишити пустою відповідну комірку робочого листа, а матрицю приналежності заповнити однаковими значеннями, наприклад, 1.

Для керування процесом заповнення МК також передбачено введення параметрів (налаштувань) для програми, що дозволяють впливати на результати генерації матриць:

- максимально допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні у комірку;
- мінімальне значення потенціалу основного обмеження, після котрого воно починає виконуватися;
- генерація значення кореспонденції, що заповнюється;
- перемикач примусового виконання обмежень;
- мінімальне значення потенціалу додаткового обмеження, після якого воно починає виконуватися.

Перше налаштування – максимально допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні у комірку – здійснює вплив на процес генерації, зменшуючи середнє значення кореспонденції і збільшуючи кількість заповнених комірок у МК, що генерується. При цьому також збільшується ймовірність отримання успішного результату генерації випадкової МК, але ціною за всі ці переваги є помітне зростання тривалості розрахунків. Іншими словами, чим менше значення буде прийняте для цього налаштування, тим близькою до фактичної може бути згенерована МК (за умов повного і правильного опису всіх можливих обмежень), але тривалішим буде сам процес генерації матриці.

Мінімальне значення потенціалу основного обмеження представляє собою множник перед залишковою незаповненою місткістю ТР з відправлення або прибуття у добутку, який порівнюється з поточним потенціалом цього обмеження. Якщо потенціал виявиться меншим, вмикається процедура цілеспрямованого заповнення кореспонденцій, що відповідають даному обмеженню. Воно повинно бути більше 1. Його зростання знижує ступінь випадковості результату генерації, але підвищує ймовірність її успіху.

Інше налаштування – генерація значення кореспонденції, що

заповнюється, – це параметр, котрий дозволяє відключити випадковість у процесі генерації значення кореспонденцій. Якщо він дорівнює 0, то значення кореспонденції, що заповнюється, буде максимально можливим із усіх обмежень на поточному етапі. Якщо він більше 0, то значення кореспонденції, що заповнюється, буде обрано випадковим чином у інтервалі від 1 до максимуму. Цей параметр також впливає на розподіл величини кореспонденцій і їхню кількість, як і перший параметр, зі значним впливом на ступінь випадковості МК, що генерується.

Перемикач примусового виконання обмежень у вимкненому стані дозволяє зімітувати процес генерації випадкової МК без використання потенціалів обмежень, тобто у базовому варіанті моделювання. Він передбачений для потенційного оцінювання ефективності розробленого методу і алгоритму генерації МК.

Останнє налаштування – мінімальне значення потенціалу додаткового обмеження – параметр, аналогічний другому у представленому вище переліку, передбаченому для базових обмежень, з аналогічним впливом на процес генерації МК.

Звичайно, вибір остаточних значень налаштувань програми залежатиме від обраного для дослідження об'єкту та мети генерації МК, але початкові параметри генерації МК можна встановити, відштовхуючись від наявної інформації, наприклад, значень місткостей ТР з відправлення та прибуття пасажирів або ж загального обсягу пересувань, який визначається сумою місткостей ТР з відправлення або прибуття.

На цьому етапі визначення параметрів для генерації матриць залишається визначитися з прийнятним рівнем точності результатів генерації моделей транспортного попиту. Безумовно, ідеальним результатом генерації МК є повне виконання системи накладених обмежень, тобто відсутність нерозподілених кореспонденцій (залишок дорівнює 0 %). Проте з огляду на ітераційний характер алгоритму та можливі суперечності між окремими групами обмежень досягнення абсолютно нульового залишку не завжди є

технічно доцільним і може вимагати непропорційного збільшення обчислювальних витрат.

У зв'язку з цим виникає потреба у встановленні допустимого порогу відхилення результатів генерації МК за розробленим методом, який не призводитиме до суттєвого викривлення оцінки транспортного попиту. Обґрунтування такого порогу доцільно здійснювати за аналогією з поняттям рівня статистичної значущості, що визначає ймовірність помилки першого роду – тобто ймовірність визнання несуттєвих відхилень суттєвими. У контексті генерації МК це означає встановлення такого граничного рівня нерозподілених кореспонденцій, за якого їх наявність не спричиняє статистично та практично значущого впливу на характеристики транспортного попиту.

З урахуванням зазначеного, допустимим можна вважати залишок нерозподілених кореспонденцій у межах (0,25–1) % від загального обсягу пересувань у матриці. Нижня межа (0,25 %) відповідає підвищеним вимогам до точності моделі та може застосовуватися для стратегічних розрахунків або калібрування моделей. Верхня межа (1 %) узгоджується з поширеним у статистичній практиці рівнем значущості та може інтерпретуватися як такий рівень відхилення, що з високою ймовірністю не призводить до суттєвих помилок у результатах моделювання. У разі виконання розрахунків на початкових етапах аналізу транспортного попиту допустимим може бути і ширший поріг (до 5 %), однак його використання потребує окремого обґрунтування з огляду на цілі дослідження.

Разом з тим більш принциповою є не стільки величина сукупного залишку, скільки дотримання окремих додаткових обмежень, наприклад, обсягу пересувань у межах конкретної кишені. Концентрація навіть невеликого залишку в межах декількох обмежень одночасно може свідчити про структурну невідповідність моделі системі заданих обмежень. Тому доцільно встановити умову, за якої допустимий залишок може відноситися лише до одного додаткового обмеження, а його частка в межах цієї кишені не

перевищує 1 % від відповідного обсягу кореспонденцій.

Отже, позитивним результатом генерації МК за розробленим методом поетапного формування моделей транспортного попиту слід вважати такі випадки:

- сформована МК повністю відповідає системі обмежень, накладених у процесі її генерації (залишок нерозподілених кореспонденцій дорівнює 0 %);
- сформована МК має залишок нерозподілених кореспонденцій, що не перевищує встановленого граничного рівня $((0,25-1) \%)$ від загального обсягу пересувань) і за умови, що цей залишок зосереджений у межах лише одного додаткового обмеження та не перевищує 1 % обсягу кореспонденцій у відповідній кишень.

Для визначення керуючих параметрів для генерації моделей транспортного попиту за власне вибіркоким і поетапним методом на першому етапі запропоновано за максимально допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК, використовувати сумарне значення кількості пересувань пасажирів для обраного об'єкту експериментальних досліджень. Після підбору інших налаштувань програми, за умови десятиразової поспіль успішної генерації МК, величина максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, зменшуватиметься на 50 % і далі будуть коригуватися інші налаштування для генерації моделей транспортного попиту.

3.2 Застосування методу поетапної генерації матриць кореспонденцій на відомих даних попиту на пасажирські пересування у містах

Представленим у підрозділі 3.1 даного дослідження вимогам щодо надійності опису і відбиття всіх категорій обмежень при генерації МК поетапним методом відповідають результати дослідження [71]. 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 ТР з відправлення і прибуття пасажирів м. Харкова, – базові обмеження – можна отримати з роботи [70].

Інформація про місткості ТР з прибуття пасажирів для формування МПК у [70] 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. Дані про місткості ТР з відправлення і прибуття відносяться до базових обмежень і можуть вважатися основною інформацією для генерації МПК базовим і поетапним методом, і представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Місткості ТР з відправлення і прибуття, пас. [70]

Номер ТР	Місткість ТР, пас.		Номер ТР	Місткість ТР, пас.	
	з відправлення	з прибуття		з відправлення	з прибуття
1	2	3	4	5	6
1	6597	1375	25	1573	1486
2	2481	548	26	7000	1825
3	123	563	27	247	1535
4	8580	4791	28	4635	1853
5	2307	3559	29	4364	1294
6	11662	3377	30	267	1351
7	5198	1206	31	4946	1313
8	14885	3793	32	242	704
9	3583	1299	33	3866	561
10	13905	4132	34	4826	709
11	5624	4711	35	52	808
12	6140	4317	36	4279	1209
13	1628	3268	37	820	2692
14	7026	1711	38	122	2510
15	301	1237	39	4028	2249
16	135	1704	40	5916	2917
17	2252	1704	41	2028	3861
18	0	1853	42	706	3021
19	3688	1662	43	4890	3607
20	4214	2256	44	1751	2426
21	4672	1231	45	224	2488

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
22	4857	2000	46	9307	4954
23	5811	1982	47	4891	2973
24	3653	3370	48	3397	2337
49	2456	6371	89	5893	2575
50	3062	6097	90	1168	5551
51	3938	11811	91	6300	3559
52	74	4799	92	4711	3989
53	1283	5419	93	3263	2471
54	998	4583	94	577	2303
55	1786	4927	95	5098	2376
56	2309	4353	96	4826	3068
57	3580	3182	97	173	1396
58	394	3556	98	1725	2987
59	396	5616	99	3839	1954
60	1263	12134	100	623	5549
61	475	4136	101	1791	3198
62	2454	2838	102	2307	2896
63	1708	2263	103	3770	4230
64	383	5128	104	5531	5216
65	3547	2572	105	298	3596
66	1018	3110	106	3816	4095
67	3054	2066	107	419	4768
68	3266	3533	108	224	3272
69	2225	2718	109	5744	911
70	5438	1512	110	4458	742
71	3741	1408	111	204	973
72	226	717	112	5592	2500
73	1095	834	113	4134	1262
74	534	6763	114	7735	2417
75	1397	2412	115	3123	3238
76	4075	3168	116	875	3567
77	1737	3375	117	2963	2502
78	4105	5197	118	1941	4933
79	2300	1578	119	620	6019
80	1940	2242	120	1209	6065
81	293	2126	121	853	7078
82	3888	2168	122	1113	5186
83	3994	4113	123	1855	5883
84	2739	3764	124	1959	2687
85	1788	2684	125	115	3968
86	3844	3622	126	3287	3091
87	6652	2874	127	2928	6187
88	3635	2271	128	1819	2679
129	974	1358	135	2088	3666
130	3259	3193	136	3298	4485
131	1627	2803	137	6049	2347

Закінчення таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
132	4250	1302	138	3072	1499
133	2584	1952	139	4748	1030
134	3866	6749	140	5732	3522
Сума				437215	437215

Для обраного об'єкту експериментальних досліджень за параметр, що характеризуватиме додаткові обмеження, була обрана функція розселення населення [71], яка у комп'ютерній програмі може бути представлена набором кишень, що кількісно відповідатимуть числу розрахованих інтервалів потрапляння відстаней трудових пересувань, рисунок 3.2.

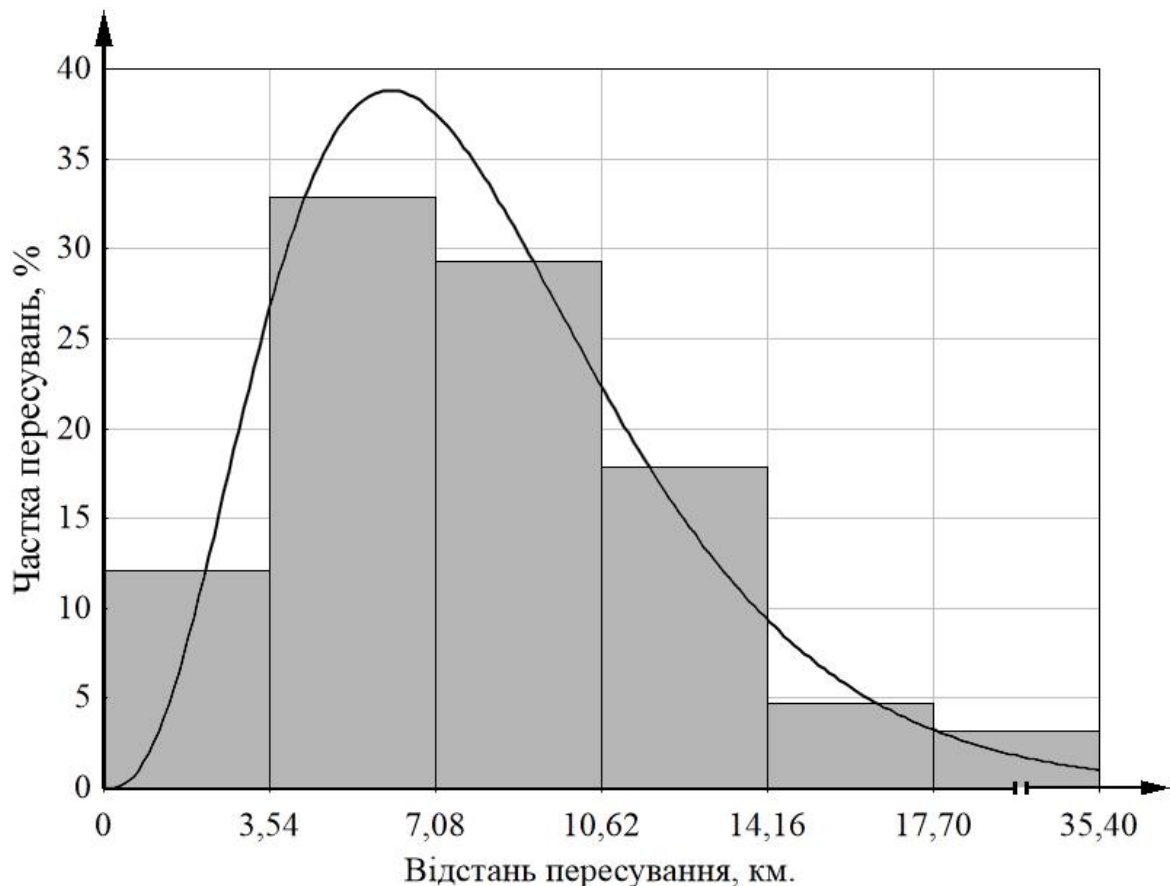


Рисунок 3.2 – Крива розселення населення м. Харкова [71]

Використовуючи сформовану на основі кривої розселення населення МПК, а також матрицю відстаней між ТР, отриману за відповідними результатами розрахунків у програмному продукті PTV VISUM у роботі [71],

було уточнено межі інтервалів групування, а також кількість пересувань по кожному інтервалу. Відповідні результати представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати уточнення даних для формування додаткових обмежень при генерації МК поетапним методом

Інтервал групування	Нижня межа відстані пересування, км	Верхня межа відстані пересування, км	Кількість потраплянь в інтервал, од.	Кількість пересувань, пас.
1	0	3,54	1823	56827
2	3,54	7,08	3017	123401
3	7,08	10,62	3794	113919
4	10,62	14,16	4175	89238
5	14,16	17,7	3364	34426
6	17,70	44,00	3427	19404
Сума			19600	437215

Дані, представлені в останньому стовпчику таблиці 3.2, є сумарними значеннями обмежень по кожній кишені, що використовуватимуться при генерації МК. Слід відзначити, що міжрайонні кореспонденції, які характеризуються нульовими значеннями відстаней пересування, не генеруватимуться, оскільки для них у матриці потенціалів передбачаються нульові значення потенціалів.

Відштовхуючись від встановлених меж інтервалів групування (таблиця 3.2) та на основі матриці відстаней між ТР з використанням інструментів MS Excel сформовано матрицю приналежності, яка має однакову розмірність з МПК, що генеруватиметься. Фрагмент матриці приналежності для обраного об'єкту експериментальних досліджень представлено на рисунку 3.3.

Як зазначалося у підрозділі 3.1, на першому етапі генерації МПК з використанням поетапного методу за максимально допустиме значення

кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК, запропоновано використовувати значення загального обсягу пересувань пасажирів у матриці. Для обраного об'єкту експериментальних досліджень це значення визначатиметься як сума місткостей ТР з відправлення або прибуття пасажирів і дорівнюватиме 437215 пас.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM						
1	1	1	1	1	4	1	1	1	5	2	2	2	1	3	3	3	3	2	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	5	4	4	4	4	4	4					
2	1	1	1	1	4	1	1	1	5	2	2	2	1	2	3	3	3	2	4	4	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	5	4	4	4	4	4				
3	1	1	1	1	5	1	1	1	4	2	2	2	1	2	2	3	3	2	3	3	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	5	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4				
4	1	1	1	1	4	2	1	2	6	3	2	3	1	4	5	5	3	5	5	6	6	6	6	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5			
5	4	4	4	3	1	4	4	5	6	5	5	6	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6				
6	1	1	1	1	5	1	1	1	4	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	3	3	4	3	4			
7	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	2	1	2	2	3	2	3	3	4	4	3	3	3	3	4	4	4	4	5	4	5	5	4	4	5	4	4	3	4	3	4		
8	1	1	1	2	5	1	1	1	4	1	1	2	1	2	2	2	2	3	2	3	2	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	4	3	4	4	3	3	4	3	4	3	4	3		
9	5	5	4	6	6	3	5	3	1	3	4	4	5	3	3	2	4	4	3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	3	3		
10	2	2	2	3	5	1	1	1	3	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	4	3	4	4	3	4	4	3	2	3	3	3		
11	2	2	2	2	5	1	1	1	4	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2	3	3	2	2	3	3	3	4	4	5	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	3	2	3		
12	2	2	2	3	6	1	2	2	4	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	3	2	1	1	3	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	2	2	2		
13	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	2	1	2	2	3	2	3	2	5	4	5	4	3	3	3	3	4	4	5	4	5	4	5	4	4	4	4	4	5	4	4	4		
14	3	3	2	5	6	2	3	2	3	1	2	2	3	1	1	1	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3	3	3		
15	3	3	2	4	6	2	3	2	3	1	2	2	3	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3	2	3		
16	3	3	3	5	6	3	3	3	2	2	2	2	3	1	1	1	2	3	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	4	3	3		
17	3	2	2	3	6	2	2	2	4	1	1	1	3	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2	2		
18	3	3	3	4	6	2	3	2	5	2	2	1	4	2	2	3	1	1	2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	3	4	4	5	4	5	4	5	5	4	4	1	2	2	2		
19	3	3	2	5	6	2	2	2	3	1	2	1	3	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	2	2	3	3	2	2	3	2	3		
20	4	4	4	6	6	3	3	3	2	2	2	2	4	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	1	2	1		
21	4	4	4	3	6	6	3	4	3	2	2	3	2	4	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	3	3	2	2	1	3	3	2	1	2	1	1	
22	4	4	4	4	6	6	3	4	3	2	2	3	3	4	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	1	3	3	2	1	3	3	2	1	2	1	1	
23	4	4	4	4	6	6	3	4	3	3	2	2	4	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	3	3	2	2	4	4	3	3	2	2	1	1
24	3	3	3	4	6	3	3	3	3	2	2	1	4	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1	1	
25	3	3	3	4	6	3	3	3	3	2	2	1	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	3	3	2	3	4	4	2	2	2	1	1	
26	4	4	3	6	6	3	4	3	2	2	3	3	4	2	2	1	1	3	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	3	
27	4	4	3	6	6	3	4	3	1	2	3	3	4	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	3
28	5	4	4	6	6	3	4	3	2	2	3	3	5	2	2	2	3	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	2	2	2
29	5	5	4	6	6	3	5	3	1	2	4	4	5	2	2	2	3	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2	2	
30	5	4	3	6	6	3	4	3	1	2	3	3	5	2	2	3	4	3	2	2	1	1	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	4	3	3	
31	6	5	4	6	6	3	5	3	1	4	4	4	6	3	3	3	3	4	3	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	3	3	
32	5	5	4	6	6	3	5	3	1	3	4	4	6	3	2	2	4	3	3	2	2	1	2	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	4	2	3		
33	6	5	4	6	6	4	5	4	1	4	4	4	6	3	3	3	4	5	3	2	2	2	3	4	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	4	4		
34	6	5	4	6	6	4	5	4	1	4	4	4	6	3	3	3	5	3	3	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	5	4	4	
35	5	5	4	6	6	3	4	3	1	3	4	4	5	2	2	2	4	3	2	2	2	1	2	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	4	2	3		
36	4	4	3	6	6	3	4	3	1	2	3	3	5	2	2	3	3	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	3	2	2	
37	4	4	5	6	6	4	4	4	4	3	3	3	6	4	3	4	2	1	3	3	2	3	2	3	2	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	5	5	4	4	1	1
38	4	4	4	4	6	3	4	3	3	3	2	2	4	3	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	3	4	4	3	2	3	4	3	2	1	1	1
39	4	4	4	5	6	3	4	3	3	3	2	2	4	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2	4	4	4	3	2	4	4	3	2	1	1	1
40	5	4	5	6	6	4	4	4	4	3	3	3	5	4	3	4	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	3	5	5	4	3	1	1	1	1	1	1	1	
41	5	5	5	6	6	4	5	4	4	4	3	3	6	4	3	4	3	2	3	3	2	3	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5	5	4	4	4	5	5	4	4	1	2	1	1
42	6	6	6	6	6	5	6	5	5	5	4	4	6	5	5	5	4	3	4	4	5	3	3	3	5	4	5	5	6	5	5	6	6	6	5	5	6	6	5	5	2	3	3	3	
43	5	5	5	6	6	4	5	4	4	4	3	3	6	4	3	4	3	2	3	3	2	3	2	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5	4	4	5	5	4	4	1	2	1	1	1	
44	5	4	5	6	6	4	4	4	4	4	3	3	5	4	4	4	3	2																											

транспортного попиту.

У таблиці 3.3 представлено фрагмент результатів підбору керуючих параметрів для роботи програми при максимально допустимому значенні кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку, величиною 437215 пас.

Таблиця 3.3 – Фрагмент результатів підбору керуючих параметрів для роботи методу поетапної генерації МПК за максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, яке дорівнює 437215 пас.

Мінімальне значення потенціалу основного та додаткового обмежень	Відхилення залишку нерозподілених кореспонденцій по основному обмеженню, %									
	Порядковий номер генерації матриці									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	5,68	5,19	8,78	8,05	4,62	6,47	7,13	6,04	4,70	5,17
...
10	2,28	1,85	4,24	0,69	2,38	1,94	3,79	2,93	4,2	2,02
...
18	0,32	0,08	0	1,86	0,01	0,31	0	0	0,11	1,01
19	0,29	0,4	0,37	0,09	0,54	0,04	0,12	0,07	0,05	0,04
20	0,01	0,01	0	0,11	0,02	0,01	0,01	0,6	0,44	0,15
21	0,16	0,08	0,28	0,03	0,04	0,04	0,45	0,02	0,25	0,53
22	0,07	0,07	0,03	0,04	0,01	0	0,31	0,1	0,21	0,25
23	0,04	0,07	0,23	0	0,11	0	0	0,18	0,02	0,15

З даних, представлених у таблиці 3.3, видно, що поспіль десятиразова успішна генерації МПК для відповідної величини допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, досягається за величини мінімального значення потенціалу основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, яке дорівнює 23. Подальше зростання керуючих параметрів програми призводитиме до зростання кількості примусових призначень кореспонденцій у матриці.

Для успішних генерацій МПК за значення мінімального значення

потенціалу основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, яке дорівнює 23, додатково проводиться розрахунок відхилення залишку нерозподілених кореспонденцій по додатковим обмеженням. Воно обчислюється як відношення обсягу нерозподілених у матриці кореспонденцій до обсягу пересувань пасажирів по кишені, до якої відносяться ці нерозподілені кореспонденції. Приклад виведення результатів для згенерованої МПК у частині виконання основних і додаткових обмежень за значення максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку на рівні 437215 пас. і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 23, представлено на рисунку 3.4.

Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) представлені у таблиці 3.4.

Відправлення	Побуття	Додатково	Значення
1	140	0	437215
2	140	0	437215
3	140	0	437215
4	140	0	437215
5	140	0	437215
6	140	0	437215
7	140	0	437215
8	140	0	437215
9	140	0	437215
10	140	0	437215
11	140	0	437215
12	140	0	437215
13	140	0	437215
14	140	0	437215
15	140	0	437215
16	140	0	437215
17	140	0	437215
18	140	0	437215
19	140	0	437215
20	140	0	437215
21	140	0	437215
22	140	0	437215
23	140	0	437215
24	140	0	437215
25	140	0	437215
26	140	0	437215
27	140	0	437215
28	140	0	437215
29	140	0	437215
30	140	0	437215
31	140	0	437215
32	140	0	437215
33	140	0	437215
34	140	0	437215
35	140	0	437215
36	140	0	437215
37	140	0	437215
38	140	0	437215
39	140	0	437215
40	140	0	437215
41	140	0	437215
42	140	0	437215
43	140	0	437215
44	140	0	437215
45	140	0	437215
46	140	0	437215
47	140	0	437215
48	140	0	437215
49	140	0	437215
50	140	0	437215

Рисунок 3.4 – Приклад розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені)

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (437215 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 23

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	176	1	56827	0,31
2	321	2	123401	0,26
3	984	2	123401	0,79
4	0	-	-	0,00
5	472	2	123401	0,38
6	0	-	-	0,00
7	1	1	56827	0,00
8	762	2	123401	0,62
9	103	1	56827	0,18
10	547	1	56827	0,96

З даних, представлених у таблиці 3.4, видно, що всі десять посліпль згенерованих МК відповідають вимогам, описаним у підрозділі 3.1 даної дисертаційної роботи, оскільки відсоток нерозподілених кореспонденцій у межах додаткових обмежень для всіх отриманих матриць не перевищує 1 %.

Наступним кроком дослідження є підбір керуючих параметрів роботи програми поетапної генерації МПК для інших значень максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці. Відповідні результати наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати підбору керуючих параметрів для роботи програми поетапної генерації МПК за різних значень максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці

Мінімальне значення потенціалу основного та додаткового обмежень	Відхилення залишку нерозподілених кореспонденцій по основному обмеженню, %									
	Порядковий номер генерації матриці									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 218608 пас.										
22	0,19	0,04	0,36	0	0	0,07	0,14	1,52	0,21	0,09
23	0,14	0,02	0,06	0	0	0	0,08	0,03	0,13	0
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 109304 пас.										
23	0,02	0,03	0,01	0,26	0,33	0,21	0,03	0,04	0,11	0,12
24	0,08	0	0,19	0,25	0,04	0,1	0,03	0,19	0	0,04
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 54652 пас.										
23	0,14	0	0,43	0,01	0,11	0	0,13	0,57	0,27	0,02
24	0,01	0,05	0,02	0	0	0,15	0,13	0,06	0,09	0,16
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 27326 пас.										
24	0,08	0,01	0,4	0,05	0,1	0,02	0,09	0,17	0,04	0,03
25	0,07	0,05	0,12	0,03	0,05	0	0,14	0,05	0	0,03
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 13663 пас.										
24	0,51	0,17	0,07	0,17	0,16	0,31	0	0	0	0,01
25	0,01	0,09	0,18	0,07	0,06	0,02	0,001	0,25	0,01	0
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 6832 пас.										
25	0,05	0	0,31	0,14	0,44	0,05	0,05	0,19	0,02	0,13
26	0	0,15	0,13	0,09	0,13	0,02	0,08	0,09	0	0
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 3416 пас.										
25	0,34	0,1	0,01	0,1	0	0,49	0,2	0,18	0,2	0,08
26	0	0	0,12	0,15	0,15	0,09	0,12	0,01	0,06	0,03

Закінчення таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 1708 пас.										
26	0,28	0,05	0,08	0,02	0,02	0,09	0,03	0,07	0,11	0
27	0,05	0	0,01	0,03	0,03	0,06	0	0,07	0,23	0,06
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 854 пас.										
25	0,12	0,01	0	0	0,06	0,48	0,31	1,33	0,08	0,03
26	0,05	0,09	0,1	0	0	0,02	0,07	0,01	0,08	0
27	0	0,2	0	0,14	0,8	0,24	0,02	0	0	0,18
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 427 пас.										
25	0	0,44	0,1	0,3	0,22	0,08	0,07	0,42	0,11	0,28
26	0,07	0	0,03	0	0,1	0	0,001	0,02	0,04	0,1
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 214 пас.										
25	0	0,54	0,09	0,05	0,01	0,01	0,04	0	0,02	0,02
26	0	0,07	0,01	0,02	0	0,08	0,04	0,2	0,12	0
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 107 пас.										
25	0,07	0	0,13	0	0,2	0,01	0	0,04	0,16	0,02
26	0,25	0	0,04	0,07	0,01	0,02	0	0	0,09	0
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці 54 пас.										
24	0,05	0	0	0,41	0,35	0	0,03	0,04	0	0,16
25	0	0	0,14	0,13	0,01	0,05	0,08	0,12	0	0,03
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 27 пас.										
23	0,05	0	0	0,07	0,28	0,03	0	0	0,16	0,07
24	0	0	0,03	0,1	0,01	0,02	0,03	0,13	0	0,14
25	0,14	0,16	0,18	0,16	0,13	0,01	0	0,12	0,04	0,05
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 14 пас.										
22	0,08	0,32	0	0,13	0,26	0,55	0,21	0,13	0	0,01
23	0,11	0,06	0,03	0,01	0,03	0	0,06	0,13	0,13	0,1
24	0	0,05	0,12	0	0,04	0,17	0,02	0,1	0,06	0,16
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці 7, пас.										
22	0,32	0,06	0,13	0,15	0	0,11	0,04	0	0,16	0,28
23	0,14	0,12	0,14	0,06	0,08	0,13	0	0,06	0,02	0,05

Слід відзначити, що підбір значень потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, для кожного наступного допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, проводилось відштовхуючись від значень потенціалів, які були зафіксовані для попереднього допустимого значення кореспонденції при генерації МПК за умов поспіль десятиразової успішної генерації МК. У випадку, якщо за цих значень потенціалів одразу виходило отримати десять поспіль успішних генерацій матриць, значення цих потенціалів зменшувалося на одиницю і знову проводилась генерація МК. У протилежному випадку значення потенціалів збільшувалося на одиницю. Таким чином було встановлено мінімальні значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, для значень максимально допустимої величини кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, пас.: 218608, 109304, 54652, 27326, 13663, 6832, 3416, 1708, 854, 427, 214, 107, 54, 27, 14, 7 (таблиця 3.5).

На наступному етапі для всіх успішних генерацій МПК за підібраних значень мінімального потенціалу основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, додатково був проведений розрахунок відхилення залишку нерозподілених кореспонденцій по додатковим обмеженням. Результати перевірки вимоги, що накладається на виконання додаткових обмежень, в усіх згенерованих МПК (для всіх значень максимально допустимої величини кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці) представлені у додатку Б. Дані, представлені у таблицях Б.1-Б.16, свідчать про можливість використання усіх згенерованих МПК, отриманих при застосуванні методу поетапного формування матриць для різних значень максимально допустимої величини кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці.

Отримані у результаті генерації поетапним методом 170 варіантів МПК є основою для перевірки відповідності ЗР величини кореспонденцій із відповідними закономірностями у значеннях кореспонденцій з матриць,

сформованих з використанням базового методу генерації МПК. Тут слід відзначити, що потребуватиме додаткового рішення питання щодо визначення достатнього обсягу вибірки кореспонденцій для встановлення виду ЗР цієї ВВ при реалізації обох методів генерації МПК – випадкового і поетапного алгоритмів моделювання.

3.3 Практична реалізація базового методу генерації матриці пасажирських кореспонденцій

Метою даного підрозділу дисертаційної роботи є моделювання МК з використанням базового методу генерації МПК, що передбачає формування власне випадкових матриць за умов накладання лише базового обмеження – обсяги відправлення і прибуття пасажирів з і у ТР. Для досягнення мети можна використовувати розроблену програму для формування МК поетапним методом, реалізація якої за умов застосування відповідних налаштувань дозволить отримати МПК при накладанні лише базових обмежень і різних значеннях вхідних параметрів моделювання кореспонденцій.

Для отримання таких МК у програмі необхідно змінити формат представлення обмежень, а також використовувати відповідні параметри налаштувань програми. Причому мінімальне значення потенціалу основного і додаткового обмеження, після якого воно починає виконуватися, у даному випадку не відіграють ролі, тому можна використовувати значення 1. Також варто зазначити, що матриця потенціалів також залишається незмінною.

Основна відмінність представлення базового обмеження полягатиме у формуванні нової матриці приналежності кореспонденцій, оскільки за необхідності формування МК за базовим методом всі кореспонденції повинні бути прив'язані до однієї кишені (рисунок 3.5), що дозволить отримати позитивний результат генерації випадкових матриць. До цього слід також додати необхідність переведення перемикача примусового виконання

обмежень у положення 0. Приклад налаштування програми для генерації МК за базовим методом представлено на рисунку 3.6.

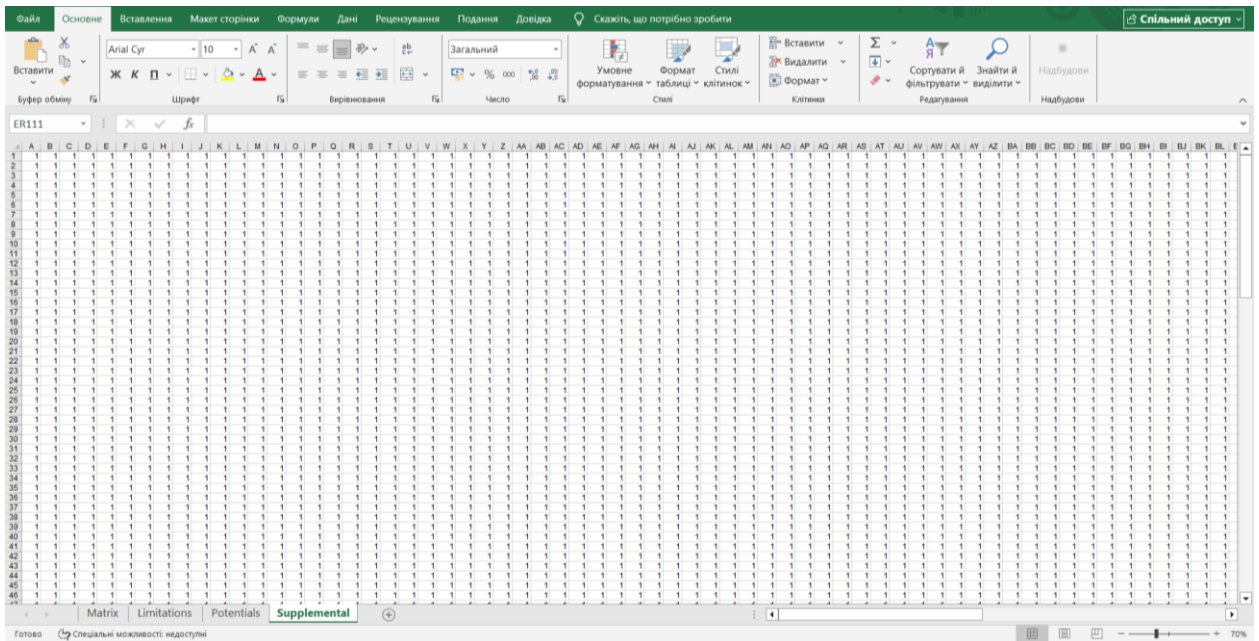


Рисунок 3.5 – Фрагмент матриці приналежності кореспонденцій за умов генерації МК за базовим методом

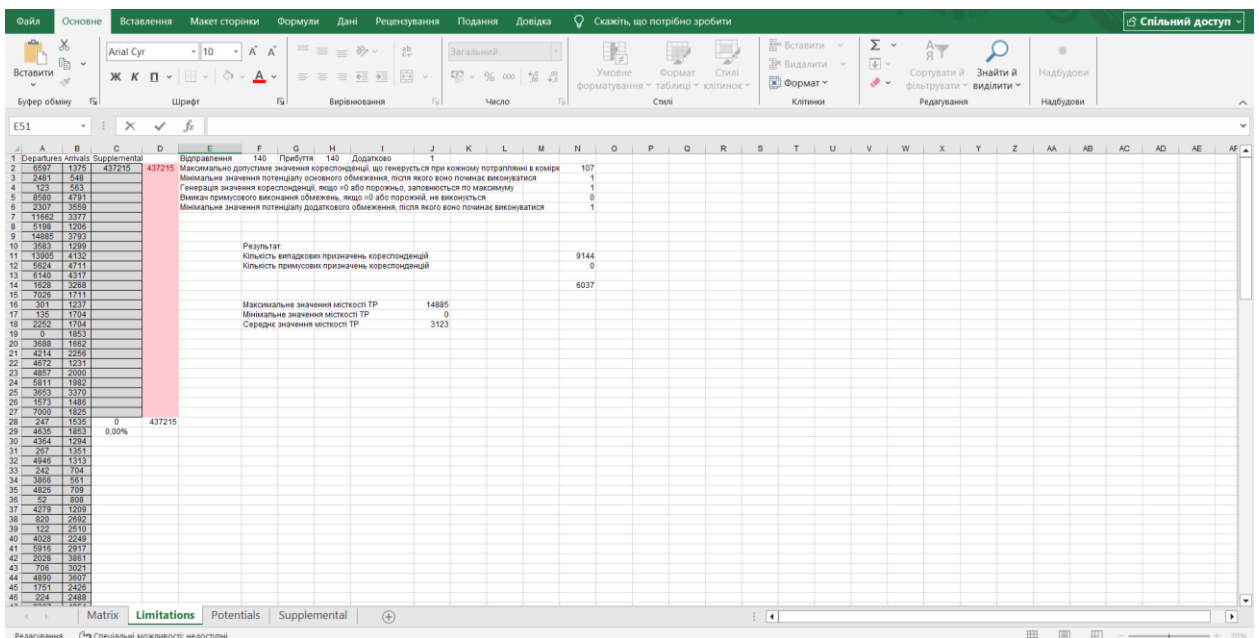


Рисунок 3.6 – Приклад представлення налаштувань програми для генерації випадкових МК за базовим методом

Для генерації МК за базовим методом були використані дані про місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів, що представлені у таблиці 3.1. Розроблена програма дозволяє генерувати МК зі стовідсотковою гарантією отримання позитивного результату. Враховуючи цей факт, достатнім буде одноразове моделювання МК за базовим методом у розробленій програмі генерації МПК за умов зміни одного керуючого параметру – максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку. Таким чином було отримано 17 МК для тих самих значень цього керуючого параметру, як і у випадку застосування поетапного методу генерації МПК: 437215, 218608, 109304, 54652, 27326, 13663, 6832, 3416, 1708, 854, 427, 214, 107, 54, 27, 14, 7. Характеристики згенерованих МК представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Характеристики МК, отриманих із застосуванням випадкового (базового) методу генерації МПК

Варіант МК	Значення керуючого параметру, пас.	Максимальне значення кореспонденції у згенерованій матриці, пас.	Середнє значення кореспонденції, пас.	Середньо-квадратичне відхилення, пас.	Кількість кореспонденцій (заповнених комірок), од.
1	437215	7758	242,4	552,4	1804
2	218608	6967	249,8	563,2	1750
3	109304	6428	233,7	532,4	1871
4	54652	4574	245,1	530,7	1784
5	27326	4632	238,4	532,1	1834
6	13663	5234	242,2	509,3	1805
7	6832	3400	241,8	506,1	1808
8	3416	3429	246,3	494,8	1775
9	1708	3342	227,1	407,1	1925
10	854	3290	199,2	276,4	2195
11	427	2930	154,3	185,4	2834
12	214	3287	110,0	128,4	3975
13	107	3163	73,1	93,4	5981
14	54	2915	49,8	74,2	8778
15	27	3644	36,8	67,2	11883
16	14	3403	30,3	58,5	14444
17	7	3030	26,7	53,7	16365

Примітка. Мінімальне значення кореспонденцій для всіх випадків складає 1 пас.

Згенеровані МК є основною вхідною інформацією для визначення виду ЗР значень кореспонденцій. Тут на першому етапі необхідно представити отримані МК у вигляді масиву даних, які можна використовувати для статистичної обробки. Перетворення із матричного вигляду в звичайний лінійний масив значень кореспонденцій (їх запис у стовпчик) можна зробити за рахунок використання вбудованих у MS Excel функцій INDEX і ROW. Приклад формули для трансформації представлення всіх кореспонденцій у матриці в стовпчик наступний – $=INDEX('7!$A$1:'7!$EJ$140; INT((ROW(A1)-1)/140)+1; MOD((ROW(A1)-1);140)+1)$. Таким чином було отримано масиви даних з кореспонденціями з усіх згенерованих із застосуванням базового методу генерації МК, інформація про розміри цих масивів – обсяг генеральної сукупності подано в останньому стовпчику таблиці 3.6.

Наступним кроком на цьому етапі дослідження стало визначення ЗР елементів МПК, отриманих з використанням базового методу генерації. Спроби швидкого підбору виду ЗР кореспонденцій за отриманими варіаційними рядами даних з використанням спеціалізованого програмного забезпечення STATISTICA 10 [122] не призвели до успіху у жодному з випадків, рисунок 3.7.

З даних, представлених на рисунку 3.7, видно, що навіть за рахунок проведення цілеспрямованого підбору параметрів у програмі STATISTICA 10 не вдалося досягти бажаного результату, про що свідчать результати розрахунку критеріїв згоди Пірсона χ^2 та Колмогорова-Смирнова, хоча візуально теоретична крива показникового ЗР узгоджується з емпіричними даними. Основною причиною такого результату цілком можна вважати розміри отриманих варіаційних рядів у МПК, згенерованих за базовим методом формування моделей транспортного попиту, – обидва застосовані критерії згоди є чутливими до обсягу вибірки [123].

Як видно із даних таблиці 3.6, розміри генеральних сукупностей для отриманих МК коливаються у межах (1750-16365) значень (без урахування

нульових), що є дуже великими для рішення задачі визначення виду ЗР величин, які характеризують транспортний попит [124, 125], через обмеженість використання різних статистичних оцінок щодо встановлення відповідності емпіричного розподілу вибірки теоретично очікуваному ЗР.

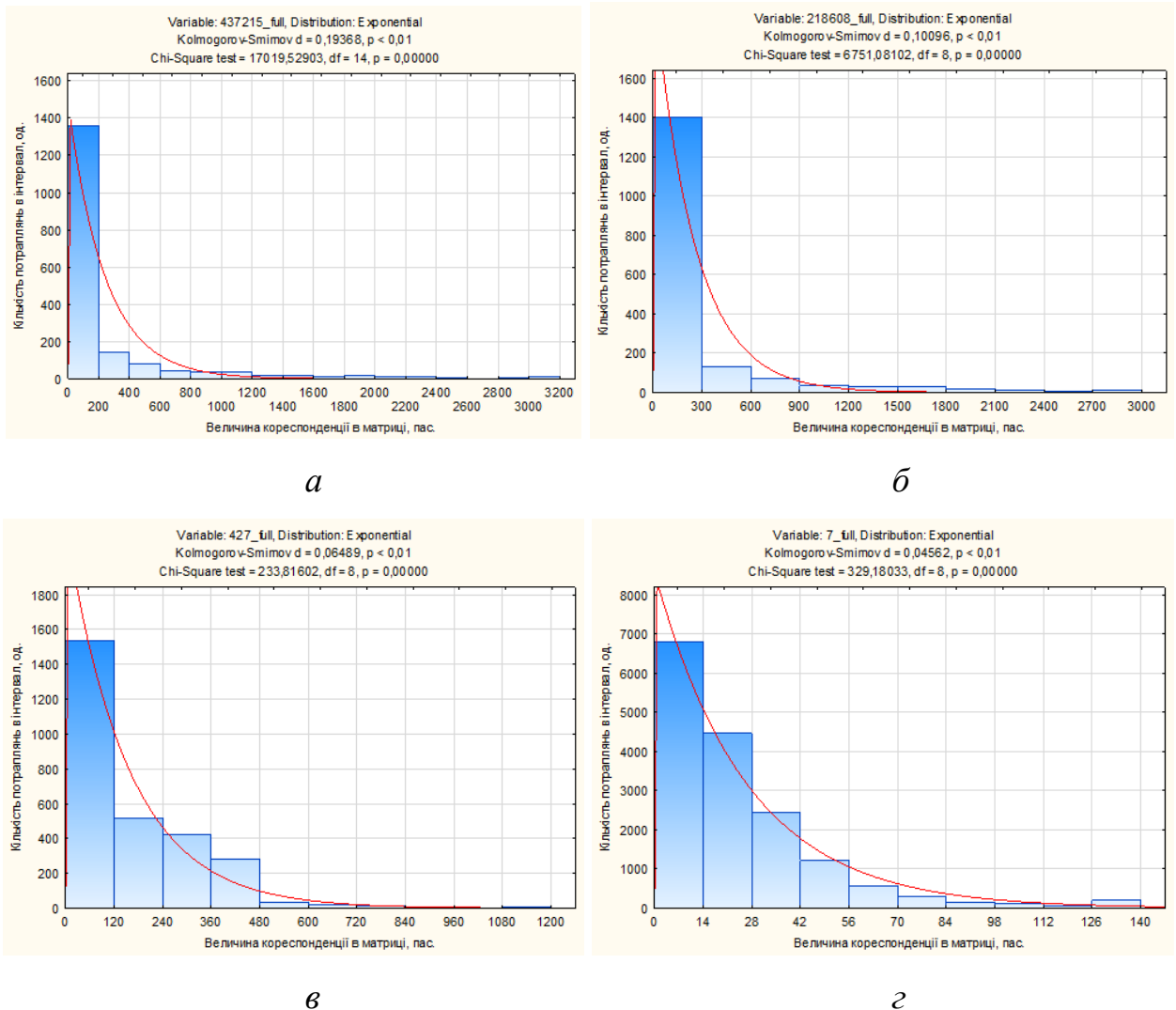


Рисунок 3.7 – Приклади підбору очікуваного ЗР величини кореспонденцій у МПК, згенерованих з використанням базового методу за різних значень керуючого параметру:

a – 437215 пас., *б* – 218608 пас. *в* – 427 пас., *г* – 7 пас.

Наприклад, при використанні критерію Колмогорова-Смирнова великими вважаються вибірки більше 40 од. [123]. За умов використання критерію згоди Пірсона χ^2 існують різні думки науковців. Так, автори [126,

127] називають вибірку розміром 50 од. незначною (малою), хоча є інші погляди на це у більш сучасних публікаціях [125], де зазначається, що такий обсяг вибірки є цілком достатнім для транспортних розрахунків. Більшість думок авторів [125, 127-133] зводиться до того, що для транспортних розрахунків достатнім обсягом вибірки є сукупності розміром близько 100 од. Хоч існує інше бачення даного значення при визначенні розміру вибірки для проведення натурних спостережень при зборі інформації для формування моделей транспортного попиту [134-137], але воно нерелевантне при пошуку ЗР кореспонденцій.

Отже, враховуючи вищенаведену інформацію, наступним етапом на шляху визначення виду ЗР величини кореспонденцій у матрицях, сформованих із використанням базового методу генерації МК, є формування вибірок розміром 100 од. для кожної отриманої МПК. Для формування вибірок використані стандартні функції MS Excel, за рахунок чого забезпечується випадковість (кожен елемент матриці отримує рівний шанс бути включеним до вибірки), репрезентативність (забезпечує наближення характеристик вибірки до характеристик генеральної сукупності), уникнення упередження дослідника (відсутній вплив на відбір елементів вибірки вручну) і відтворюваність процедури (можливість повторення іншою людиною). У результаті отримано 17 вибірок розміром по 100 од. кожна. Приклад сформованої вибірки для МК за умов використання максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК, величиною 7 пас. представлений у таблиці 3.8. Для всіх інших випадків аналогічні масиви наведені у таблиці В.1 додатку В.

Перевірка відповідності отриманих вибірок (дані таблиць 3.7 і В.1) величин кореспонденцій у МК, сформованих з використанням базового методу генерації МПК, теоретичному показниковому ЗР проведена із застосуванням програми STATISTICA 10 за критеріями χ^2 Пірсона і Колмогорова-Смирнова. На рисунку 3.8 наведено результати підбору параметру ЗР, придатного для опису вибірки з МК, отриманої за умов

використання максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МПК, розміром 7 пас.

Таблиця 3.7 – Сформована вибірка для визначення виду ЗР величини кореспонденції за умов використання максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК, розміром 7 пас.

Значення кореспонденції, пас.	Значення кореспонденції, пас.	Значення кореспонденції, пас.	Значення кореспонденції, пас.	Значення кореспонденції, пас.
8	24	1	12	14
11	4	20	25	25
39	6	8	5	4
7	2	10	9	17
12	7	4	2	28
8	18	5	16	6
25	24	31	22	7
12	11	6	45	29
22	10	4	5	7
10	6	19	17	6
22	7	5	6	12
10	6	6	24	2
17	29	5	17	1
7	3	21	5	11
30	5	4	25	7
2	12	15	19	13
9	6	12	18	4
17	7	11	2	12
5	2	11	4	15
15	4	4	7	12

Значення критеріїв χ^2 Пірсона і Колмогорова-Смирнова свідчать про те, що гіпотеза, висунута у підрозділі 2.4 даної дисертаційної роботи, про відповідність емпіричного розподілу кореспонденцій в МПК, сформованих за базовим методом генерації, показниковому ЗР не спростовується.

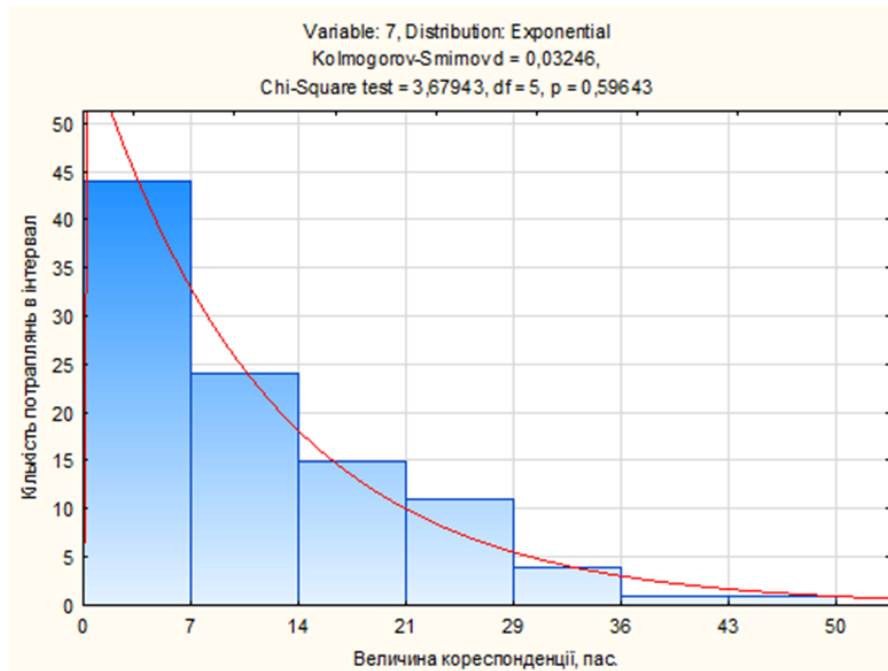


Рисунок 3.8 – Результати підбору показникового ЗР для опису розподілу кореспонденції у МК, що сформована з використанням базового методу генерації МПК

Аналогічно відбувається перевірка відповідності інших сформованих вибірок значень кореспонденцій, отриманих із застосуванням базового методу генерації МПК, теоретичному показниковому ЗР за інших значень керуючого параметру, результати представлені на рисунку Г.1 додатку Г.

Отримані результати статистичної обробки даних будуть використані у наступному розділі дисертаційної роботи для перевірки виду ЗР кореспонденцій у МК, сформованих із застосуванням базового і поетапного методів генерації МПК.

3.4 Висновки по розділу

1. Розроблений алгоритм генерації випадкових МК експериментально перевірено на даних, отриманих у рамках дослідження попиту на пересування пасажирів у місті Харкові в 2016 році – використано інформацію про місткості

ТР з відправлення і прибуття пасажирів, а також встановлену функцію розселення населення міста. Обраний для проведення експериментальних досліджень об'єкт характеризується повнотою опису можливих обмежень, що можуть бути використані при генерації МК за запропонованим методом, а також значною розмірністю – 140 ТР.

2. Для коректної роботи програми генерації МК експериментально визначені відповідні значення керуючих параметрів (налаштування). Моделювання МК за поетапним і базовим методами проводилося для значень максимально допустимих величин кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, які змінювалися у діапазоні (437215–7) пас. з кроком зменшення 50 %. Ліва межа обраного діапазону відповідає загальній кількості пересувань пасажирів у генерованих МК.

3. Ключовими керуючими налаштуваннями при генерації МК за поетапним методом є максимально допустиме значення кореспонденції, що потрапляє у комірку МК, мінімальний потенціал основного і додаткового обмежень. Від налаштувань цих параметрів залежить баланс між успішністю генерації, ступенем випадковості та точністю згенерованої моделі транспортного попиту. Значення мінімального потенціалу основного і додаткового обмежень встановлюється окремо для кожної величини максимально допустимого значення кореспонденції, що потрапляє у комірку матриці при генерації, шляхом отримання поспіль десяти успішних генерацій МПК. Такий підхід передбачає ітераційне налаштування параметрів – після серії успішних генерацій максимально допустиме значення кореспонденції змінюється, що дозволяє поступово підвищувати точність та ефективність процесу моделювання.

4. За успішну генерацію МК за поетапним методом прийнято створення моделі транспортного попиту, що повністю задовольняє всі обмеження або має мінімальний залишок нерозподілених кореспонденцій (до 0,25 % від загального обсягу пересувань і не перевищує 1 % у межах однієї кишені – додаткового обмеження). Накладання таких вимог дозволяє врахувати

реалістичні ситуації, коли повне виконання обмежень неможливе, не втрачаючи при цьому випадковість і коректність отриманої МПК.

5. Практична реалізація базового методу генерації МК з використанням розробленої комп'ютерної програми дозволила отримати 17 станів МК для різних значень максимально допустимого значення кореспонденції, що потрапляє у комірку на кожному черговому кроці генерації МК. Для кожного з отриманих варіантів МК сформовано вибірки розміром 100 од. кожна для перевірки відповідності розподілу кореспонденцій у них теоретичному показниковому ЗР. Розрахункові значення критеріїв χ^2 Пірсона і Колмогорова-Смирнова для кожної вибірки, що характеризує відповідну МК, показали, що гіпотеза, висунута у другому розділі дисертаційної роботи – про відповідність емпіричного розподілу кореспонденцій в МПК, сформованих за базовим методом генерації, показниковому ЗР – не спростовується.

Основні результати досліджень, проведених в рамках цього розділу, опубліковані в роботах [2, 4, 9, 11].

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЕТАПНОГО МЕТОДУ ГЕНЕРАЦІЇ МАТРИЦЬ ПАСАЖИРСЬКИХ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ ТА РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ

Оцінка результатів моделювання МПК за розробленим методом гарантованої (поетапної) генерації МК базується на перевірці можливості опису закономірностей у значеннях отриманих кореспонденцій і кореспонденцій у МК, змодельованих за рахунок застосування власне випадкового (базового) методу розрахунку МПК, за допомогою ЗР одного і того ж виду. Тобто необхідно перевірити гіпотезу, що представлена у підрозділі 2.4 даної дисертаційної роботи, щодо забезпечення збереження показникового розподілу кореспонденцій отриманих поетапним методом генерації МПК, який властивий максимальному рівню випадковості в процесі формування моделей транспортного попиту, і що додатково свідчить на користь його практичної реалізації в рамках ІК моделювання транспортних потреб пасажирів у пересуванні ГТ.

4.1 Визначення параметрів розподілу кореспонденції, отриманих методом гарантованої випадкової генерації матриць пасажирських кореспонденцій

Метою даного підрозділу дисертаційної роботи є визначення ЗР елементів МПК, що сформовані з використанням розробленого методу поетапної генерації МК. Для визначення ЗР кореспонденцій у МПК, отриманих методом поетапної гарантованої генерації, використовуються результати роботи цього методу, представлені у підрозділі 3.2. У ході реалізації розробленого методу було отримано 170 варіантів МК (по десять для

кожного максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці), які відповідають представленим у підрозділі 3.1 вимогам щодо точності моделювання цих матриць. Кожна з отриманих МК має різну і достатньо велику кількість елементів для підбору ЗР, таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Кількість елементів у МК, сформованих з використанням методу гарантованої випадкової генерації МПК, од.

Варіант МПК									
№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 437215 пас.									
504	516	490	570	536	570	554	492	509	477
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 218608 пас.									
458	537	493	516	498	497	489	506	528	526
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 109304 пас.									
502	540	488	578	513	509	468	473	519	560
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 54652 пас.									
528	566	452	463	494	497	590	493	508	524
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 27326 пас.									
470	548	483	470	548	575	523	454	517	580
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 13663 пас.									
536	543	620	572	519	487	480	441	519	492
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 6832 пас.									
462	458	534	489	457	534	522	545	474	472
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 3416 пас.									
541	537	540	497	487	470	447	497	541	500
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 1708 пас.									
503	552	573	537	558	508	559	500	515	570
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 854 пас.									
620	759	707	679	814	660	776	852	671	799
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 427 пас.									
1129	952	1042	1171	1106	987	1068	1172	980	1037

Закінчення таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 214 пас.									
1768	1647	1775	1458	1852	1391	1644	1671	1508	1573
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 107 пас.									
2791	2837	3145	2730	2619	2907	2730	2816	2790	2830
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 54 пас.									
4680	4814	5137	4804	4816	4776	4576	4819	4662	4684
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 27 пас.									
8203	8417	8117	8276	8425	8239	8294	8271	8202	8207
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 14 пас.									
12176	12256	12286	12178	12330	12094	12058	12168	12218	12219
Максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці, 7 пас.									
15562	15580	15543	15535	15585	15598	15629	15599	15524	15528

Як видно із даних, представлених у таблиці 4.1, розміри отриманих у результаті роботи розробленого алгоритму генерації МПК варіаційних рядів суттєво відрізняються в залежності від значення керуючого параметру (максимальне допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку матриці), який використовується для моделювання МК. Також слід відзначити, що на кількість елементів у генерованих МПК впливають обрані величини мінімальних значень потенціалу основного і додаткового обмеження, після якого вони починають виконуватися, але цей вплив не є визначним у цьому випадку.

Отже, отримані з використанням поетапного методу генерації МПК, є основною вхідною інформацією для визначення ЗР елементів цих матриць. Результати статистичної обробки згенерованих варіаційних рядів із застосуванням програми STATISTICA 10 є аналогічними з результатами визначення ЗР кореспонденцій у матрицях, згенерованих за базовим методом на першому кроці вирішення подібного завдання. Відповідні приклади наведені на рисунку 4.1.

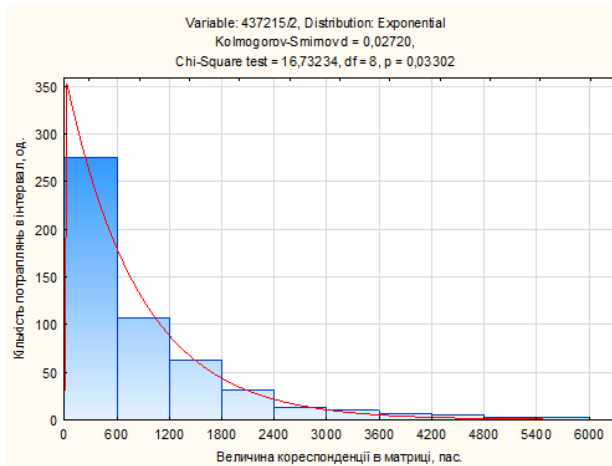
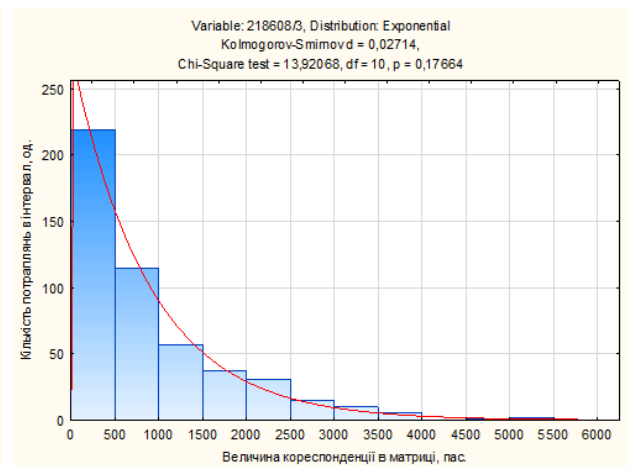
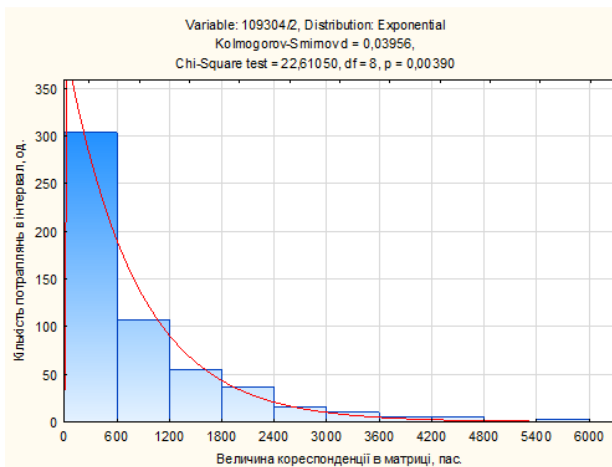
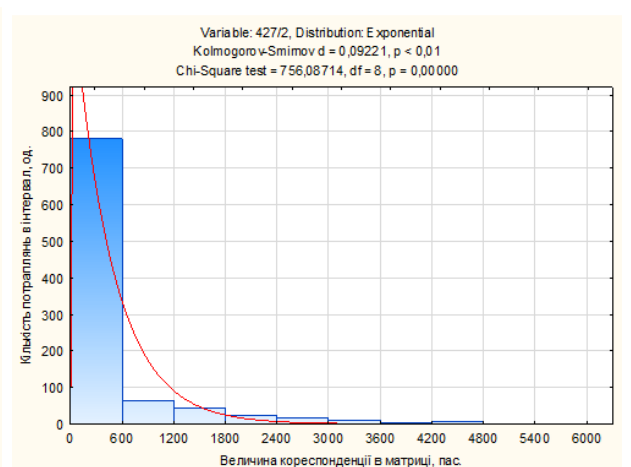
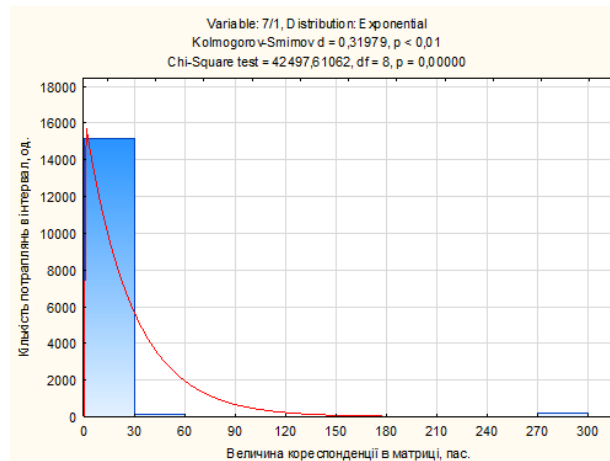
*a**б**в**г**д*

Рисунок 4.1 – Приклади підбору очікуваного ЗР величини кореспонденцій у МПК, згенерованих з використанням поетапного методу за різних значень керуючого параметру: *a* – 437215 пас., *б* – 218608 пас., *в* – 109304 пас., *г* – 427 пас., *д* – 7 пас.

Тут слід відзначити, що у випадку обробки варіаційних рядів даних, отриманих за результатами роботи поетапного методу генерації МПК, у деяких прикладах (рисунок 4.1, б) вдалося отримати позитивний результат (відповідність теоретичної кривої показникового ЗР емпіричним даним) навіть для вихідного розміру варіаційного ряду. Отриманню на цьому етапі подібного позитивного результату сприяє значно менший розмір варіаційного ряду для МПК, де величина керуючого параметру є значною (діапазон від 437215 пас. до 1708 пас.) і середня кількість кореспонденцій у МК складає 514 од., що є у близько 3,5 рази меншою за середній обсяг кореспонденцій у МК, згенерованих власне базовим випадковим методом.

Наступним кроком для досягнення поставленої у даному підрозділі дисертаційного дослідження мети було проведено перевірку відповідності розподілу кореспонденцій у вибіркових сукупностях, сформованих з вихідних варіаційних рядів. Як і у випадку перевірки результатів моделювання МПК за базовим методом, було використано стандартні можливості MS Excel для формування випадкових вибірок розміром 100 од. для всіх згенерованих поетапним методом МК. Сформовані таким чином вибірки представлені у додатку Д.

Перевірка відповідності отриманих вибірок (таблиця Д.1) з елементів МК, сформованих з використанням поетапного методу генерації МПК, теоретичному показниковому ЗР була проведена із застосуванням програми STATISTICA 10 за критеріями згоди χ^2 Пірсона і Колмогорова-Смирнова (рисунок 4.2). Значення цих критеріїв для представлених вибірок свідчать про те, що розроблений метод гарантованої генерації МПК забезпечує збереження показникового ЗР кореспонденцій у МК, який, у свою чергу, властивий максимальному рівню випадковості в процесі генерації випадкових моделей транспортного попиту.

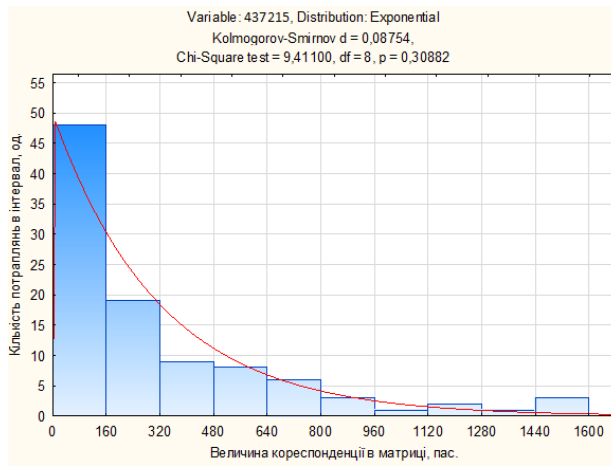
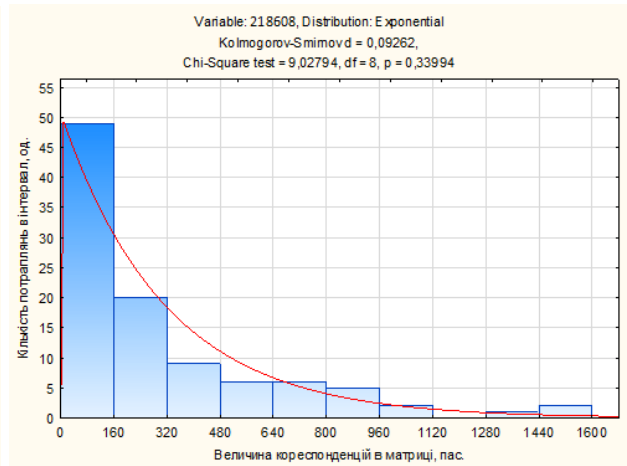
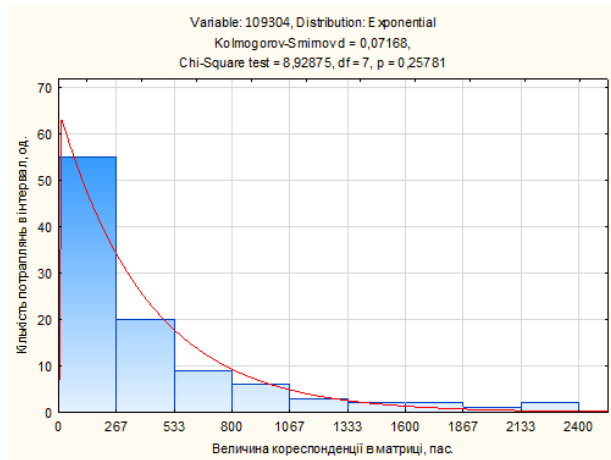
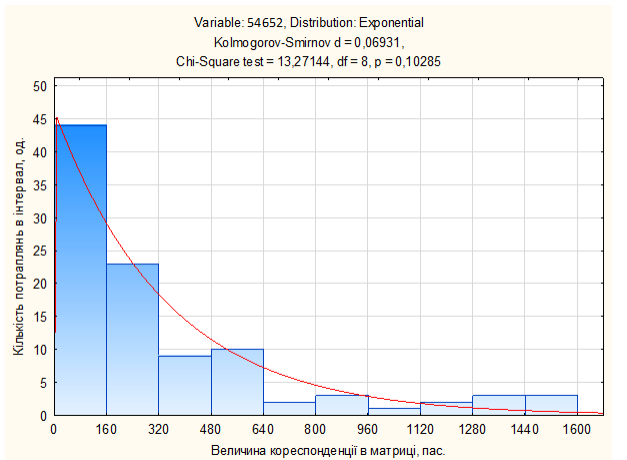
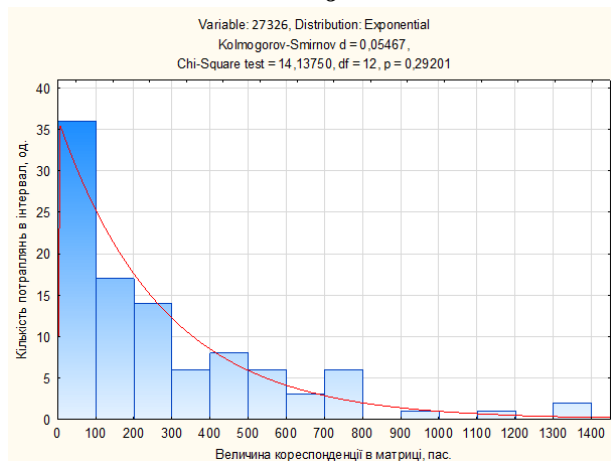
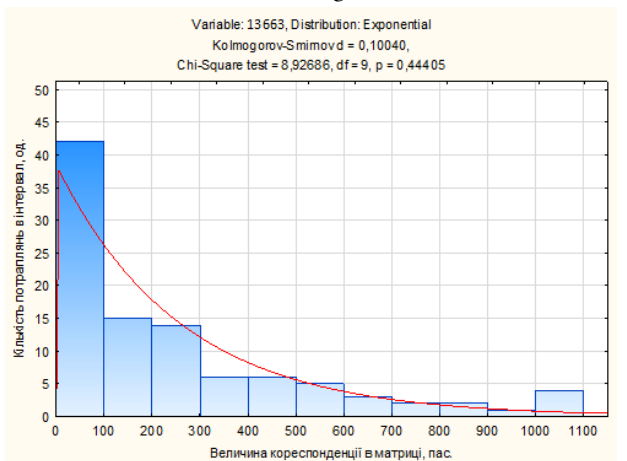
*a**б**в**г**д**е*

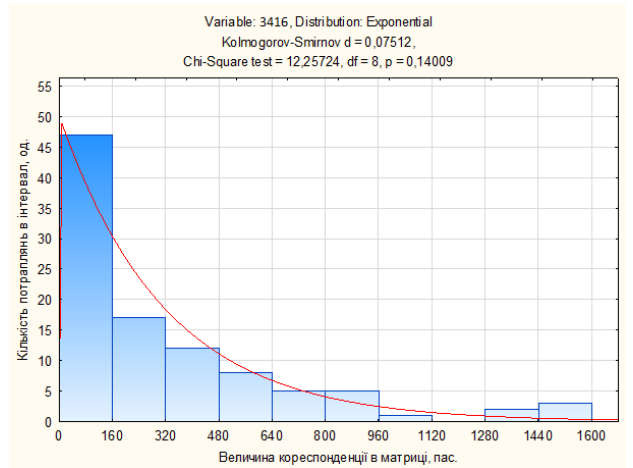
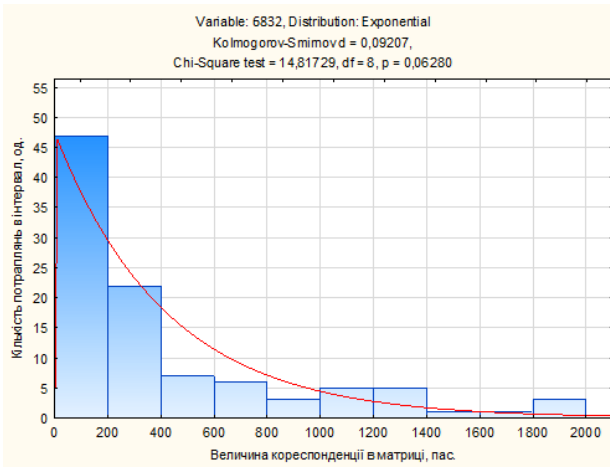
Рисунок 4.2 – Результати підбору показникового ЗР для опису величини кореспонденції у МК, що сформовані з використанням поетапного методу генерації МПК за різних значень керуючого параметру:

a – 437215 пас., *б* – 218608 пас., *в* – 109304 пас., *г* – 54652 пас.,

д – 27326 пас., *е* – 13663 пас., *є* – 6832 пас., *ж* – 3416 пас.,

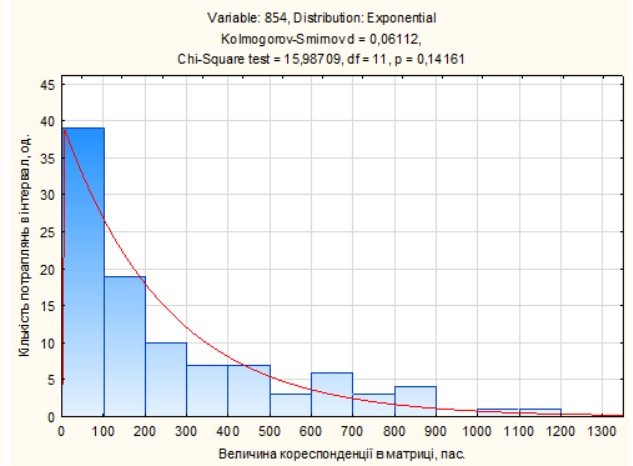
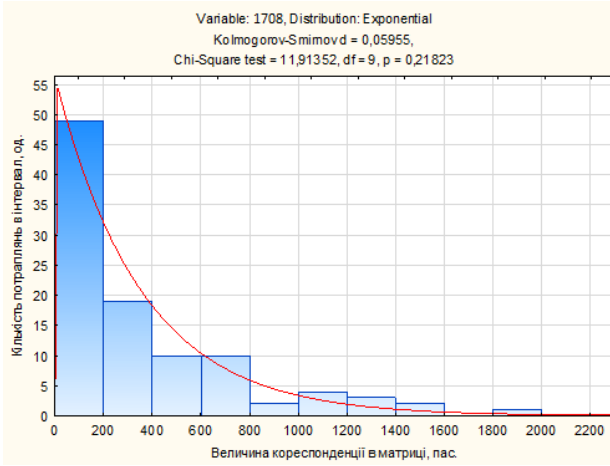
з – 1708 пас., *и* – 854 пас., *і* – 427 пас., *к* – 214 пас., *л* – 107 пас.,

м – 54 пас., *н* – 27 пас., *п* – 14 пас., *р* – 7 пас.



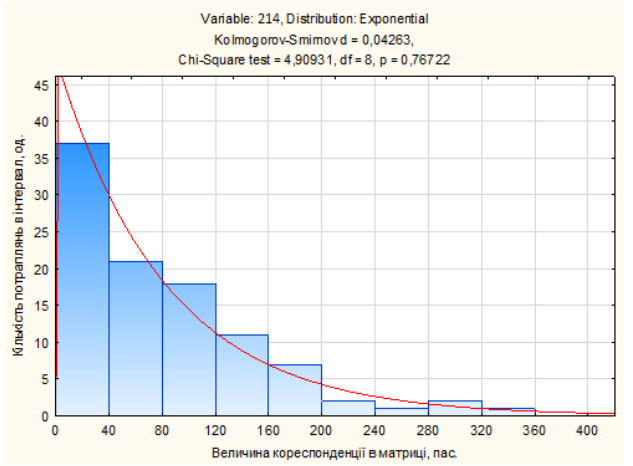
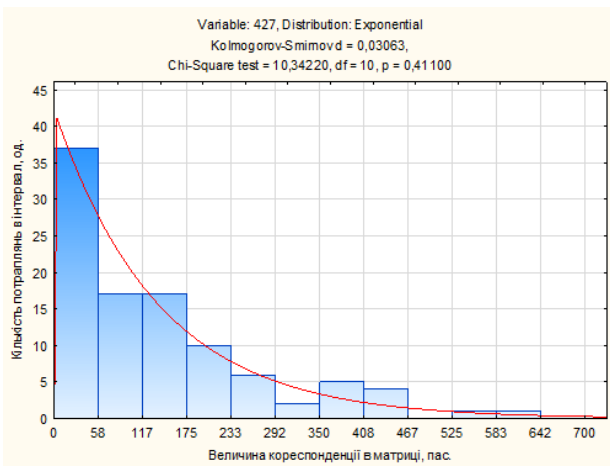
Є

Ж



З

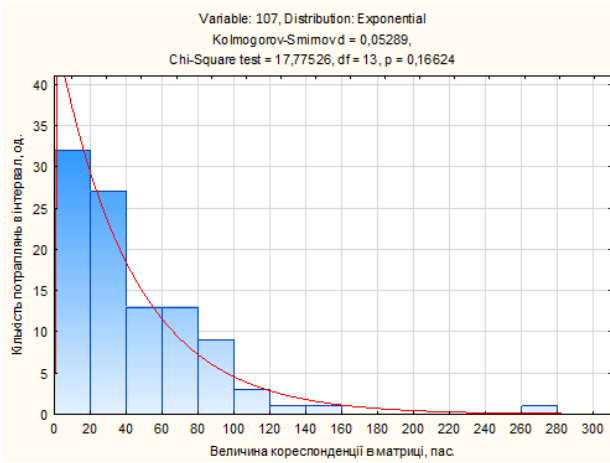
И



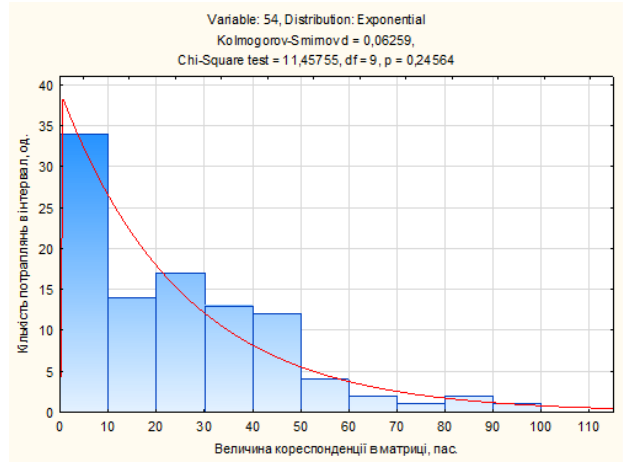
і

к

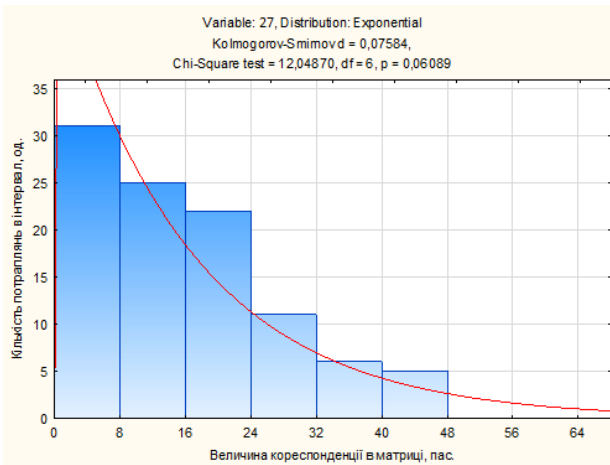
Рисунок 4.2, аркуш 2



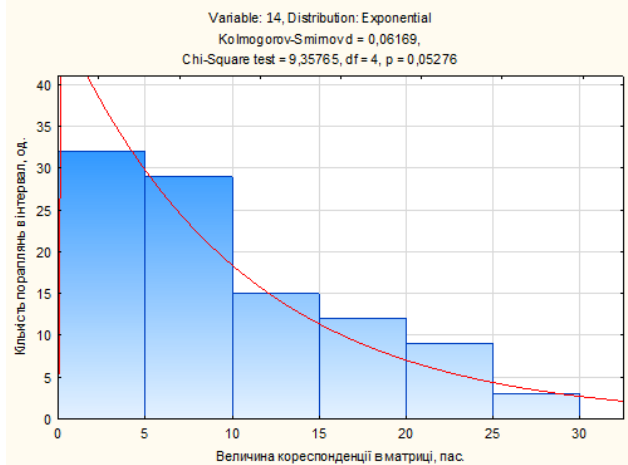
Л



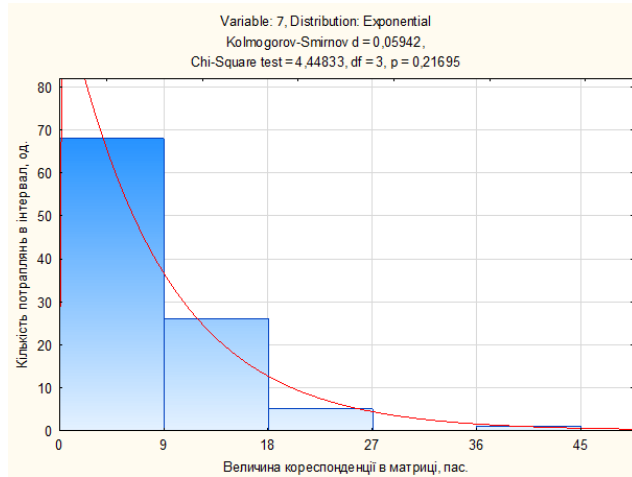
М



Н



п



р

Рисунок 4.2, аркуш 3

4.2 Оцінювання можливостей інтервальної концепції в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту

Метою даного підрозділу дисертаційної роботи є оцінювання результатів роботи розробленого методу поетапної генерації МПК в рамках ІК моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ. Ключовим показником, що використовується для оцінювання станів розрахункових МПК у рамках ІК моделювання транспортного попиту є різниця у транспортній роботі (1.28) по реалізації МК [66], яка часто доповнюється показником середньої відстані пересування пасажирів у ГТ (4.1) [68, 70, 71]:

$$\bar{l} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot l_{ij}}{Q}, \quad (4.1)$$

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 – загальна 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 діючих пасажирських маршрутних систем міст і запропонованих заходів щодо їх коригування й удосконалення.

З метою здійснення відповідних розрахунків було використано матрицю відстаней між ТР, яка є однією з характеристик моделі транспортної пропозиції системи ГТ м. Харкова, розрахованою з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для транспортного моделювання PTV VISUM у рамках виконання дисертаційного дослідження [71].

Обрані для оцінювання станів МПК, розроблених з використанням поетапного методу генерації, показники були розраховані для всіх 170 варіантів МПК, змодельованих у рамках виконання підрозділу 3.2 даної дисертаційної роботи. За результатами проведених розрахунків було встановлено інтервали їхніх найбільш ймовірних значень (таблиця 4.2), а також побудовано графік зміни величини середньої відстані пересування пасажирів у ГТ в залежності від значень транспортної роботи з реалізації відповідних МПК (рисунок 4.3).

Таблиця 4.2 – Результати інтервального оцінювання варіантів МПК, отриманих з використанням розробленого поетапного методу генерації

Показник	Величина інтервалу
Інтервал можливих значень	
Транспортна робота з реалізації 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 МПК, пас.-км	[3904482,8;3916649,9]
Середня відстань пересування пасажирів у ГТ, км	[8,931;8,959]

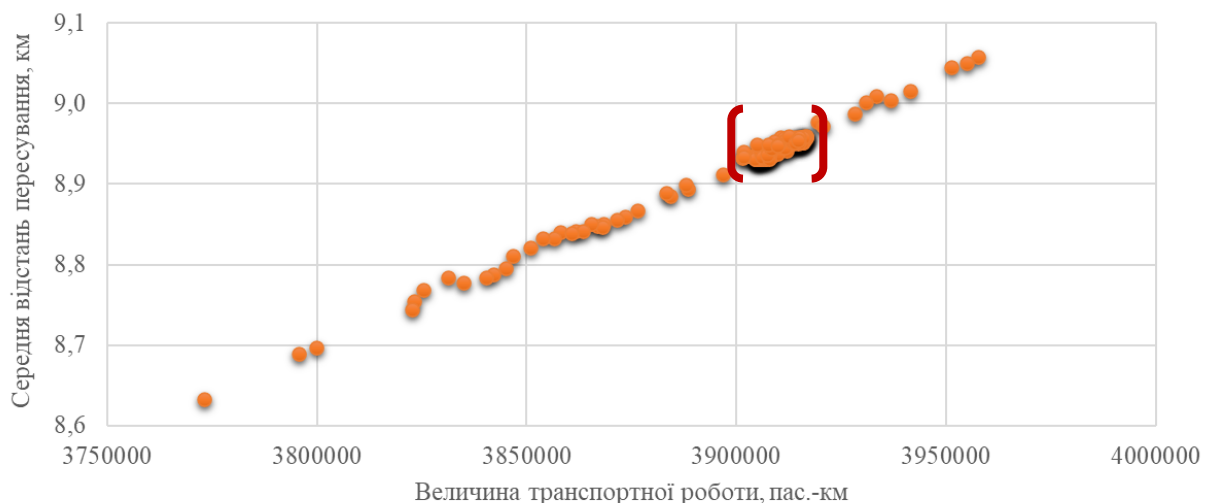


Рисунок 4.3 – Залежність середньої відстані пересування пасажирів у ГТ від транспортної роботи з реалізації МПК, згенерованих з використанням поетапного методу

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 рисунку 4.3 червоними дужками. Отже, варіанти МПК, що потрапляють у зазначений діапазон, можна вважати найбільш ймовірними.

Слід відзначити, що обрані оцінні показники з аналогічною метою використовувалися у роботах [70, 71] на тому ж самому об'єкті експериментальних досліджень, що і у даній дисертації. У роботі [70] було встановлено, що величина транспортної роботи з реалізації МПК 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 [71] 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 [138]. OpenSolver розширює вбудований у MS Excel «Пошук рішення» та дозволяє розв'язувати складні задачі лінійного та цілочислового програмування без штучних обмежень на розмір моделі.

У прикладі, що розглядається в даній дисертаційній роботі, було сформовано мінімальний і максимальний за критерієм транспортної роботи варіанти МПК для м. Харкова розміром 140 ТР. Це завдання було достатньо швидко вирішено з використанням надбудови OpenSolver за рахунок розв'язання транспортної задачі лінійного програмування відповідного розміру. Приклад вирішення подібного завдання, але для об'єкту значно меншого за розміром, наведено у роботі [68]. За вхідну інформацію використано матрицю відстаней між ТР [71] та місткості ТР з відправлення та прибуття пасажирів (таблиця 3.1). У результаті розрахунків було встановлено,

що екстремальні значення можливого діапазону станів МПК для м. Харкова становитимуть: величина транспортної роботи з реалізації МК [919240,9;7599700,6] пас.-км і середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – [2,102;17,382] км.

З огляду на вищенаведені значення оцінних показників, аналогічних до представлених у роботах [70, 71], а також розрахованих для згенерованих МПК за поетапним методом формування моделей транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ, цілком можна стверджувати, що ширина діапазонів цих параметрів зменшується:

- для повного (екстремального) діапазону значень – діапазон значень транспортної роботи скорочується у 549,1 разів, або на 99,8 %, середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – у 545,7 разів, або на 99,7 %;

- для діапазону значень оцінних показників, представлених у роботі [70] – діапазон значень транспортної роботи скорочується у 33,1 рази (97,0 %), середньої відстані пересування пасажирів у ГТ – у 32,1 рази, або на 96,9 %;

- для діапазону значень оцінних показників, представлених у роботі [71] – діапазон значень транспортної роботи скорочується у 1,16 разів, або на 13,8 %, середньої відстані 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 рисунку 4.4.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що розроблений метод поетапної генерації випадкових МПК є цілком придатним для практичного застосування. Його реалізація у вигляді комп'ютерної програми дозволяє генерувати найбільш ймовірні стани транспортного попиту на пересування

пасажирів ГТ у містах з урахуванням цілого переліку обмежень на формування МПК. До цього слід також додати, що результати роботи поетапного методу генерації МПК дозволяють зменшити як діапазон можливих станів МК, так і час на формування окремих варіантів моделей транспортних потреб населення у пересуванні ГТ, що можна вважати вагомим кроком вперед у розвитку ІК моделювання попиту населення на пересування

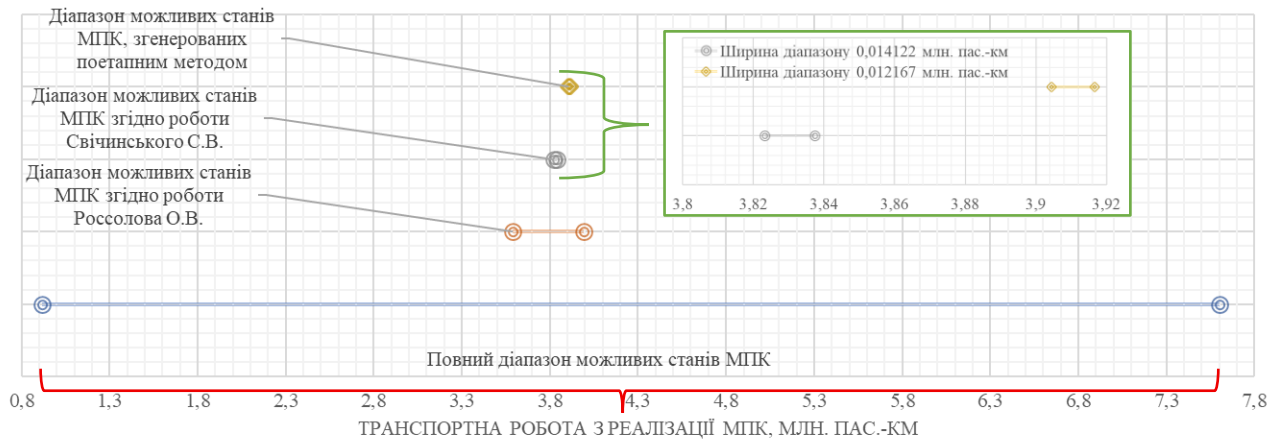


Рисунок 4.4 – Графічне відображення звуження меж діапазону зміни найбільш ймовірних станів МПК

Слід також відзначити, що у даній дисертаційній роботі зроблено лише першу спробу опису і врахування переліку можливих обмежень на моделювання МПК, а також підбору значень керуючих параметрів, використання яких теоретично дозволило б отримати ще кращі результати генерації, і, відповідно, додатково звужити межі найбільш ймовірних станів МК у рамках ІК моделювання потреб населення у пересуваннях ГТ.

4.3 Розробка практичних рекомендацій щодо застосування поетапного методу генерації матриць пасажирських кореспонденцій

Одним із найбільш складних етапів у процесі формування транспортних моделей систем міського ГТ як з методичної, так і з практичної точки зору, є

розробка моделей транспортного попиту, найпоширенішою формою представлення яких є МПК. З огляду на це, пошук і моделювання найбільш ймовірних станів транспортних потреб міського населення у пересуваннях ГТ є одним із пріоритетних завдань для фахівців з транспортного моделювання та планування.

На сьогодні у переважній більшості випадків це завдання розв'язується шляхом застосування найуживаніших синтетичних моделей розрахунку кореспонденцій, зокрема гравітаційної та ентропійної, вихідними даними для яких зазвичай виступають результати 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 задачею. До цього слід також додати обмежену придатність результатів моделювання МПК із використанням синтетичних моделей у межах МК моделювання транспортного попиту на пересування населення в місті, що зумовлено точковою оцінкою МК при застосуванні таких моделей.

У той же час слід зазначити, що на сьогодні вже існують інструменти, які дозволяють з окремого варіанта МПК, що описує певний стан транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ в місті, сформувати такий варіант матриці, який відповідатиме параметрам, використаним для калібрування моделі попиту. Одним із таких інструментів є вбудований у PTV VISUM модуль TFlowFuzzy [67], який забезпечує можливість калібрування як фрагменту МПК, так і матриці в цілому. Його застосування найчастіше ґрунтується на заданні окремих калібрувальних обмежень або їх системи, що реалізуються через параметри ланок у транспортній моделі, які з'єднують вузли транспортної мережі, зокрема пасажиропотоки на ключових ділянках маршрутної мережі, через маршрути ГТ і результати його

функціонування – обсяги перевезення пасажирів, через зупиночні пункти.

Також слід розуміти, що для отримання якісних результатів калібрування МПК із використанням модуля TFlowFuzzy необхідним є проведення польових досліджень роботи ГТ, нехай може 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, ознайомчим характером відкритих навчальних матеріалів і відсутністю систематизованих практичних прикладів його застосування в умовах вітчизняних транспортних і маршрутних систем.

Все вищенаведене 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.

Використання методів математичного моделювання для розв'язання задачі отримання 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 місткості ТР з відправлення й прибуття пасажирів, є базовий власне випадковий метод генерації МПК, який був взятий за основу розробки нового поетапного методу генерації матриць в цій дисертаційній роботі. Водночас, результати його застосування, особливо з урахуванням накладання додаткових обмежень, не гарантують отримання коректного або прийняттого результату моделювання МПК, зокрема для об'єктів великої розмірності, незважаючи на те, що сформовані МПК характеризуються максимальною випадковістю.

Розроблений у цій дисертаційній роботі метод поетапної генерації випадкових станів МПК усуває недоліки, притаманні як синтетичним методам формування МК, так і власне базовому випадковому методу. Запропонований метод 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. З метою найбільш ефективної організації робіт по формуванню МПК із застосуванням розробленого поетапного методу генерації випадкових МК слід дотримуватися нижченаведених рекомендацій.

4.3.1 Рекомендації щодо роботи із програмою генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій

Програма реалізована у виді макросу у файлі MS Excel з підтримкою макросів і призначена для генерації випадкових значень елементів МПК будь-якої розмірності, котрі забезпечують виконання накладених на них обмежень. Можливості програми дозволяють формувати МПК у всьому діапазоні впливу

передбачених у ній обмежень на структуру матриць – від їх відсутності у процесі генерації до повного урахування всіх обмежень. Позитивний результат роботи програми гарантується не завжди, тобто згенерована матриця може бути не повністю заповнена. Цей факт, як властивість процесу випадкової генерації МПК, було усвідомлено під час створення і налагодження алгоритму, котре вимагало глибокого осмислення сенсу модельованого процесу. Він підтверджує висновки, зроблені на етапі введення у процедуру генерації випадкової МПК поняття потенціалів обмежень.

Тому при розробці алгоритму було віддано перевагу процедурі примусового заповнення частини МПК перед поверненням на попередній етап генерації як більш ефективному способу досягнення бажаного результату з точки зору витрат часу на виконання розрахунків. Це обумовлено тим, що ні один із двох способів не може гарантувати повного заповнення МПК випадковим чином при наявності розширеної системи обмежень, а повернення на попередні етапи генерації при цьому може перетворити цей процес у нескінченний за часом.

Всі обмеження на структуру матриць розподілені на три категорії: базові, позиційні та додаткові.

Кожна категорія обмежень формується і вводиться у файл MS Excel окремо, до запуску макросу з метою забезпечення зручності підготовки даних для генерації МПК. Порядок розміщення аркушів і їх кількість у файлі не важливі – необхідно лише не видаляти аркуші «Matrix», «Limitations», «Supplemental» і «Potentials» із файлу, не змінювати їх назви, а також дотримуватися зазначеного у цьому підрозділі порядку розміщення даних на них.

Програма не обмежує проєктувальника у використанні зручних для нього способів форматування комірок на робочих аркушах документу MS Excel. При цьому для заповнення робочих аркушів програми слід уникати використання поєднання дій «Cut → Paste» («Вирізати → Вставити»), а

використовувати виключно пару дій «Copy → Paste» («Копіювати → Вставити»).

Аркуш «Matrix» завжди стає активним після закінчення роботи макросу і служить для виводу основної частини результатів розрахунку – власне випадкової МПК, заповненою повністю або частково, і діагностичних повідомлень – або ж про причини ранньої зупинки алгоритму, або ж про те, що матриця не була повністю заповнена. На цей аркуш у вигляді обрамлення МК виводяться вхідні місткості TP з відправлення і прибуття, поряд з котрими (нижче) виводяться ті ж місткості, але вже отримані у результаті заповнення МПК макросом. На аркуші «Matrix» зручно зробити умовне форматування для стовпчика і рядка, що обмежують МК, щоб виділяти у них значення необслужених місткостей TP з відправлення і прибуття. Вони відсутні тільки тоді, коли значення у правому стовпчику для відправлень і нижньому рядку для прибуттів після розрахунку дорівнюють відповідним місткостям TP.

Аркуш «Limitations» служить, в основному, для введення вхідних даних. Він містить кількість базових і додаткових обмежень, числові значення кожного з них і налаштування, необхідні для керування процесом заповнення МК. На нього також виводиться кількість випадкових і примусових призначень кореспонденцій (комірки «N11» і «N12») та отримані у результаті роботи макросу значення додаткових обмежень (стовпчик «D»).

Кількість місткостей TP з відправлення і прибуття (базових обмежень) вводиться у комірки «F1» і «H1», кількість додаткових обмежень – у комірку «J1». У стовпчики «A», «B» і «C», починаючи з другого рядка, вводяться їхні значення у порядку зростання їхніх номерів обмежень.

Далі на аркуші «Limitations» вводяться налаштування програми, що дозволяють впливати на результат генерації МК:

– максимально допустиме значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні у комірку – комірка «N2»;

– мінімальне значення потенціалу основного обмеження, після якого воно починає виконуватися – комірка «N3»;

– генерація значення кореспонденції, що заповнюється (якщо цей параметр прирівняний до 0 або залишений не заданим, то клітинка матриці на черговому етапі роботи алгоритму заповнюється по максимуму) – комірка «N4»;

– перемикач примусового виконання обмежень (якщо цей параметр прирівняний до 0 або залишений не заданим, то передбачається процедура примусового заповнення МК) – комірка «N5»;

– мінімальне значення потенціалу додаткового обмеження, після якого воно починає виконуватися – комірка «N6».

Аркуші «Potentials» і «Supplemental» служать виключно для введення даних і містять масив даних, аналогічний за розмірністю МК, перше значення якого розміщується у комірці «A1». У них вказується інформація, необхідна для формування системи обмежень: на аркуші «Potentials» – для базових і просторових обмежень; на аркуші «Supplemental» – для додаткових обмежень.

Програма формування МПК запускається поєднанням клавіш «Ctrl+Shift+M» (працює на англійській розкладці) або через пункт меню MS Excel «Макроси» («Alt+F8»). У другому випадку для запуску слід вибрати макрос «Generate». Тривалість генерації в основному залежить від розмірів матриці і параметрів розрахунку, і менш – від системи обмежень. Запуск макросу не гарантує обов'язкового отримання матриці, яка повністю задовольняє всім обмеженням, що обумовлено випадковим характером процесу її заповнення. Однак користувач не обмежений у кількості запусків програми і параметрах налаштувань генерації, тому за умов, що всі обмеження будуть сумісними, у результаті певної кількості запусків можуть бути згенеровані декілька МК, що повністю задовольняють всім обмеженням і у той же час відрізняються між собою. Відповідальністю за формування сумісної системи обмежень лежить на користувачеві, а програма перевіряє сумісність обмежень лише на самому загальному рівні і не може гарантувати того, що задані параметри і система обмежень допускають наявність хоча б одного варіанту МПК, що відповідає їм всім.

За явної несумісності обмежень виконання програми зупиняється, і у комірці «A1» аркуша «Matrix» виводиться повідомлення «The system of restrictions is not compatible». Для отримання результату користувачу необхідно розібратися у причинах його появи, у тому числі за допомогою редактору Visual Basic for Applications, і ліквідувати їх.

У комірці «A1» аркуша «Matrix» виводяться всі діагностичні повідомлення про результати роботи макросу. Крім вказаного вище, це:

– «The capacities of the transport areas are not balanced». З'являється, якщо сумарні місткості ТР з відправлення і прибуття не рівні між собою;

– «The supplemental restrictions does not match the number of trips». З'являється, якщо сума місткостей кишень додаткових обмежень не дорівнює загальній кількості поїздок, що дорівнює сумарним місткостям з відправлення або прибуття;

– «The array of the supplemental restriction contains incorrect data». З'являється, якщо в матриці приналежності зустрічаються числа, що не відповідають номерам кишень додаткових обмежень;

– «Couldn't fill in the matrix». З'являється, якщо в процесі генерації потенціали всіх кореспонденцій стали рівними 0, а по матриці розподілені не всі пересування. Не виконані обмеження можна побачити на аркушах «Matrix» і «Limitations».

Одразу після виконання макрос готовий до наступного запуску. Необхідно тільки зберегти отриману матрицю і, можливо, інформацію з аркуша «Limitations».

До базових обмежень відносяться місткості ТР з відправлення і прибуття пасажирів, кількість котрих задається у комірках «F1» (відправлення) і «H1» (прибуття) аркуша «Limitations». Значення місткостей задаються на аркуші «Limitations» у стовпчиках «A» (відправлення) і «B» (прибуття), починаючи з другого рядка у порядку зростання номерів ТР. Сумарні значення місткостей ТР з відправлення і прибуття пасажирів повинні бути рівними між собою.

На аркуші «Potentials» наводиться матриця потенціалів, яка формується

користувачем до запуску макросу та описує базові й позиційні обмеження на МК. Матриця потенціалів представляє собою масив даних, аналогічний за розмірністю МК, перше значення котрого розміщується у комірці «A1» аркуша «Potentials».

На аркуші «Limitations» задаються додаткові обмеження. Так, кількість кишень додаткового обмеження задається у комірці «J1». У стовпчик «C» того ж аркуша, починаючи з комірки «C2», вносяться значення обмежень для всіх кишень у порядку зростання їх номерів. Сума обмежень для них повинна бути рівною загальній кількості пересувань у МПК.

Приналежність елементів МК до кишень задається на аркуші «Supplemental» у вигляді матриці приналежності, що за розмірністю є схожою із МК, перше значення розміщується у комірці «A1». У ній вказуються натуральні числа, що відповідають номерам кишень. Якщо матриця приналежності міститиме значення, відмінні від номерів кишень, для яких задані обмеження, це призводитиме до помилок у роботі макросу. Тому на цьому листі перед запуском макросу доцільно визначити мінімальне і максимальне значення у матриці приналежності.

При відсутності додаткових обмежень у комірці «J1» аркуша «Limitations» слід ввести 0 або залишити її пустою, а матрицю приналежності на аркуші «Supplemental» заповнити додатними числами, які не перевищують кількість TP у моделі.

4.3.2 Рекомендації щодо отримання та формування бази вхідної інформації для моделювання матриць пасажирських кореспонденцій

Ключовою інформацією для моделювання МПК за запропонованим у дисертації методом, як і за іншими відомими, є місткості TP з відправлення та прибуття пасажирів. Основним джерелом отримання цієї інформації є результати попередніх досліджень транспортних потреб населення у

пересуванні або ж натурні спостереження за роботою ГТ у різних форматах (обстеження пасажиропотоків, опитування, анкетування, тощо), що проводяться з метою вивчення попиту на пересування у місті.

Для підвищення точності результатів генерації випадкових МПК із застосуванням розробленого поетапного методу потрібна додаткова інформація про, наприклад, фактичні пасажиропотоки на ключових ділянках міської маршрутної мережі або ж на всій ВДМ, дані про розподіл відстаней або часу пересування пасажирів у системі ГТ міста, рейсові маршрутні МК, тобто інформація про об'єктивні параметри транспортного попиту. Якщо фактичні пасажиропотоки і рейсові маршрутні МК є переважно результатом проведення польових досліджень попиту на пересування пасажирів у місті, що можуть бути реалізовані різними способами, то дані про розподіл поїздок по «складності» (відстані, часу) або ж за типами пересувань можуть бути отримані з результатів попередніх досліджень, наприклад, результатів розрахунку відповідних матриць витрат у PTV VISUM, або ж результатів опитування користувачів ГТ.

Варто розуміти, що дані, які використовуються для генерації МПК за розробленим методом, повинні забезпечувати повноту, логічність та узгодженість системи обмежень. Тому до початку моделювання необхідно перевірити, щоб усі обмеження (місткості ТР, пасажиропотоки, розподіли дальності та (або) часу пересування, заборонені для генерації кореспонденцій клітинки) були принципово сумісними, тобто існував хоча б один допустимий в таких обмеженнях варіант МПК. Особливу увагу слід приділяти уникненню логічних протиріч між груповими обмеженнями (наприклад, між місткостями ТР та відомими потоками на ділянках).

Також для зменшення можливих помилок у роботі програми для кожного виду групових обмежень доцільно створювати свій шар і контролювати, щоб кожна кореспонденція у генерованій МК належала хоча б одному обмеженню в кожному шарі (за потреби вводити фіктивне обмеження з величиною, що дорівнює сумі всіх кореспонденцій). При цьому кожному

шару обмежень повинна відповідати конкретна матриця приналежності кореспонденцій до відповідних кишень. Це є обов'язковою умовою для коректного обчислення потенціалів комірок і обмежень.

4.3.3 Рекомендації щодо налаштування керуючих параметрів програми

Під час налаштування програми поетапної генерації МПК особливу увагу слід приділяти вибору керуючих параметрів, які визначають баланс між гарантованістю виконання обмежень і збереженням випадковості результатів моделювання МК. В алгоритмі необхідно задавати граничне значення потенціалів базового і додаткового обмежень, досягнення якого сигналізує про доцільність переходу від випадкової генерації до спрямованого заповнення матриці. Значення цього параметра не може бути обґрунтоване виключно теоретично і має визначатися експериментальним шляхом, виходячи з необхідності уникнення тупикових ситуацій при одночасній мінімізації втрат випадковості у підсумковій МПК. Чим вищими є граничні значення потенціалів базового і додаткового обмежень, тим більшою є кількість комірок у МК з примусовим заповненням кореспонденціями.

Важливим керуючим параметром також є максимальне допустиме значення кореспонденції, що призначається на окремому етапі моделювання, оскільки її завищене значення призводить до різкого зменшення потенціалів обмежень і підвищує ризик виникнення тупикових станів, тоді як занадто малі значення зумовлюють зростання кількості етапів генерації та збільшення тривалості розрахунків. Вибір цього параметра доцільно здійснювати з урахуванням низки чинників. До них належать масштаб і розмірність об'єкта моделювання, оскільки для великих систем надмірні кореспонденції швидко вичерпують місткості та потенціали обмежень і підвищують ризик тупикових ситуацій. Важливим також є співвідношення між місткостями ТР і величинами кореспонденцій, адже значення, співмірні із залишковими місткостями,

істотно впливають на перебіг генерації. Значення цього параметра також залежить від кількості та жорсткості додаткових і позиційних обмежень, зокрема частки заборонених клітинок у МК, за яких доцільним є зменшення максимальної кореспонденції для збереження керованості процесу. Окрім цього, вибір допустимого значення кореспонденції пов'язаний з вимогами до обчислювальних можливостей комп'ютера, оскільки великі значення скорочують кількість етапів генерації, але знижують її стабільність, тоді як менші підвищують надійність ціною зростання тривалості розрахунків. Додатково цей параметр має узгоджуватися з призначенням результатів моделювання МПК, зокрема з необхідністю багаторазового аналізу або разових розрахунків.

Щодо прийнятних результатів моделювання МПК за розробленим методом, то тут слід відзначити наступне. Результати моделювання МК можуть вважатися успішними лише за умови дотримання як одиничних обмежень, що визначають фіксовані або заборонені значення окремих комірок матриці, так і групових обмежень, які мають виконуватися в межах заданої допустимої похибки. За значення такої допустимої похибки доцільно встановити величину нерозподілених кореспонденцій, яка не перевищує $(0,25-1) \%$ від загальної кількості пересувань у МПК і 1% від обсягу кореспонденцій у межах певної кишені додаткового обмеження за умови, що цей залишок відноситься лише до однієї кишені. За виконання зазначених умов результати моделювання можуть вважатися достатньо точними для практичного використання в задачах транспортного планування та аналізу попиту, а відхилення, що виникають у процесі генерації МПК, не мають істотного впливу на інтерпретацію та подальше застосування отриманих результатів, що підтверджено у цій дисертаційній роботі. Представлені вище значення допустимої похибки розрахунку МПК з використанням запропонованого методу можуть бути збільшені, наприклад, до 5% на тестових етапах генерації МК.

Додатковим критерієм допустимості результатів роботи програми може бути аналіз розподілу значень кореспонденцій у сформованій МК. Отриманий розподіл має бути монотонно спадним, без появи аномальних піків, що можуть свідчити про надмірне використання цілеспрямованого заповнення комірок МК на окремих етапах генерації.

4.4 Висновки по розділу

1. Експериментально доведено, що розроблений метод поетапної гарантованої випадкової генерації МПК забезпечує формування великої множини альтернативних станів МК, які відповідають заданій системі обмежень та можуть бути використані для реалізації ІК моделювання транспортного попиту. Результати моделювання станів МПК, отримані за запропонованим методом, зберігають статистичні властивості, притаманні власне випадковому (базовому) методу генерації МПК, зокрема відповідність емпіричного розподілу величин кореспонденцій теоретичному показниковому закону розподілу, що підтверджує достатній рівень випадковості згенерованих матриць.

2. Сформовані за розробленим методом МПК характеризуються монотонно спадним характером розподілу величин кореспонденцій без появи аномальних піків, що підтверджує відсутність систематичних спотворень структури попиту та свідчить про коректність реалізації розробленого алгоритму генерації МК. Відмінності між МПК, сформованими за базовим випадковим методом та запропонованим поетапним методом, вказують на відсутність критичної втрати випадковості і свідчать про компроміс між стохастичністю результатів і дотриманням системи додаткових обмежень, що підвищує практичну придатність розробленого методу.

3. Результати генерації МПК за розробленим поетапним методом дозволяють досягти суттєвого звуження меж можливих станів МК у рамках ІК

моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів ГТ порівняно з теоретично екстремальними та емпірично отриманими межами, що підвищує точність і надійність моделювання транспортного попиту. Отримані результати підтверджують практичну придатність поетапного методу генерації випадкових МПК, який дозволяє формувати найбільш ймовірні стани транспортного попиту з урахуванням розширеного переліку обмежень, зменшувати рівень невизначеності результатів і підвищувати ефективність ІК моделювання транспортних потреб населення.

4. Реалізація запропонованого алгоритму у вигляді програмного модуля у середовищі MS Excel є ефективним інструментом практичного формування МПК, оскільки дозволяє гнучко задавати обмеження, масштабувати розмірність задачі та забезпечувати автоматизовану генерацію допустимих випадкових матриць, а запропонований метод генерації випадкових МПК створює методичну основу для підвищення надійності рішень, що приймаються фахівцями з транспортного планування.

5. Розроблені практичні рекомендації щодо застосування поетапного методу генерації МПК мають на меті допомогти фахівцям з транспортного планування в отриманні достатньо швидкого результату формування сукупності станів МК в умовах обмеженості різного роду ресурсів, без суттєвих втрат у точності цих результатів.

Основні результати досліджень, проведених в рамках цього розділу, опубліковані в роботах [1, 2, 4-6, 10, 11].

ВИСНОВКИ

1. Більшість традиційних методів побудови моделей транспортного попиту на пересування вантажів і пасажирів у містах орієнтовані на формування одиничної МК, яка відображає лише певний усереднений стан попиту та не враховує його випадкову природу, варіативність поведінки користувачів і вплив зовнішніх факторів. Окрім цього, методи формування вантажних МК не мають самостійної методології та у значній мірі ґрунтуються на адаптації моделей, застосовуваних у пасажирських перевезеннях, що знижує точність відображення специфіки перевезень вантажів. Також можна відмітити обмеженість синтетичних і ймовірнісних методів відтворення множини можливих станів транспортного попиту, що вказує на доцільність застосування ІК моделювання, яка передбачає формування сукупності допустимих альтернативних МК замість одиничного розрахункового варіанта, а також математичного моделювання у пошуках нового методу генерації випадкових МК.

2. Розроблений метод поетапної гарантованої генерації випадкових МПК забезпечує формування множини альтернативних станів транспортного попиту при одночасному дотриманні одиничних і групових обмежень, які висуваються з огляду на фактичні характеристики транспортного процесу, та збереженні високого рівня стохастичності результатів. Метод ґрунтується на поетапному розподілі кореспонденцій між ТР з контролем балансових співвідношень відправлення і прибуття пасажирів, а також урахуванні системи додаткових обмежень, що можуть бути представлені просторовими або поведінковими характеристиками транспортного процесу з перевезення пасажирів.

Доведено, що запропонований метод дозволяє формувати коректні та прийнятні варіанти МК із гарантованим виконанням заданих обмежень і допустимою величиною нерозподілених пересувань не більше (0,25-1) % від загального обсягу попиту та 1 % у межах окремих групових обмежень, що

підтверджує високу точність результатів та їх придатність для практичного застосування у задачах транспортного планування.

3. Результати генерації МПК з використанням поетапного методу зберігають статистичні властивості базового випадкового методу та забезпечують відповідність емпіричних розподілів кореспонденцій у МК теоретичному показниковому закону.

Встановлено, що розподіл величин елементів матриць, сформованих із застосуванням розробленого методу, відповідає показниковому закону розподілу, що підтверджено статистичними критеріями згоди Пірсона та Колмогорова–Смирнова, а також свідчить про збереження властивостей випадкових моделей транспортного попиту.

Підтверджено, що застосування поетапного методу для генерації МПК не знижує рівень випадковості отриманих МК, водночас забезпечуючи вищий рівень контрольованості, стабільності та відповідності заданим обмеженням, що підвищує надійність отриманих моделей транспортного попиту.

4. З використанням даних, отриманих з транспортної моделі м. Харкова, оцінено можливості розробленого методу поетапної гарантованої генерації МПК у межах ІК моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів міським ГТ. Доведено, що застосування поетапного методу забезпечує суттєве звуження інтервалів можливих станів МПК: транспортна робота по реалізації матриць скорочується у 549 разів (на 99,8 %), а середня відстань пересування – у 545 разів (на 99,7 %) порівняно з екстремальним теоретичним діапазоном. Також встановлено, що 76 % з побудованих з використанням розробленого методу МПК відносяться до дуже вузького інтервалу значень транспортної роботи – [3904482,8;3916649,9] пас.-км, у межах якого спостерігаються найбільш ймовірні варіанти МК. Використання МПК, що характеризують цей діапазон, дозволяє звужити інтервал можливих станів МПК для методу, який враховує фактичні закономірності розселення населення м. Харкова: досягається скорочення діапазону транспортної роботи з реалізації матриць у 1,16 разів (на 13,8 %), середньої відстані пересування –

у 1,18 разів (на 15,2 %). Це підтверджує, що застосування розробленого методу дозволяє підвищувати точність, стабільність та надійність результатів у межах інтервального моделювання та формує науково обґрунтовану основу для практичного застосування при плануванні, оптимізації та розвитку систем міського ГТ.

Розроблені практичні рекомендації щодо застосування поетапного методу генерації МПК у межах ІК моделювання транспортного попиту мають на меті допомогти фахівцям з транспортного моделювання належним чином формувати та коригувати моделі транспортних потреб населення у пересуваннях міським ГТ. Запропоновані рекомендації покликані забезпечити системний підхід до вибору обмежень на формування МПК, налаштування параметрів поетапної генерації, оцінювання достовірності отриманих результатів та відбору найбільш ймовірних станів транспортного попиту, що дозволяє кількісно оцінювати альтернативні сценарії розвитку ТС та підвищувати точність прогнозування пасажиропотоків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь С. Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. 2(23). С. 152–158. DOI: <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). С. 438–446. DOI: <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), ч. 2. С. 394–409. DOI: [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. Цинь С., 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. DOI: [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).
5. Цинь С., Любий Є. В. Оцінювання можливостей інтервальної концепції в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2026. 1(96). С. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.22>.
6. Горбачов П. Ф., Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь С. Щодо питання моделювання елементів матриць кореспонденцій в рамках інтервальної концепції формування моделей транспортного попиту // *Напрямки розвитку технологічних систем і логістики в АПВ* : матеріали V-ї Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 23 трав. 2024 р. Харків: ДБТУ. 2024. С. 48–49.
7. Любий Є. В., Цинь С. Моделі прогнозування вантажного транспортного попиту // *Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка*

фахівців галузі транспорт : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 22–23 жовт. 2024 р. Харків: ХНАДУ. 2024. С. 323–326.

8. Цинь С., Любий Є. В., Мосьпан В. М. Чотирьохетапна модель розрахунку вантажного транспортного попиту // *Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 25–26 листоп. 2024 р. Харків: ХНАДУ. 2024. С. 178–180.

9. Цинь С., Любий Є. Проблеми оцінювання точності моделей транспортного попиту // *Транспортні системи та технології* : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 15–16 трав. 2025 р. Львів: НУ «Львівська політехніка». 2025. С. 124–126.

10. Цинь С. Існуючі метрики оцінки подібності матриць пасажирських кореспонденцій // *Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 22 трав. 2025 р. Харків: ДБТУ. 2025. С. 106–109.

11. Цинь С. Алгоритм гарантованої генерації випадкових матриць кореспонденцій // *Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025" (MAITRI 2025)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 30–31 жовт. 2025 р. Харків: ХНАДУ. 2025. С. 411–414.

12. Qin X. Problems of modeling passenger correspondence matrices // *Сучасні технології промислового комплексу – 2025* : матеріали IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон-Хмельницький, 17–19 верес. 2025 р. Херсон-Хмельницький: ХНТУ. 2025. С. 249–251.

13. Qin X., Orhina A. Analysis of synthetic models for forming matrices of passenger correspondence // *Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом* : матеріали VI-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 18–19 листоп. 2025 р. Харків: ХНАДУ. 2025. С. 64–68. DOI: 10.61718/in202512.01. ISBN 978-617-7886-89-0.

14. Маяк М., Прогній П., Матвіїшин А., Попович П., Шевчук О., Островерхов В., Коцур А., Романишин О. Особливості розвитку ринку

вантажних і пасажирських перевезень // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. 2(15). С. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.393>.

15. Шапенко Є. М., Котова С. О., Гальона І. І., Білоног О. В., Ярошевський В. В. Методи прогнозування вантажних перевезень в логістиці // *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2023. 2(4). Р. 79–86. DOI: 10.46299/j.isjea.20230204.09.

16. Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія / за заг. ред. проф. Д. В. Ломотька. Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2022. Т. 2. 216 с.

17. Транспортні системи: актуальні проблеми планування, функціонування та аналізу : колективна монографія / за заг. ред. проф. П. Ф. Горбачова. Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. 262 с. DOI: 10.61718/tsl2025m1. ISBN 978-617-7886-79-1.

18. Підходи до управління матеріальними потоками та оптимізації вантажних перевезень : колективна монографія / за заг. ред. проф. П. Ф. Горбачова. Харків: СГ НТМ «Новий курс», 2025. 154 с. DOI: 10.61718/tsl2025m2. ISBN 978-617-7886-80-7.

19. Філософський енциклопедичний словник / за ред. В. І. Шинкарук. Київ, Інститут філософії ім. Г. С. Сковороди НАНУ: Абрис, 2002. 751 с. ISBN 966-531-128-X.

20. Про затвердження Порядку розроблення, оновлення, внесення змін та затвердження містобудівної документації. *Законодавство України* : веб-сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/926-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення 01.09.2024 р.).

21. Tsekeris T., Tsekeris Ch. Demand Forecasting in Transport: Overview and Modeling Advances // *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2011. 24(1). С. 82–94. DOI: 10.1080/1331677X.2011.11517446.

22. Schaefer R., Worth M., Heilman J., Kehoe N. Freight Demand Modeling and Data Improvement Implementation Handbook. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Freight Management and Operations. Washington, DC, 2017. 60 p.
23. Urban Freight Transport Planning and Management. [Developed of Toolkits under the “Sustainable urban transport project”]. Ministry of Urban Development Government of India, 2019. 126 p.
24. Barbakaru D., Chebanova T. Methods for forecasting freight transportation of transport companies // *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. 2022. 3(80). P. 78–86. DOI: 10.31375/2226-1915-2022-3-78-86.
25. Guidebook for forecasting freight transportation demand. Cambridge Systematics, Inc.; NCHRP report 388, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C. 1997.
26. Rocha J., Viana C. M., Oliveira S. Time Series Analysis - Recent Advances, New Perspectives and Applications. IntechOpen. 2024. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.111223>.
27. Jourquin B., Tavasszy L., Duan L. On the generalized cost - demand elasticity of intermodal container transport // *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2014. 14(4). P. 362–374. Available at: <http://hdl.handle.net/2078.1/152609>.
28. Abdelwahab W. M. Elasticities of mode choice probabilities and market elasticities of demand: Evidence from a simultaneous mode choice/shipment-size freight transport model // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 1998. 34(4). P. 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(98\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(98)00014-3). ISSN 1366-5545.
29. Beuthe M., Jourquin B., Urbain N. Estimating Freight Transport Price Elasticity in Multi-mode Studies: A Review and Additional Results from a Multimodal Network Model // *Transport Reviews*. 2014. 34(5). P. 626–644. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.946459>.

30. Hoon-Oum T., Waters W.G. Transport demand elasticities. In *Handbooks in Transport, Vol. 1: Handbook of Transport Modelling* (pp. 197–210). Elsevier, 2007. ISBN 0-08-043594-7.
31. Hoffmeister O., Dalheimer B. A linear model to estimate modal split in international freight transport, based on revealed preferences about cost and time saving // *Journal of Shipping and Trade*. 2024. 9. 28. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-024-00181-0>.
32. Ortuzar J. de D., Willumsen L. G. *Modelling transport*. Third edition. Chichester, Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006. 499 p.
33. Sheffi Y. *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, 1985. 415 p.
34. Nagurney A. Congested urban transportation networks and emission paradoxes // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2000. 5(2). P. 145–151. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00031-0). ISSN 1361-9209.
35. *Modelling Freight Transport* / Edited by Tavasszy L., de Jong G. Elsevier. 2014. DOI: 10.1016/C2012-0-06032-2. ISBN: 978-0-12-410400-6.
36. Beuthe M., Jourquin B., Geerts J.-F., Koul à Ndjang' Ha C. Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2001. 37(4). P. 253–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1366-5545\(00\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S1366-5545(00)00022-3). ISSN 1366-5545.
37. Fale M., Wang Y., Rupnik B., Kramberger T., Vizinger T. Systematic Review of Transportation Choice Modeling // *Applied Sciences*. 2025. 15(17), 9235. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15179235>.
38. Danielis R., Marcucci E. Attribute cut-offs in freight service selection // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2007. 43(5). P. 506–515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.10.002>. ISSN 1366-5545.

39. Ghaemi S. A., Hadji Hosseinlou M. Modeling the Urban Freight-Transportation System Using the System Dynamics Approach // *Systems*. 2023. 11(8). 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080409>.
40. Chow J. Y. J., Yang C. H., Regan A. C. State-of-the art of freight forecast modeling: lessons learned and the road ahead // *Transportation*. 2010. 37. P. 1011–1030. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-010-9281-1>.
41. Liedtke G. T., Tavasszy L. A., Wisetjindawat W. A Comparative Analysis of Behavior Oriented Commodity Transport Models. Paper presented at the Transportation Research Board 88th Annual Meeting. 2009.
42. Zeigler B. P., Praehofer H., Kim T. G. Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 2000. 510 p.
43. Kim T., Ham H., Boyce D. Economic impacts of transportation network changes: Implementation of a combined transportation network and input-output model // *Papers in Regional Science*. 2002. 81. P. 223–246. DOI: <https://doi.org/10.1007/s101100100101>.
44. Pompiga A., Mauro R. Input/Output models for freight transport demand: A macro approach to traffic analysis for a freight corridor // *Archives of Transport*. 2020. 54(2). P. 21–42. DOI: 10.5604/01.3001.0014.2729.
45. Miller R. E., Blair P. D. Input-Output Analysis: Foundations and Extensions. 2nd ed. // Cambridge University Press, 2009. 750 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626982>. ISBN 9780511626982.
46. JASPERS Appraisal Guidance (Transport): The Use of Transport Models in Transport Planning and Project Appraisal. Luxembourg: JASPERS, 2014. 54 p.
47. Fangyuan M. High-Speed Railway Freight Demand Forecasting Based on Gravity-Logit Model // *In Proceedings of the 2025 3rd International Conference on Mathematics and Machine Learning (ICMML '25)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2026. P. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1145/3783779.3783799>.

48. Duanmu J., Foytik P., Khattak A., Robinson R. M. Distribution Analysis of Freight Transportation with Gravity Model and Genetic Algorithm // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012. 2269(1). P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3141/2269-01>.
49. Abdullah A., Zamzuri Z. H., Miswan N. H. An application of gravity models to freight data in Malaysia // *Journal of Transport and Supply Chain Managemen*. 2024. 18(0). a1052. DOI: <https://doi.org/10.4102/jtscm.v18i0.1052>.
50. Shepherd B., Doytchinova H. S., Kravchenko A. The gravity model of international trade: a user guide [R version]. Bangkok: United Nations ESCAP. 2019. Available at: <https://www.unescap.org/resources/gravity-model-international-trade-user-guide-r-version>.
51. Cascetta E. Transportation Systems Analysis: Models and Applications / [2nd Ed.]. New York: Springer, 2009. 742 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75857-2>.
52. Пашкевич, С. М. Дослідження впливу розташування міжміської автостанції на розподіл міських пасажиропотоків : дис. ... доктора філософії : 275. Харків, 2024. 222 с.
53. Primerano F., Taylor M. A. P., Pitaksringkarn L., Tisato P. Defining and understanding trip chaining behaviour // *Transportation*. 2008. 35. P. 55–72. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-007-9134-8>.
54. Li L., Cao M., Yin J, Wang Y., Mishra S. Observing the Characteristics of Multi-Activity Trip Chain and Its Influencing Mechanism // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020. 24. P. 3447–3460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1927-8>.
55. Esztergár-Kiss D. Trip Chaining Model with Classification and Optimization Parameters // *Sustainability*. 2020. 12(16). 6422. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166422>.
56. Bowman J. L. Historical development of activity-based models: theory and practice // *Traffic Engineering and Control*. 2009. 50. P. 314–318.
57. Bowman J. L., Ben-Akiva M. E. Activity-based disaggregate travel

demand model system with activity schedules // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2001. 35(1). P. 1–28. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00043-9).

58. Manheim M. L. Practical Implications of Some Fundamental Properties of Travel-Demand Models // *Highway Research Record*. 1973. 422. P. 21–38. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1973/422/422-003.pdf>.

59. Roberts F. S. Weighted di-graph models for the assessment of energy use and air pollution in transportation systems // *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1975. 7(6). P. 703–724. DOI: <https://doi.org/10.1068/a070703>.

60. Khan A., Willumsen L. G. Modelling car ownership and use in developing countries // *Traffic Engineering and Control*. 1986. 27. P. 554–560.

61. Smeed R. J. Traffic studies and urban congestion // *Journal of Transport Economics and Policy*. 1968. 2(1). P. 33–70. URL: https://jtep.org/wp-content/uploads/2021/02/Volume_11_No_1_33-70-1.pdf.

62. Wardrop J. G. Journey speed and flow in central urban areas // *Traffic Engineering and Control*. 1968. 9(11). P. 528–532.

63. Sosslau A. B., Hassam A., Carter M., Wickstrom G. Quick response urban travel estimation techniques and transferable parameters. User's Guide : NCHRP Report 187. Washington: Transportation Research Board, 1978. 229 p. URL: https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_187.pdf.

64. Variable Demand Modelling : TAG unit M2.1. London: Department for Transport, 2020. 83 p. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/938855/tag-m2-1-variable-demand-modelling.pdf

65. Daly A., Fox J., Tuinenga J. G. Pivot-Point Procedures in Practical Travel Demand Forecasting. *ERSA: Conference Papers*, Louvain-la-Neuve, 2005. Louvain-la-Neuve: European Regional Science Association, Paper ersa05p784. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/7046092.pdf>.

66. Горбачов, П. Ф. Концепція формування систем маршрутного пасажирського транспорту в містах : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.01.

Харків, 2009. 370 с.

67. PTV Visum 2023 Manual. Karlsruhe: PTV Planung Transport Verkehr GmbH, 2022. 2773 p.

68. Любий, Є. В. Визначення попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 22 с.

69. Гончаренко, С. Ю. Визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в середніх містах : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2015. 182 с.

70. Россолов, О. В. Удосконалення інтервальної концепції визначення попиту на послуги пасажирського маршрутного транспорту в великих містах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2012. 21 с.

71. Горбачов П. Ф., Свічинський С. В. Інтервальне моделювання потреб населення міст у перевезеннях громадським транспортом на основі функції розселення : монографія. Харків: ХНАДУ, 2016. 148 с.

72. Акбар Джан Полад. Закономірності функціонування системи міського пасажирського транспорту міста Кабул : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Харків, 2017. 189 с.

73. Білоус А. Б., Демчук І. А. Analysis methods and models of calculation of passenger correspondence // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 3(3(69)). С. 53–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.24545>.

74. Dragu V., Roman Eu. A. The Origin–Destination Matrix Development // *MATEC Web of Conferences. 9th International Conference on Manufacturing Science and Education – MSE 2019 “Trends in New Industrial Revolution”*. 2019. 290. 06010. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929006010>.

75. Любий Є. В., Колій О. С. Оцінка точності синтетичних моделей розрахунку пасажирських кореспонденцій на прикладі малих міст // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2019. 1(12). С. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.40>.

76. Любий Є. В., Россолов О. В. Формування моделі попиту на пересування населення малих міст маршрутним пасажирським транспортом // *Комунальне господарство міст*. 2013. 107. С. 422–426.
77. Fratar T. J. Vehicular Trip Distribution by Successive Approximation // *Traffic Quarterly*. 1954. 8. P. 53–65.
78. Carrothers G. A. P. An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // *Journal of the American Institute of Planners*. 1956. 22. P. 94–102.
79. Voorhees A. M. A general theory of traffic movement. Institute of Traffic Engineers Past Presidents' Award Paper. New Haven : ITE, 1955. P. 46–56.
80. Wilson A. G. A statistical theory of spatial distribution models // *Transportation Research*. 1967. 1. P. 253–270.
81. Wilson A. G. A family of spatial interaction models and associated developments // *Environment and Planning A: Economy and Space*. 1971. 3. P. 255–282.
82. Vries J. J., Nijkamp P., Rietveld P. Alonso's General Theory of Movement: Advances in Spatial Interaction Modeling. Free University of Amsterdam, Department of Spatial Economics, Tinbergen Institute Discussion Paper. 2000. TI 2000-062/3.
83. Haynes E. K., Fotheringham A. S. Gravity and Spatial Interaction models. Sage-Publications, 1984. P. 9–13.
84. Transport Planning and Traffic Engineering / [M. G. H. Bell, P. W. Bonsall, G. R. Leake, A. D. May, C. A. Nash, C. A. O'Flaherty] ; C. A. O'Flaherty ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 544 p.
85. Вдовиченко, В. О. Ефективність функціонування міської пасажирської транспортної системи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Київ, 2004. 19 с.
86. Кузькін О. Ф. Моделювання пасажирських кореспонденцій у системах міського маршрутного транспорту загального користування // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2009. 5. С. 79–82.

87. Горбачов П. Ф. Оцінка впливу транспортних факторів на результати вибору людиною робочого місця // *Вісник ХНАДУ*. 2008. 43. С. 86–91.
88. Lohse D., Teichert H., Dugge B., Bachner G. Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung). Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, H. 5/1997, Fakultät Verkehrswissenschaften, “Friedrich List”, TUD, 1997. URL: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/typ/Downloads/Heft-5.pdf.
89. Wilson A. G. Entropy in Urban and Regional Modelling. London: Pion, 1970. 166 p.
90. Quarmby D. A. Choice of Travel Mode for the Journey to Work // *Journal of Transport Economics and Policy*. 1967. 1(3). P. 273–314.
91. Горбачов П. Ф., Свічинська О. В. Моделювання вибору шляху пересування пасажирів у міських системах громадського транспорту : монографія. Харків: ХНАДУ, 2016. 124 с.
92. Preston J. Demand Forecasting for New Local Rail Stations and Services // *Journal of Transport Economics and Policy*. 1991. 25(2). P. 183–202.
93. Півторак, Г. В. Визначення параметрів мережі міських пасажирських перевезень на основі моделей теорії корисності з випадковим вибором : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Львів, 2021. 202 с.
94. Sustainable Approaches to Urban Transport. Edited by D. Mohan, G. Tiwari. Boca Raton: CRC Press, 2019. 329 p.
95. Manheim M. L. Fundamentals of Transportation Systems Analysis. Cambridge: MIT Press, 1979. 674 p.
96. Горбачов П. Ф. Нова концепція моделювання потреб населення у трудових пересуваннях міським пасажирським транспортом // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2009. 27. С. 210–214.

97. 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.

98. Проведення аналізу та оптимізації транспортних систем міста Краматорськ: звіт про НДР (кінцевий). ХНАДУ, № державної реєстрації 0116U006995. Харків, 2016. 220 с.

99. Розробка комплексної схеми руху транспорту м. Луцька: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № державної реєстрації 0117U006848. Харків, 2018. 309 с.

100. Розробка схеми руху громадського транспорту в місті Суми: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0108U006961. Харків, 2008. 51 с.

101. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі міста Кіровоград: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0112U00692. Харків, 2012. 115 с.

102. Розробка раціонального варіанту маршрутної мережі м. Олександрія : звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0113U005179. Харків, 2013. 130 с.

103. Моделювання та аналіз маршрутної мережі громадського транспорту міста Нікополя: звіт про НДР (заключний). ХНАДУ, № держ. реєстрації 0115U004775. Харків, 2015. 197 с.

104. Berbey A. A., Caballero G. R., de Dios S. B., Galán L. R. A fuzzy logic inference approach for the estimation of the passengers flow demand // *International Conference on Fuzzy Computation and 2nd International Conference on Neural Computation*. 2010. P. 125–129.

105. Kalis M., Teodorovic D. Trip distribution modeling using fussy logic and a genetic algorithm // *Transportation Planning and Technology*. 2003. 26(3). P. 213–238.

106. Kalić M., Kuljanin J., Dožić S. Air Travel Demand Fuzzy Modelling. Trip Generation and Trip Distribution // *Online Conference on Soft Computing in Industria Applications Anywhere on Earth*. 2012. P. 10–21.
107. Jassbi J., Makvandi P., Ataei M., Sousa Pedro A.S. Soft system modeling in transportation planning: Modeling trip flows based on the fuzzy inference system approach // *African Journal of Business Management*. 2011. 5(2). P. 505–514.
108. Medina J., Yepes V. Optimization of touristic distribution networks using genetic algorithms // *SORT*. 2003. 27(1). P. 95–112.
109. Goel S., Singh J., Ashok K. Trip Distribution Model for Delhy Urban Area Using Genetic Algorithm // *International Journal of Computer Engineering Science*. 2012. 2(3). P. 125–131.
110. Kompil M., Celik H. Modelling trip distribution with fuzzy and genetic fuzzy systems // *Transportation Planning and Technology*. 2013. 36(2). P. 170–200.
111. Форнальчик Є. Ю., Білоус А. Б., Демчук І. А. Застосування нечіткої логіки та генетичних алгоритмів у моделях пасажирських пересувань // *Автомобільний транспорт*. 2014. 35. С. 122–127.
112. Пархоменко Л. О., Лавренюк В. О. Розроблення нечіткої моделі прогнозування кореспонденцій пасажирів у швидкісному русі на основі принципів просторової взаємодії // *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. 164. С. 15–22.
113. Кара, І. А. Визначення пасажиропотоків на міських маршрутах з використанням нечіткої логіки та транзакцій абонементів стільникового зв'язку : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.01. Львів, 2017. 208 с.
114. Sbaï A., Van Zuylen H. J., Li J., Zheng F. F., Ghadi F. Estimation of an urban OD matrix using different information sources // *In Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017 - 17th International Conference, 2017* (Vol. 10405, pp. 183-198). (Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics); Vol. 10405). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62395-5_14.

115. Fan W., Chen Zh. Estimation of origin-destination matrix and identification of user activities using public transit smart card data (Final Report). Center for Advanced Multimodal Mobility Solutions and Education. University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC. 2018. 92 p.

116. Івахнік В. С. Новий метод реалізації інтервальної концепції моделювання транспортного попиту // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. 6. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-165-6-57-64>.

117. Heumann C., Schomaker M., Shalabh. Introduction to Statistics and Data Analysis: With Exercises, Solutions and Applications in R. Springer. 2023, 584 p.

118. Forbes C., Evans M., Hastings N., Peacock B. Statistical Distributions Fourth edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 212 p.

119. Horbachov P., Vũ Đức Minh, Svichynskyi S., Shtanko I. The Changes in Vehicle Speed Distribution Related to Complicated Traffic Conditions in Cities // *Transport, Ecology – Sustainable Development: Proceedings of the technical and scientific conference ECO Varna (Varna, 13–15 May 2021)*. Varna, 2021. P. 34–43.

120. Comenetz M. Calculus: The Elements. World Scientific, 2002. 159 p. ISBN 978-981-02-4904-5

121. Duistermaat J. J., Kolk J. A. C. Distributions Theory and Applications. Springer, 2010. 445 p.

122. Керівництво STATISTICA. StatSoft. Tulsa, 2012. 354 с.

123. Gibbons J. D., Chakraborti S. Nonparametric Statistical Inference : Fourth Edition, Revised and Expanded. New York: Marcel Dekker, 2003. 672 p.

124. Horbachov P., Svichynskyi S. Theoretical Substantiation of Trip Length Distribution for Home-Based Work Trips in Urban Transit Systems // *The Journal of Transport and Land Use*. 2018. 11(1). P. 593–632. DOI: <http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2018.916>.

125. Horbachov P., Makarichev O., Svichynskyi S., Ivanov I. Framework for designing sample travel surveys for transport demand modelling in cities //

Transportation. 2022. 49(1). P. 115–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10168-6>.

126. D’Agostino R. B. An omnibus test of normality for moderate and large sample size // *Biometrika*. 1971. 58(2). P. 341–348.

127. D’Agostino R. B., Stephens M. A. Goodness-of-Fit Techniques. Marcel Dekker, New York, 1986. 589 p. ISBN: 0-8247-8705-6.

128. Meeker W., Hahn G., Escobar L. Statistical Intervals: A Guide for Practitioners and Researchers. 2nd Edition. Wiley, 2017. 631 p. (Wiley Series in Probability and Statistics). ISBN: 978-0-471-68717-7.

129. Miah A. Q. Applied Statistics for Social and Management Sciences. Springer, 2016. 446 p. ISBN: 9811003998, 9789811003998.

130. Kleinbaum D. G., Kupper L. L., Nizam A., Rosenberg E. S. Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods. New York: Cengage Learning, 2013. 1074 p.

131. Chen X., Jasin S., Shi C. The Elements of Joint Learning and Optimization in Operations Management. Cham: Springer, 2022. 444 p.

132. King B. M., Rosopa P. J., Minium E. W. Statistical Reasoning in the Behavioural Sciences. J. Wiley & Sons, Inc., 2010. 496 p. ISBN 978-0-470-64382-2.

133. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiment. 5th Edition. John Wiley & Sons, 2001. 684 p. ISBN 0471316490.

134. Smith M. E. Design of Small Sample Home Interview Travel Surveys // *Journal of the Transport Research Board*. 1979. 1972. P. 29–35.

135. Bolbol A., Cheng T., Tsapakis I., Chow A. Sample Size Calculation for Studying Transportation Modes from GPS Data // *Social and Behavioral Sciences*. 2012. 48. P. 3040-3050. ISSN 1877-0428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1271>.

136. Barton–Aschman Associates, Inc. (n.d.). *St. Louis Region Small Sample Travel Survey*. East–West Gateway Coordinating Council. Report No. EWG–0538. 1991. 171 p.

137. National Renewable Energy Laboratory. (n.d.). *2002 St. Louis Household Travel Survey* (Dataset ds85). Livewire Data Platform. URL: <https://livewire.energy.gov/ds/tsdc/ds85>.

138. About OpenSolver. OpenSolver for Excel : веб-сайт компанії. URL: <https://opensolver.org/> (дата звернення 21.11.2025 р.).

ДОДАТОК А
ЛИСТИНГ ПРОГРАМНОГО КОДУ ПРОГРАМИ ПОЕТАПНОЇ
ГАРАНТОВАНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ВИПАДКОВИХ МПК

Public maxNr As Byte
Public Nd As Long
Public Na As Long
Public Ns As Long
Public Ng As Long
Public Hmax As Long
Public Pmin As Long
Public Smin As Long
Dim Sum_O As Long
Dim Sum_P As Long
Dim Sum_S As Long
Public N_full As Long
Public H() As Integer
Public P() As Long
Public S() As Byte
Public H_full() As Long
Public HO() As Long
Public HP() As Long
Public HS() As Long
Public PO() As Long
Public PP() As Long
Public PS() As Long
Public HO_tmp() As Long
Public HP_tmp() As Long
Public HS_tmp() As Long
Public N As Long

```

Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim Count_free As Long
Dim Count_forced As Long
Dim GenBool As Boolean
Dim ForceBool As Boolean

```

```
Sub Generate()
```

```

    Dim k As Integer
    Dim l As Integer
    Count_free = 0
    Count_forced = 0
    Worksheets("Limitations").Cells(11, 14) = Count_free
    Worksheets("Limitations").Cells(12, 14) = Count_forced
    Worksheets("Matrix").Activate
    Range("A1:IV1000").Select
    Selection.ClearContents

    Nd = Worksheets("Limitations").Cells(1, 6)
    Na = Worksheets("Limitations").Cells(1, 8)
    If Nd > Na Then
        maxNr = Nd
    Else
        maxNr = Na
    End If

    ReDim H(1 To maxNr, 1 To maxNr) As Integer
    ReDim P(1 To maxNr, 1 To maxNr) As Long
    ReDim S(1 To maxNr, 1 To maxNr) As Byte
    ReDim H_full(1 To 2, 1 To maxNr ^ 2) As Long
    ReDim HO(1 To maxNr) As Long
    ReDim HP(1 To maxNr) As Long

```

```

ReDim HS(1 To maxNr) As Long
ReDim PO(1 To maxNr) As Long
ReDim PP(1 To maxNr) As Long
ReDim PS(1 To maxNr) As Long
ReDim HO_tmp(1 To maxNr) As Long
ReDim HP_tmp(1 To maxNr) As Long
ReDim HS_tmp(1 To maxNr) As Long
Ns = Worksheets("Limitations").Cells(1, 10)
Hmax = Worksheets("Limitations").Cells(2, 14)
Pmin = Worksheets("Limitations").Cells(3, 14)
GenBool = Worksheets("Limitations").Cells(4, 14)
ForceBool = Worksheets("Limitations").Cells(5, 14)
Smin = Worksheets("Limitations").Cells(6, 14)

For i = 1 To Nd
  For j = 1 To Na
    H(i, j) = 0
  Next j
Next i

Sum_O = 0
For i = 1 To Nd
  HO(i) = Worksheets("Limitations").Cells(i + 1, 1)
  HO_tmp(i) = 0
  Sum_O = Sum_O + HO(i)
  Worksheets("Matrix").Cells(i, Na + 1) = HO(i)
Next i

Sum_P = 0
For i = 1 To Na
  HP(i) = Worksheets("Limitations").Cells(i + 1, 2)
  HP_tmp(i) = 0
  Sum_P = Sum_P + HP(i)

```

```

Worksheets("Matrix").Cells(Nd + 1, i) = HP(i)
Next i
If Sum_O <> Sum_P Then
    Worksheets("Matrix").Cells(1, 1) = "The capacities of the transport areas are not
balanced"
    Range("A1").Select
    End
Else: Ng = Sum_P
End If
If Ns > 0 Then
    Sum_S = 0
    For k = 1 To Ns
        HS(k) = Worksheets("Limitations").Cells(k + 1, 3)
        HS_tmp(k) = 0
        PS(k) = 0
        Sum_S = Sum_S + HS(k)
    Next k
    If Sum_S <> Ng Then
        Worksheets("Matrix").Cells(1, 1) = "The supplemental restrictions does not
match the number of trips"
        Range("A1").Select
        End
    End If
Else
    For k = 1 To Na
        HS(k) = Ng
        HS_tmp(k) = 0
        PS(k) = 0
    Next k
End If

```

```

For i = 1 To Nd
  For j = 1 To Na
    S(i, j) = Worksheets("Supplemental").Cells(i, j)
    If S(i, j) <= Ns And S(i, j) > 0 Then
      P(i, j) = Min(Min(Worksheets("Potentials").Cells(i, j), HS(S(i, j))), Min(HO(i),
HP(j)))
    Else
      Worksheets("Matrix").Cells(1, 1) = "The array of the supplemental restriction
contains incorrect data"
      Range("A1").Select
    End
  End If
Next j
Next i
For i = 1 To Nd
  PO(i) = 0
  For j = 1 To Na
    PO(i) = PO(i) + P(i, j)
  Next j
Next i
For j = 1 To Na
  PP(j) = 0
  For i = 1 To Nd
    PP(j) = PP(j) + P(i, j)
  Next i
Next j
For i = 1 To Nd
  For j = 1 To Na
    k = S(i, j)
    PS(k) = PS(k) + P(i, j)
  
```

```

Next j
Next i
N = 0
N_full = 0
For i = 1 To Nd
  For j = 1 To Na
    If P(i, j) > 0 Then
      N_full = N_full + 1
      H_full(1, N_full) = i
      H_full(2, N_full) = j
      N = N + P(i, j)
    End If
  Next j
Next i
If N_full < Min(Na, Nd) Or N < Ng Then
  Worksheets("Matrix").Cells(1, 1) = "The restriction system is not compatible"
  Range("A1").Select
End
End If
Randomize
Do
  N = RandomValue(N_full)
  i = H_full(1, N)
  j = H_full(2, N)
  Count_free = Count_free + 1
  Worksheets("Limitations").Cells(11, 14) = Count_free
Assignment
If ForceBool Then
  For k = 1 To Ns
    If PS(k) < HS(k) * Pmin Then

```

```

For l = 1 To N_full
  i = H_full(1, l)
  j = H_full(2, l)
  If S(i, j) = k Then
    Count_forced = Count_forced + 1
    Worksheets("Limitations").Cells(12, 14) = Count_forced
    Assignment
  End If
Next l
End If
Next k
N = RandomValue(Nd)
For i = N To Nd
  If PO(i) < HO(i) * Smin Then
    For j = 1 To Na
      If P(i, j) > 0 Then
        Count_forced = Count_forced + 1
        Worksheets("Limitations").Cells(12, 14) = Count_forced
        Assignment
      End If
    Next j
  End If
Next i
For i = 1 To N
  If PO(i) < HO(i) * Pmin Then
    For j = 1 To Na
      If P(i, j) > 0 Then
        Count_forced = Count_forced + 1
        Worksheets("Limitations").Cells(12, 14) = Count_forced
        Assignment
      End If
    Next j
  End If
Next i

```

```

    End If
  Next j
End If
Next i
N = RandomValue(Na)
For j = N To Na
  If PP(j) < HP(j) * Pmin Then
    For i = 1 To Nd
      If P(i, j) > 0 Then
        Count_forced = Count_forced + 1
        Worksheets("Limitations").Cells(12, 14) = Count_forced
        Assignment
      End If
    Next i
  End If
Next j
For j = 1 To N - 1
  If PP(j) < HP(j) * Pmin Then
    For i = 1 To Nd
      If P(i, j) > 0 Then
        Count_forced = Count_forced + 1
        Worksheets("Limitations").Cells(12, 14) = Count_forced
        Assignment
      End If
    Next i
  End If
Next j
End If
Loop Until Ng = 0
Range("A1").Select

```

End Sub

Sub Assignment()

Dim k As Integer

Dim l As Integer

Dim N As Long

N = Min(P(i, j), Hmax)

If GenBool And (N > 0) Then N = RandomValue(N)

If N > 0 Then

H(i, j) = H(i, j) + N

Worksheets("Matrix").Cells(i, j) = H(i, j)

HO(i) = HO(i) - N

HO_tmp(i) = HO_tmp(i) + N

Worksheets("Matrix").Cells(i, Nd + 2) = HO_tmp(i)

HP(j) = HP(j) - N

HP_tmp(j) = HP_tmp(j) + N

Worksheets("Matrix").Cells(Nd + 2, j) = HP_tmp(j)

HS(S(i, j)) = HS(S(i, j)) - N

HS_tmp(S(i, j)) = HS_tmp(S(i, j)) + N

Worksheets("Limitations").Cells(S(i, j) + 1, 4) = HS_tmp(S(i, j))

Ng = Ng - N

For k = 1 To Nd

PO(k) = 0

Next k

For l = 1 To Na

PP(l) = 0

Next l

For k = 1 To Ns

PS(k) = 0

Next k

For k = 1 To Nd

```

For l = 1 To Na
    P(k, l) = Min(Min(P(k, l), HS(S(k, l))), Min(HO(k), HP(l)))
    PO(k) = PO(k) + P(k, l)
    PP(l) = PP(l) + P(k, l)
    PS(S(k, l)) = PS(S(k, l)) + P(k, l)
Next l
Next k
N_full = 0
For k = 1 To Nd
    For l = 1 To Na
        If P(k, l) > 0 Then
            N_full = N_full + 1
            H_full(1, N_full) = k
            H_full(2, N_full) = l
        End If
    Next l
Next k
If N_full = 0 Then
    If Ng > 0 Then Worksheets("Matrix").Cells(1, 1) = "Couldnt fill in the matrix"
    Range("A1").Select
End
End If
End If
End Sub

Public Function Min(I1 As Long, I2 As Long) As Long
    Min = I1
    If I1 > I2 Then Min = I2
End Function

Public Function RandomValue(I1 As Long) As Long
Dim N As Integer

```

$N = \text{Round}(\text{Rnd} * (I1 - 1)) + 1$

If $N = 0$ Then $N = 1$

RandomValue = N

End Function

ДОДАТОК Б

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ ВИМОГИ, ЩО НАКЛАДАЄТЬСЯ НА

ДОДАТКОВІ ОБМЕЖЕННЯ ЗГЕНЕРОВАНИХ МПК

Таблиця Б.1 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (218608 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 23

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	518	1	56827	0,91
2	75	2	123401	0,06
3	276	1	56827	0,49
4	0	-	-	0,00
5	20	2	123401	≈0,00
6	0	-	-	0,00
7	335	1	56827	0,59
8	144	1	56827	0,25
9	555	1	56827	0,97
10	0	-	-	0,00

Таблиця Б.2 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (109304 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 24

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	338	1	56827	0,59
2	13	1	56827	0,02
3	913	2	123401	0,74
4	1106	2	123401	0,90
5	175	1	56827	0,31
6	451	1	56827	0,79
7	124	2	123401	0,10
8	827	2	123401	0,67
9	0	-	-	0,00
10	174	1	56827	0,31

Таблиця Б.3 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (54652 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 24

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	49	2	123401	0,04
2	205	2	123401	0,17
3	104	2	123401	0,08
4	0	-	-	0,00
5	0	-	-	0,00
6	561	1	56827	0,98
7	484	1	56827	0,85
8	256	1	56827	0,45
9	388	1	56827	0,68
10	721	2	123401	0,58

Таблиця Б.4 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (27326 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 25

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	319	2	123401	0,26
2	200	2	123401	0,16
3	521	2	123401	0,42
4	139	1	56827	0,24
5	228	1	56827	0,40
6	18	2	123401	0,01
7	629	2	123401	0,51
8	228	1	56827	0,40
9	20	2	123401	0,01
10	132	1	56827	0,23

Таблиця Б.5 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (13663 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 25

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	16	2	123401	0,01
2	408	1	56827	0,42
3	782	2	123401	0,63
4	314	3	113919	0,28
5	258	1	56827	0,45
6	94	2	123401	0,08
7	15	1	56827	0,03
8	1073	2	123401	0,87
9	60	2	123401	0,05
10	4	1	56827	≈0,00

Таблиця Б.6 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (6832 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 26

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	5	2	123401	≈0,00
2	656	2	123401	0,53
3	563	1	56827	0,99
4	376	1	56827	0,66
5	580	2	123401	0,47
6	70	2	123401	0,06
7	329	2	123401	0,27
8	391	2	123401	0,32
9	0	-	-	0,00
10	0	-	-	0,00

Таблиця Б.7 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (3416 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 26

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	0	-	-	0,00
2	0	-	-	0,00
3	526	1	56827	0,93
4	673	2	123401	0,54
5	639	2	123401	0,52
6	373	1	56827	0,66
7	513	4	89238	0,57
8	51	1	56827	0,09
9	271	1	56827	0,48
10	130	2	123401	0,11

Таблиця Б.8 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (1708 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 27

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	227	2	123401	0,18
2	0	-	-	0,00
3	41	1	56827	0,07
4	121	1	56827	0,21
5	124	1	56827	0,21
6	267	1	56827	0,47
7	0	-	-	0,00
8	299	2	123401	0,24
9	1006	2	123401	0,82
10	279	1	56827	0,49

Таблиця Б.9 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (854 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 26

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	203	2	123401	0,16
2	384	1	56827	0,68
3	451	2	123401	0,37
4	11	2	123401	≈0,00
5	0	-	-	0,00
6	74	2	123401	0,06
7	322	2	123401	0,26
8	52	2	123401	0,04
9	346	1	56827	0,61
10	0	-	-	0,00

Таблиця Б.10 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (427 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 26

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	293	2	123401	0,24
2	0	-	-	0,00
3	132	2	123401	0,11
4	0	-	-	0,00
5	449	2	123401	0,36
6	0	-	-	0,00
7	11	2	123401	≈0,00
8	80	2	123401	0,06
9	158	1	56827	0,28
10	433	1	56827	0,76

Таблиця Б.11 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (214 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 26

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	0	-	-	0,00
2	290	1	56827	0,51
3	34	2	123401	0,03
4	80	2	123401	0,06
5	0	-	-	0,00
6	363	1	56827	0,64
7	191	1	56827	0,34
8	886	2	123401	0,72
9	529	1	56827	0,93
10	0	-	-	0,00

Таблиця Б.12 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (107 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 25

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	315	2	123401	0,26
2	0	-	-	0,00
3	568	1	56827	0,99
4	0	-	-	0,00
5	855	2	123401	0,69
6	35	2	123401	0,03
7	0	-	-	0,00
8	166	2	123401	0,13
9	687	2	123401	0,56
10	75	2	123401	0,06

Таблиця Б.13 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (54 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 25

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	0	-	-	0,00
2	0	-	-	0,00
3	593	2	123401	0,48
4	589	2	123401	0,48
5	29	2	123401	0,02
6	220	1	56827	0,39
7	347	2	123401	0,28
8	518	1	56827	0,91
9	0	-	-	0,00
10	110	2	123401	0,09

Таблиця Б.14 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (27 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 24

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	0	-	-	0,00
2	0	-	-	0,00
3	142	2	123401	0,12
4	445	2	123401	0,36
5	33	2	123401	0,03
6	67	1	56827	0,12
7	135	1	56827	0,24
8	562	1	56827	0,99
9	0	-	-	0,00
10	602	2	123401	0,49

Таблиця Б.15 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (14 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 23

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	7	1	56827	0,01
2	129	2	123401	0,10
3	113	2	123401	0,09
4	0	-	-	0,00
5	587	2	123401	0,48
6	250	2	123401	0,20
7	561	2	123401	0,45
8	150	2	123401	0,12
9	477	1	56827	0,84
10	440	2	123401	0,36

Таблиця Б.16 – Результати розрахунку відхилення обсягу нерозподілених у згенерованих МПК кореспонденцій до обсягу додаткового обмеження (кишені) для максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку (7 пас.) і мінімального значення потенціалів основного та додаткового обмежень, після якого вони починають виконуватися, на рівні 23

Номер генерації МПК	Обсяг нерозподілених кореспонденцій, пас.	Номер кишені з нерозподіленими кореспонденціями	Обсяг кореспонденцій у кишені, пас.	Відсоток нерозподілених кореспонденцій, %
1	612	2	123401	0,50
2	504	1	56827	0,89
3	631	2	123401	0,51
4	355	1	56827	0,62
5	270	2	123401	0,22
6	283	2	123401	0,23
7	558	1	56827	0,98
8	228	2	123401	0,18
9	0	-	-	0,00
10	97	1	56827	0,17

ДОДАТОК В

ВИХІДНА ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ ЗАКОНУ

РОЗПОДІЛУ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ У МАТРИЦЯХ, СФОРМОВАНИХ

ЗА БАЗОВИМ МЕТОДОМ ГЕНЕРАЦІЇ МПК

Таблиця В.1 – Сформовані вибірки для визначення виду закону розподілу величини кореспонденції за умов використання максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК різного розміру

№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
9	11	1	6	2	4	28	23	35	7	78	1	2	8	19	2
18	8	2	8	3	1	58	26	1	35	258	55	7	25	8	1
3	15	26	8	44	2	25	10	3	18	14	38	20	112	14	103
19	26	69	44	13	21	31	4	274	10	3	35	13	1	2	7
6	15	13	87	1	70	6	54	127	72	34	4	53	33	3	33
44	27	34	5	1	1	13	14	5	2	50	1	67	38	24	19
17	1	14	34	184	10	66	13	26	2	42	1	1	29	11	43
11	2	29	3	93	7	89	13	13	8	2	22	1	24	1	10
15	32	27	44	11	6	151	52	200	3	143	1	14	1	2	1
5	14	43	2	7	6	78	80	12	56	38	14	2	38	3	1
21	19	24	17	28	520	131	21	1	1	55	7	72	92	1	29
8	25	14	64	4	1	46	15	1	65	12	11	230	12	65	2
28	69	8	8	176	1	15	97	5	15	10	9	9	2	89	2
2	27	52	1	13	4	34	16	2	44	3	85	8	3	8	41
12	61	55	6	12	233	3	1	24	1	9	140	1	70	3	13
3	2	26	20	51	18	15	43	6	2	1	14	24	1	4	2
53	35	13	3	51	136	13	21	44	14	134	9	6	2	65	103
18	5	52	12	3	2	274	17	83	3	1	138	20	102	8	2
16	21	16	39	5	3	91	2	5	51	18	2	19	13	1	1
42	14	37	52	10	167	106	151	51	1	7	8	27	20	2	22
3	50	19	54	13	121	93	99	6	10	2	2	12	2	5	2
26	25	31	8	53	32	46	18	2	7	1	8	1	19	1	1
25	54	5	6	25	27	34	2	4	2	49	5	2	57	22	120
18	27	1	63	30	63	37	51	24	75	62	5	13	2	9	6
12	53	13	25	67	3	185	62	2	1	27	55	1	2	12	61
2	7	21	9	111	3	15	15	14	1	8	4	17	182	1	83
13	27	57	37	111	1	11	15	7	6	37	1	5	37	5	69
6	21	32	9	127	1	2	22	24	14	24	112	152	2	40	40
14	4	41	23	142	186	27	26	2	1	8	68	99	2	4	11
2	43	3	86	149	36	49	120	4	2	92	2	48	2	11	2
14	13	20	58	19	8	23	197	1	16	159	2	31	1	2	1
13	13	43	53	170	35	25	1	132	13	3	12	1	147	49	1
3	33	56	2	1	3	180	1	29	3	1	8	5	2	96	1
23	12	56	65	128	28	720	2	189	16	2	5	37	4	24	9
10	22	33	72	1	141	202	6	5	5	1	14	131	1	1	154

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	21	85	76	25	187	2	8	149	1	1	28	24	37	14	11
12	4	20	67	124	77	24	1	3	9	11	102	3	100	8	32
6	16	10	56	2	24	2	64	1	10	81	120	11	3	220	2
25	20	142	15	4	144	222	1	1	4	9	1	45	1	1	4
14	18	19	28	89	1	2	2	140	43	179	1	1	2	2	1
11	45	34	71	44	73	2	7	5	14	64	119	87	6	1	3
17	57	26	3	20	23	1	8	1	22	8	136	132	77	19	183
19	18	49	1	4	158	1	4	1	82	10	2	1	11	28	10
3	13	43	106	122	6	2	1	5	67	10	31	3	38	24	14
9	6	9	14	330	3	6	34	46	1	1	7	108	5	2	33
8	45	19	29	24	1	273	55	15	1	37	90	2	1	3	2
14	37	48	31	188	26	2	1	2	34	45	19	2	29	8	1
13	27	43	21	2	142	4	109	2	10	18	5	6	45	25	179
14	14	15	9	1	1	58	1	47	1	1	1	5	1	4	4
23	16	43	94	4	5	3	2	6	146	1	1	2	2	1	1
2	79	64	146	4	47	1	32	110	7	106	34	2	2	3	4
30	2	59	6	12	21	1	97	2	2	29	20	38	15	1	82
15	7	14	3	11	12	101	2	1	14	210	7	4	2	1	2
18	17	27	46	58	36	2	5	8	117	51	4	7	197	75	11
7	15	16	86	1	215	7	2	110	1	1	3	1	1	1	1
148	6	43	71	76	11	45	1	8	85	14	32	111	142	80	2
11	7	28	38	127	154	189	80	134	2	2	2	109	1	5	2
9	80	26	74	167	14	113	5	1	13	132	4	1	116	1	2
18	22	20	59	25	50	112	15	4	98	3	7	1	2	9	67
35	6	12	19	12	183	11	348	5	59	1	18	3	4	1	7
35	82	68	58	124	12	24	4	1	1	3	145	1	5	4	130
23	42	9	11	177	444	223	11	1	51	1	73	28	79	1	51
27	42	32	1	1	11	27	115	136	3	127	7	2	7	1	2
13	40	6	52	113	3	1	59	21	9	19	22	6	1	4	1
8	56	64	32	2	127	1	242	7	3	68	1	4	2	60	1
6	7	25	3	56	4	10	83	2	95	44	93	36	40	55	1
6	65	39	60	2	1	26	8	6	14	77	76	1	2	1	1
4	26	9	17	15	213	3	12	4	1	14	8	4	5	1	1
8	61	12	43	146	336	2	3	33	3	29	4	5	1	68	110
14	12	37	26	30	113	146	13	2	31	2	1	8	74	5	2
19	81	42	84	3	38	16	4	10	20	59	1	20	160	3	7
15	8	22	17	26	10	2	5	2	1	3	6	23	1	2	100
1	3	34	86	61	20	23	2	8	2	2	192	7	5	53	7
12	9	11	51	32	227	2	2	25	79	2	2	110	89	1	24
12	8	43	3	19	9	298	28	8	123	109	13	8	1	1	4
21	33	93	7	10	90	5	76	134	2	7	42	1	1	163	124
13	13	18	1	167	2	31	18	1	141	1	81	6	11	1	23
50	20	38	8	111	146	96	40	18	1	28	82	320	1	33	38
14	26	7	91	15	2	1	55	87	2	4	2	2	11	6	25
4	14	1	4	26	14	1	1	3	1	3	5	67	1	1	26
8	13	44	79	9	49	1	1	1	25	25	13	1	33	6	1
4	8	3	27	103	2	188	8	48	16	45	5	100	1	1	107
25	6	77	25	206	360	4	21	50	4	74	5	5	1	3	2

Закінчення таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
12	11	40	18	115	1	1	2	3	2	311	8	27	1	7	109
19	33	53	54	2	48	2	2	229	2	99	1	2	4	24	114
13	3	16	31	1	50	64	1	133	3	1	29	3	163	139	3
13	24	45	89	1	6	183	5	49	4	16	3	6	102	1	264
7	44	99	13	193	2	40	33	2	15	21	1	335	3	7	2
44	64	38	10	12	1	1	180	13	51	3	27	83	85	23	2
5	9	36	29	159	38	153	2	48	2	78	1	14	35	64	15
30	21	52	89	99	1	1	1	8	1	36	87	2	2	1	2
15	26	2	21	36	424	1	5	6	1	1	23	66	2	6	26
11	46	2	22	3	2	1	16	30	1	24	5	149	2	1	6
16	20	61	2	326	6	9	4	16	63	11	83	155	1	120	1
15	18	16	97	162	21	129	2	34	76	85	26	211	5	1	38
7	10	4	131	173	3	103	9	20	33	1	4	1	3	1	3
4	34	43	41	1	46	1	39	1	2	1	8	2	87	113	30
32	17	6	112	331	70	5	107	2	30	25	1	128	207	6	1
15	25	7	9	17	183	7	138	1	24	5	24	182	6	15	10
9	13	25	24	5	135	4	36	6	6	46	1	89	16	2	82

Примітка. У першому рядку таблиці цифри від 1 до 16 характеризують значення максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК розміром: 1 – 14 пас., 2 – 27 пас., 3 – 54 пас., 4 – 107 пас., 5 – пас., 6 – 427 пас., 7 – 854 пас., 8 – 1708 пас., 9 – 3416 пас., 10 – 6832 пас., 11 – 13663 пас., 12 – 27326 пас., 13 – 54652 пас., 14 – 109304 пас., 15 – 218608 пас., 16 – 437215 пас.

ДОДАТОК Г

РЕЗУЛЬТАТИ ПІДБОРУ ПОКАЗНИКОВОГО ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ПРИ ОПИСІ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ З МАТРИЦЬ, СФОРМОВАНИХ ЗА БАЗОВИМ МЕТОДОМ

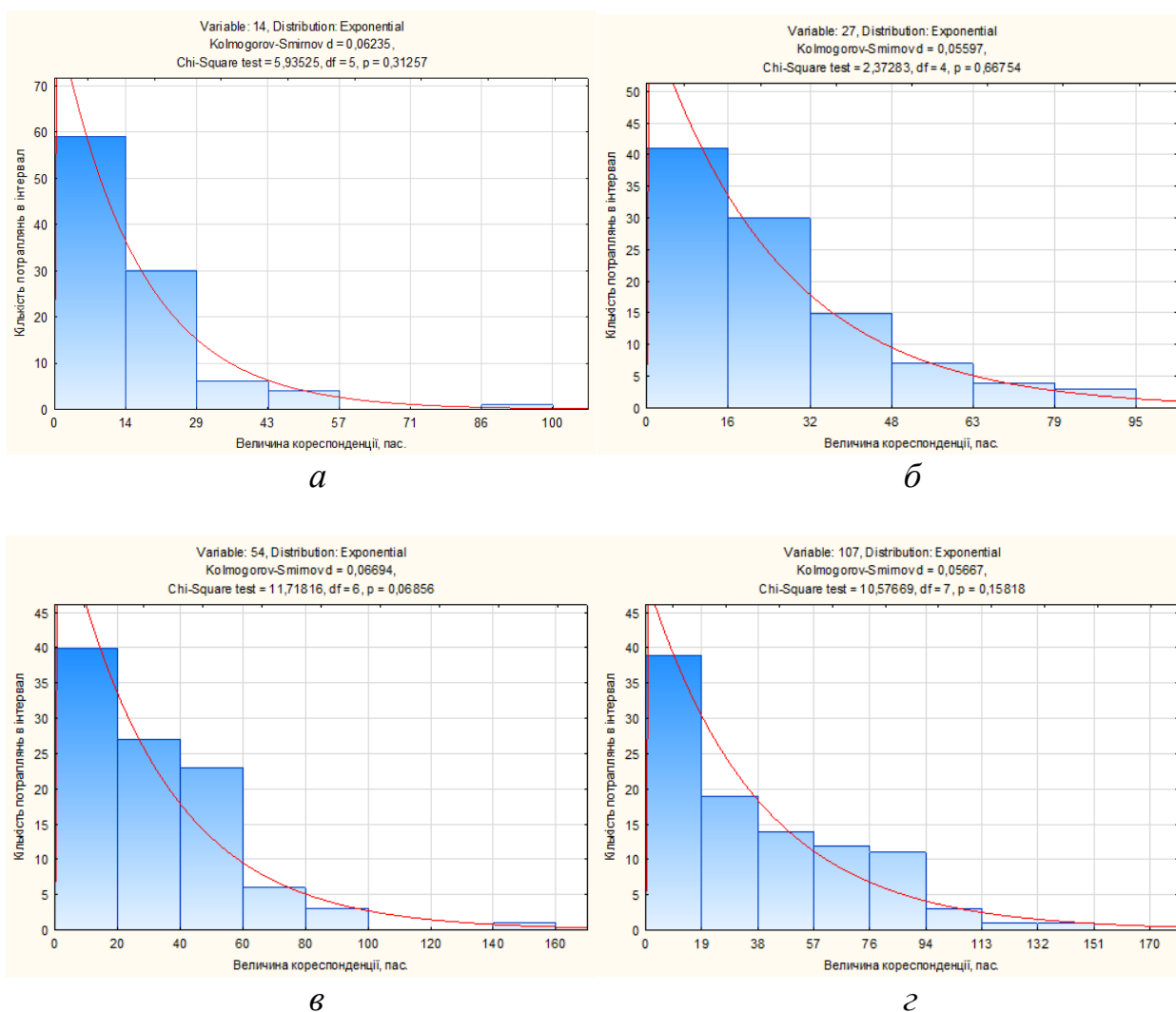


Рисунок Г.1 – Результати підбору показникового закону розподілу для опису величини кореспонденції у МК, що сформовані з використанням базового методу генерації МПК (значення керуючого параметру: *а* – 14 пас., *б* – 27 пас., *в* – 54 пас., *г* – 107 пас., *д* – 214 пас., *е* – 427 пас., *ж* – 1708 пас., *з* – 3416 пас., *и* – 6832 пас., *і* – 13663 пас., *к* – 27326 пас., *л* – 54652 пас., *м* – 109304 пас., *н* – 218608 пас., *п* – 437215 пас.)

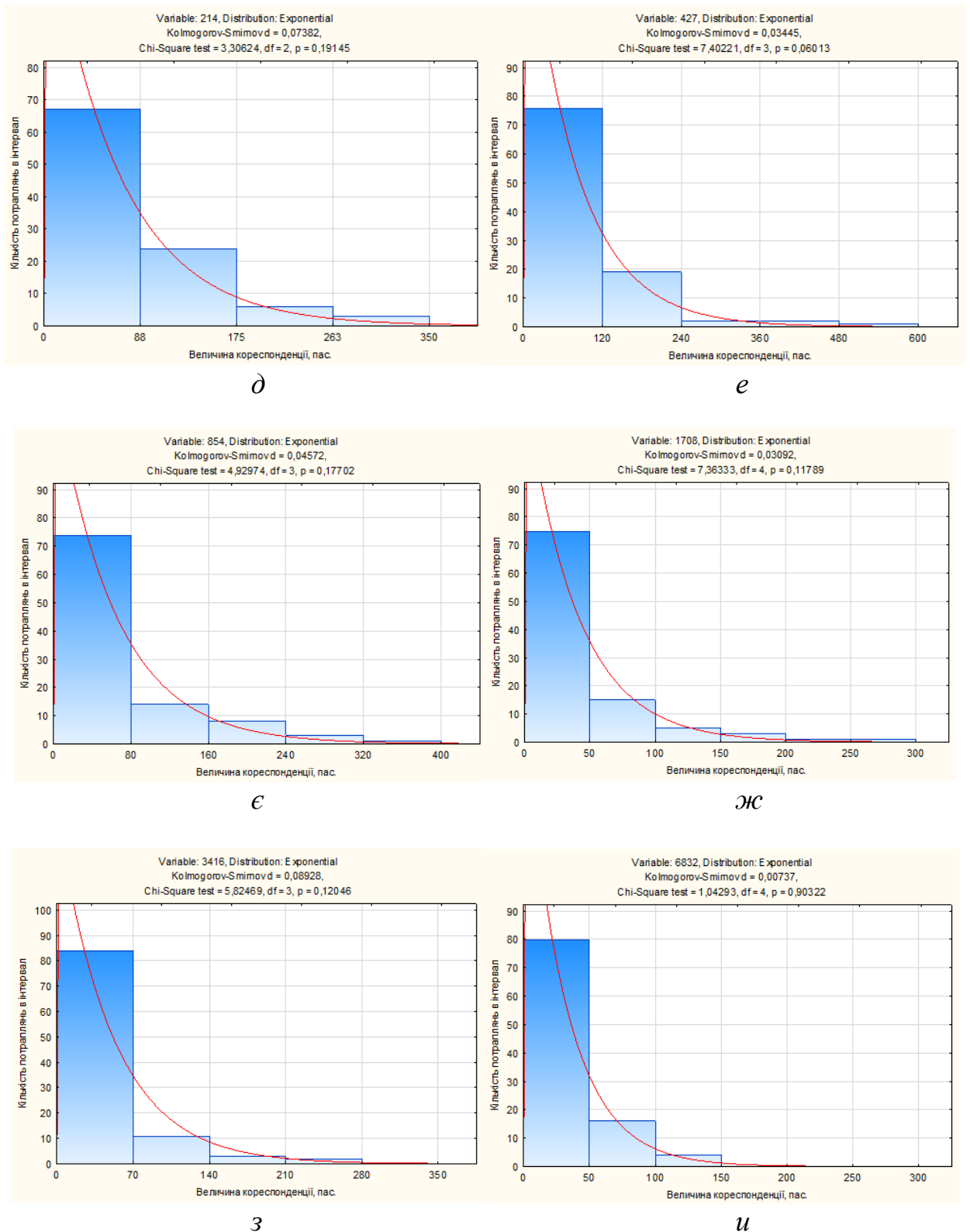


Рисунок Г.1, аркуш 2

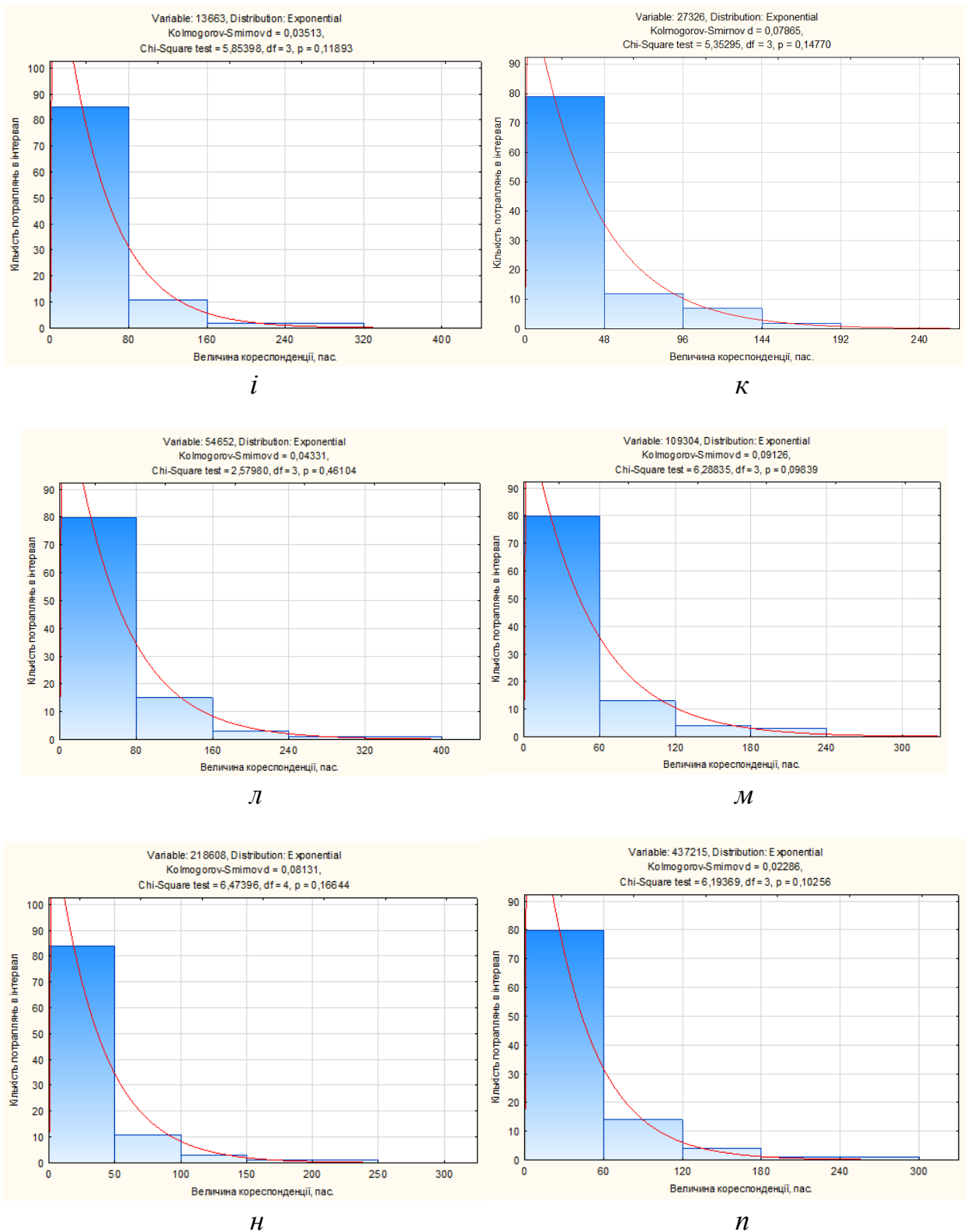


Рисунок Г.1, аркуш 3

ДОДАТОК Д

ВИХІДНА ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ ЗАКОНУ

РОЗПОДІЛУ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ У МАТРИЦЯХ, СФОРМОВАНИХ З

ВИКОРИСТАННЯМ ПОЕТАПНОГО МЕТОДУ

Таблиця Д.1 – Сформовані вибірки для визначення виду ЗР величини кореспонденції
за умов використання максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується
при кожному потраплянні в комірку МК різного розміру

№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16	№17
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
9	5	45	348	65	7	175	4	433	103	30	3	84	4	6	12	17
914	1429	6	44	44	1631	24	329	33	806	405	2	43	2	10	22	2
497	393	447	114	192	53	610	1	382	206	63	80	12	26	26	3	12
3	71	278	92	68	981	180	816	67	45	4	76	20	7	22	2	24
525	266	128	128	469	642	389	43	36	548	3	2	40	7	13	7	7
231	953	45	291	70	19	1	57	78	4	95	33	70	53	9	1	12
17	476	266	1373	6	412	229	43	364	15	114	96	31	21	26	16	5
376	136	283	1498	652	293	526	563	85	229	54	213	2	49	17	12	1
105	58	19	190	641	101	23	59	428	384	165	40	92	20	2	4	5
12	785	40	48	143	741	174	33	396	18	262	18	25	69	23	9	10
648	66	5	183	326	252	274	547	3	6	381	24	13	35	42	4	11
58	125	5	68	3	23	9	746	1017	3	4	75	82	6	9	6	6
11	50	1363	250	100	28	257	631	431	104	223	97	26	48	14	17	6
81	193	91	1162	567	578	543	104	2	79	4	290	58	32	46	2	17
308	637	2194	538	64	68	262	10	34	202	199	47	72	48	9	3	18
28	353	155	869	120	43	33	935	718	31	215	172	25	5	26	24	9
144	314	29	115	29	643	44	144	141	101	201	40	25	22	5	3	8
48	142	384	18	224	495	32	35	47	369	159	103	83	26	35	16	12
13	706	587	601	37	439	1043	954	4	38	378	178	15	9	4	2	3
131	207	1	5	137	76	75	1	723	679	11	119	68	2	13	13	17
39	16	74	195	404	216	78	211	173	20	277	204	1	4	27	7	3
290	180	358	1141	505	2	274	555	78	547	16	75	52	21	27	7	19
901	59	803	7	252	9	199	1654	1583	1125	137	125	18	4	13	7	13
30	100	2	12	1161	44	3004	306	1590	68	63	2	51	25	6	6	2
135	244	135	66	329	199	1	21	17	659	31	276	74	23	25	20	20
1600	597	140	250	598	265	119	52	55	444	173	2	6	20	3	7	2
30	340	15	1855	650	48	839	5	277	168	188	12	102	24	4	9	10
402	116	728	133	165	5	1144	21	833	171	162	57	33	8	2	18	11
659	197	3	1312	102	1077	172	16	1217	4	15	144	9	45	22	27	7
389	1	542	65	20	159	42	642	55	7	85	111	12	2	15	18	12
73	77	276	42	247	151	169	36	29	1004	415	11	85	11	22	7	1
279	9	506	574	734	263	81	3	372	97	5	113	12	9	2	4	13
776	44	608	224	52	239	1272	328	4	853	3	52	65	34	2	5	10
83	279	461	18	9	7	723	50	43	48	413	128	27	27	23	14	11
189	275	4076	715	1443	640	222	805	656	123	83	116	57	31	3	9	11
1117	391	98	5	280	703	341	26	392	5	1	175	50	28	5	25	11
1583	606	139	12	256	1226	1284	90	1	22	396	3	16	47	2	21	33
281	524	1564	119	79	10	25	1394	1352	186	255	23	12	26	3	2	8
406	280	18	103	728	125	111	33	469	52	153	57	63	9	26	13	22
242	902	1318	10	20	11	758	1322	765	129	85	55	84	49	15	18	9
41	928	327	104	319	37	266	1668	238	22	249	132	64	35	21	6	6
475	14	3	646	406	324	2516	586	206	32	136	68	41	15	3	7	10
108	645	803	245	15	12	185	9	285	41	30	52	41	11	38	8	10
35	228	133	551	40	183	1660	261	536	172	31	68	53	40	39	10	8
141	904	168	200	5	8	148	188	19	16	10	104	8	11	10	10	11
9	179	424	621	280	447	250	93	706	8	419	87	52	5	7	4	4
421	19	490	2	2	557	27	57	115	15	172	11	55	6	8	14	16

Закінчення таблиці Д.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
13	108	239	72	51	838	3	4	915	647	89	38	72	15	4	3	8
773	160	1807	213	3	28	1084	217	1137	738	105	25	10	18	44	10	2
3	613	77	3	550	214	332	183	247	639	14	8	87	17	19	6	21
407	37	403	2776	1360	158	826	365	382	279	5	63	18	47	21	10	12
847	436	1899	17	414	21	244	113	1879	119	87	70	32	8	23	12	6
73	20	375	294	35	296	1579	40	161	4	423	69	8	6	42	15	4
396	9	38	929	214	43	500	188	1219	158	70	188	58	6	27	12	2
31	304	599	110	91	32	179	62	596	55	168	2	91	39	36	3	6
255	908	9	24	68	9	3	32	260	1	1	97	58	45	3	11	14
248	383	339	352	9	399	3	282	560	5	62	350	7	88	18	5	13
214	79	477	49	294	447	18	244	21	19	286	158	48	7	39	20	9
145	173	107	206	276	224	21	75	623	334	37	80	12	7	16	4	12
597	983	903	374	174	837	202	1044	1040	624	163	30	89	26	24	9	9
8	115	148	277	126	105	1	572	95	111	365	39	89	32	5	6	17
136	34	26	1080	18	10	439	379	10	450	68	80	67	51	12	26	8
218	2	130	318	912	365	553	36	46	171	50	6	76	11	10	23	5
29	214	3	451	375	30	147	169	62	545	138	9	30	8	4	2	11
38	2	244	4	132	84	1215	79	224	343	133	197	100	47	16	2	8
301	16	39	15	428	83	700	774	118	32	23	283	82	59	18	5	5
538	36	83	592	62	333	16	419	298	195	66	117	42	94	8	2	7
7	448	119	581	251	374	302	80	17	823	37	11	46	3	9	6	5
34	48	1	14	353	105	417	665	173	374	159	32	19	46	5	8	6
1505	1970	59	280	7	17	1001	405	61	354	43	54	13	17	9	19	10
1368	181	1324	193	26	26	1833	354	417	850	226	97	90	35	10	5	23
35	222	10	198	727	12	3	18	1114	247	39	41	39	28	29	13	6
1166	152	314	877	413	7	263	107	126	346	5	141	88	7	5	26	7
7	4	46	349	510	46	158	70	340	656	167	31	11	30	16	18	11
1264	51	29	66	130	3	136	15	111	151	5	127	15	35	16	4	2
95	272	121	425	195	162	1254	307	617	787	63	121	1	3	45	14	14
502	628	390	18	16	21	1041	452	3	411	2	3	12	33	8	8	4
28	25	711	252	600	67	69	48	29	1	1	108	42	10	33	12	16
99	115	777	88	177	204	11	461	146	62	184	118	47	10	17	6	10
309	2955	936	1424	42	12	361	680	67	5	94	11	29	8	21	3	10
48	966	152	272	794	549	6	282	90	3	208	117	86	41	16	10	9
42	201	8	9	29	259	670	1	60	240	97	134	31	4	16	1	5
4	671	64	197	253	138	279	444	10	1	39	165	73	18	4	9	5
763	30	871	639	177	153	96	338	492	443	195	56	101	51	24	5	22
269	407	598	347	29	211	102	23	110	468	145	15	18	10	15	4	5
306	36	179	82	171	27	206	483	601	1	12	2	44	27	1	5	3
75	70	3	69	364	14	1236	921	12	7	58	40	6	5	8	8	8
196	91	1098	27	435	71	166	16	463	430	43	1	45	34	6	5	15
157	83	556	57	11	342	351	202	337	204	57	14	46	23	17	22	5
15	3	1	46	719	2	218	14	35	172	8	131	82	3	23	24	10
507	77	438	461	117	1512	293	1675	86	175	13	16	21	37	2	3	5
4	44	325	180	1	107	247	244	200	470	300	112	2	8	29	3	18
308	733	4	2	258	265	45	37	35	204	17	76	2	5	1	11	9
259	7	25	67	93	539	602	217	100	232	607	11	99	63	21	5	7
243	8	301	174	240	44	802	338	640	161	349	118	41	20	20	8	4
37	12	921	567	178	263	183	256	739	253	141	12	106	20	14	17	1
559	202	19	273	441	463	182	532	2	97	176	114	8	44	26	13	7
401	39	170	1	717	109	490	273	306	160	578	6	77	25	19	23	23
731	676	35	596	122	598	58	101	366	60	269	164	33	88	14	16	13
601	13	1849	399	203	199	173	29	244	750	151	130	65	74	23	21	11

Примітка. У першому рядку таблиці цифри від 1 до 17 характеризують значення максимально допустимого значення кореспонденції, що генерується при кожному потраплянні в комірку МК розміром: 1 – 437215 пас., 2 – 218608 пас., 3 – 109304 пас., 4 – 54652 пас., 5 – 27326 пас., 6 – 13663 пас., 7 – 6832 пас., 8 – 3416 пас., 9 – 1708 пас., 10 – 854 пас., 11 – 427 пас., 12 – 214 пас., 13 – 107 пас., 14 – 54 пас., 15 – 27 пас., 16 – 14 пас., 17 – 7 пас.

Напрямки, результати, ефективність впровадження

Методика гарантованої генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій з урахуванням накладання можливих обмежень використана для розробки набору станів транспортного попиту на пересування населення міста Харкова з використанням громадського транспорту. Моделювання набору матриць пасажирських кореспонденцій проведено з використанням кривої розселення населення міста Харкова. За умов використання спеціалізованого програмного забезпечення PTV VISUM сформовані моделі транспортного попиту дозволять розробити альтернативні варіанти розвитку системи громадського транспорту з урахуванням наміченої у Плані сталої міської мобільності міста Харкова стратегії.

Висновки, зауваження, пропозиції

Використання результатів генерації набору матриць пасажирських кореспонденцій по запропонованій методиці забезпечує можливість якісного планування розвитку системи громадського транспорту на перспективу.

Заступник начальника Управління
шляхового господарства Департаменту
будівництва та шляхового господарства
Харківської міської ради




Володимир ШЕВЧЕНКО

«__» _____ 2025 року

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник відділу - заступник начальника управління житлово-комунального господарства, транспорту та благоустрою БМР ХО


 _____ Володимир ЯЦЕНКО
 « 17 жовтня 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів наукових досліджень

Комісія у складі:

Голова: начальник відділу - заступник начальника управління житлово-комунального господарства, транспорту та благоустрою БМР ХО - В.В. Яценко

Члени комісії: інженер - О.І. Чмут
 диспетчер - К.В. Слонь

Дійсним актом підтверджую, що відділом житлово-комунального господарства, транспорту та благоустрою Балаклійської міської ради Харківської області були прийняті до впровадження наступні результати науково-дослідницької роботи здобувачки третього курсу (освітньо-наукового) рівня вищої освіти Харківського національного автомобільно-дорожнього університету Цинь Сяосюань:

- методика удосконалення інтервальної концепції моделювання транспортного попиту на пересування пасажирів міським громадським транспортом;
- алгоритм поетапної генерації випадкових матриць пасажирських кореспонденцій.

Голова комісії _____ Володимир ЯЦЕНКО

Члени комісії _____ Олександр ЧМУТ

_____ Карина СЛОЇНЬ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспортних систем
Кафедра транспортних систем і логістики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор ХНАДУ
проф. Анжеліка БАТРАКОВА

«02» квітня 2026 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Цинь Сяосюань на тему «Розробка методу моделювання пасажирських кореспонденцій», яка представляється на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 27 «Транспорт» за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)» освітньо-наукова програма «Транспортні системи»

Комісією у складі завідувача кафедри транспортних систем і логістики к.т.н., доц. Любого Є.В., заступника декана ФТС, доцента кафедри транспортних систем і логістики к.т.н., доц. Ковцур К.Г., заступника завідувача кафедри транспортних систем і логістики к.т.н, доц. Свічинського С.В., складено цей акт про те, що результати дисертації Цинь Сяосюань, у вигляді методології гарантованої генерації випадкових матриць кореспонденцій з урахуванням накладання системи можливих обмежень, впроваджено у навчальний процес кафедри транспортних систем і логістики при викладанні дисциплін «Моделювання транспортних потоків», «Транспортне планування великих і значних міст» і «Аналітика транспортних процесів» у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті для здобувачів другого (магістерського) і третього (освітньо-наукового) рівнів вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 275 «Транспортні технології (за видами)».

Зав. каф. ТСЛ канд. техн. наук, доц.

Євген ЛЮБИЙ

Заст. декана ФТС канд. техн. наук, доц.

Катерина КОВЦУР

Заст. зав. каф. ТСЛ канд. техн. наук, доц.

Станіслав СВІЧИНСЬКИЙ

ДОДАТОК Ж
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь С. Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. 2(23). С. 152–158. DOI: <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). С. 438–446. DOI: <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), ч. 2. С. 394–409. DOI: [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. Цинь С., 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. DOI: [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).

5. Цинь С., Любий Є. В. Оцінювання можливостей інтервальної концепції в підвищенні достовірності результатів моделювання транспортного попиту // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2026. 1(96). С. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.1.22>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Горбачов П. Ф., Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь С. Щодо питання моделювання елементів матриць кореспонденцій в рамках інтервальної концепції формування моделей транспортного попиту // *Напрямки розвитку*

технологічних систем і логістики в АПВ : матеріали V-ї Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 23 трав. 2024 р. Харків: ДБТУ. 2024. С. 48–49.

7. Цинь С., Любий Є. Проблеми оцінювання точності моделей транспортного попиту // *Транспортні системи та технології* : тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 15–16 трав. 2025 р. Львів: НУ «Львівська політехніка». 2025. С. 124–126.

8. Цинь С. Існуючі метрики оцінки подібності матриць пасажирських кореспонденцій // *Напрями розвитку технологічних систем і логістики в АПВ* : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Харків, 22 трав. 2025 р. Харків: ДБТУ. 2025. С. 106–109.

9. Цинь С. Алгоритм гарантованої генерації випадкових матриць кореспонденцій // *Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура '2025" (MAITRI 2025)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 30–31 жовт. 2025 р. Харків: ХНАДУ. 2025. С. 411–414.

10. Qin X. Problems of modeling passenger correspondence matrices // *Сучасні технології промислового комплексу – 2025* : матеріали IX-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон-Хмельницький, 17–19 верес. 2025 р. Херсон-Хмельницький: ХНТУ. 2025. С. 249–251.

11. Qin X., Orhina A. Analysis of synthetic models for forming matrices of passenger correspondence // *Інновації у системах управління безпекою та дорожнім рухом* : матеріали VI-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 18–19 листоп. 2025 р. Харків: ХНАДУ. 2025. С. 64–68. DOI: 10.61718/in202512.01.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

12. Любий Є. В., Цинь С. Моделі прогнозування вантажного транспортного попиту // *Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 22–23 жовт. 2024 р. Харків: ХНАДУ. 2024. С. 323–326.

13. Цинь С., Любий Є. В., Мосьпан В. М. Чотирьохетапна модель

розрахунку вантажного транспортного попиту // *Сучасні проблеми функціонування логістичних систем. Сталий розвиток транспортних систем: наука і практика* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 25–26 листоп. 2024 р. Харків: ХНАДУ. 2024. С. 178–180.