

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.1:614

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.05>

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕРЕЖ КОНТАКТІВ ПАСАЖИРІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В КОНТЕКСТІ РИЗИКУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

О.Ф. Кузькін¹, І.М. Райда², Е.В. Терещенко³

¹д.т.н., професор кафедри «Транспортні технології»,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3160-1285

²старший викладач кафедри «Транспортні технології»,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-3925-4692

³к.ф.-м.н., доцент кафедри «Системний аналіз та обчислювальна математика»,
Національний університет «Запорізька політехніка»,
Запоріжжя, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6207-8071

Анотація

Вступ. Міський громадський транспорт є одним з чинників поширення інфекційних захворювань завдяки безпосереднім контактам пасажирів один з одним під час поїздки в обмеженому просторі. Прагнучи знизити ризики захворювання населення міст під час світової пандемії коронавірусу Covid-19, оператори міських пасажирських перевезень і місцева влада застосовували низку обмежень для користувачів громадського транспорту – від обмеження кількості пасажирів у салоні транспортних засобів до повного припинення послуг. Втім, на даний час відсутні обґрунтовані підходи щодо ефективності застосування таких обмежень. **Мета.** Метою статті є дослідження та статистичний аналіз мереж контактів пасажирів громадського транспорту у містах з позицій теорії складних мереж у контексті можливого поширення інфекційних захворювань. **Результати.** Рейсові мережі контактів пасажирів міського громадського транспорту можуть бути побудовані за відомими значеннями елементів матриць міжзупинкових пасажирських кореспонденцій, які можуть бути отримані за результатами обстеження пасажирських потоків. Статистичний аналіз мереж контактів пасажирів, виконаний для чотирьох маршрутів міського громадського транспорту міста Запоріжжя (Україна), показав, що вони виявляють властивості мереж «тісного світу» Вотса-Строгаца. При цьому середня кількість контактів пасажирів з іншими пасажирів під час поїздки лінійно зростає зі зростанням пасажиромісткості рухомого складу, обсягів перевезень пасажирів

за рейс та показників змінюваності пасажирів на маршруті. **Висновки.** Виявлені властивості мереж контактів пасажирів на міському громадському транспорті дають можливість застосувати до них раніше отримані результати щодо механізмів поширення інфекційних захворювань у мережах «тісного світу». Отримані залежності середньої кількості контактів пасажирів один з одним під час поїздки можуть бути використані для обґрунтування запровадження обмежувальних заходів щодо користування міським громадським транспортом та їх ефективності під час спалаху інфекційних захворювань.

Ключові слова: міський громадський транспорт, інфекційне захворювання, мережа контактів пасажирів, складні мережі.

STATISTICAL ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORT PASSENGERS' ENCOUNTER NETWORKS IN THE CONTEXT OF THE RISK OF THE INFECTIOUS DISEASE SPREAD

O. F. Kuzkin¹, I. M. Raida², E.V. Tereshchenko³

¹DSc, Professor at the Department of Transport Technologies,
National University Zaporizhzhia Polytechnic,
Zaporizhzhia, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-3160-1285

²Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies,
National University Zaporizhzhia Polytechnic,
Zaporizhzhia, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0003-3925-4692

³PhD (Phys. & Math.), Associate Professor at the Department
of Systems Analysis and Management,
National University Zaporizhzhia Polytechnic,
Zaporizhzhia, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6207-8071

Summary

Introduction. Urban public transport is considered as one of the key factors of the spreading of infectious diseases due to the direct interaction of passengers with each other during trips in a confined space. Trying to reduce the risk of disease among the urban population during the global pandemic of the Covid-19 coronavirus, urban passenger transport operators and local authorities have applied a number of restrictions for public transport users – from limiting the number of passengers in the vehicle to completely suspending services. However, currently, there are no substantiated approaches to the effectiveness of applying such restrictions. **Purpose.** The purpose of the article is to study and statistically analyze the encounter networks of public transport passengers in cities from the perspective of the complex networks theory in the context of the possible spread of infectious diseases. **Results.** Passenger encounter networks of urban public transport can be constructed using known values of the trip O-D matrix elements, which can be obtained from the results of passenger flow surveys. Statistical analysis of passenger encounter networks performed for four urban public transport routes in Zaporizhzhia city (Ukraine) showed that they exhibit the properties of Watts-Strogatz “small-world” networks. At the same time, the average

*number of passenger encounters with other passengers during a trip increases linearly with the increase in passenger capacity of transit vehicles, passenger transportation volumes per trip, and passenger variability indicators on the route. **Conclusions.** The revealed properties of passenger encounter networks on urban public transport make it possible to apply to them previously obtained results on the mechanisms of the infectious diseases spread in “small-world” networks. The obtained dependences of the average number of passenger encounters with each other during a trip can be used to justify the introduction of restrictive measures regarding the use of urban public transport and their effectiveness during an outbreak of infectious diseases.*

Key words: *urban public transport, infectious disease, passenger encounter network, complex networks.*

Вступ. Масовий громадський транспорт був і залишається основним способом забезпечення мобільності населення у містах безвідносно до рівня доходів громадян, їх віку та статі, фізичних можливостей чи наявності права управляти приватним автомобілем. Концепція масових перевезень людей, реалізована у технології роботи громадського транспорту, передбачає транспортування великої кількості людей у рухомому складі великої пасажиромісткості з дотриманням прийнятних умов комфортабельності перевезень, що забезпечує невисокий рівень вартості послуг для окремого пасажира, відносно малий внесок громадського транспорту у завантаження міських вулиць і доріг та забруднення навколишнього середовища. Однак, під час спалаху епідемічних захворювань така концепція громадського транспорту стає його недоліком, сприяючи поширенню інфекцій серед пасажирів [1]. Зважаючи на суттєву обмеженість, а нерідко і неможливість постійних користувачів громадського транспорту обирати інший спосіб пересування у місті у разі обмеження або припинення його роботи, задача організації роботи масового міського пасажирського транспорту під час пандемій є актуальною і це яскраво засвідчила нещодавня світова пандемія коронавірусу Covid-19.

Постановка проблеми. Пандемія коронавірусу Covid-19 поставила перед науковцями низку питань у багатьох сферах людської діяльності, і транспорт у цьому сенсі не став виключенням. Основною функцією міського громадського транспорту який є невід’ємною складовою інфраструктури сучасного міста, є забезпечення потреб населення у пересуваннях. Однак, в умовах виникнення епідемічних загроз, міський масовий пасажирський транспорт може розглядатись як один з ключових чинників, що сприяють поширенню інфекційних захворювань [2]. На сьогодні не можна однозначно стверджувати, що система міського громадського транспорту є основним фактором розповсюдження епідемічної небезпеки, втім особливості технологічного процесу його роботи – накопичення пасажирів на зупинках, спільне використання великою кількістю пасажирів обмеженого простору та площі рухомого складу пасажирського транспорту під час поїздки, – створюють передумови для розповсюдження вірусних інфекцій, які передаються від хворої до здорової людини безпосередньо (повітряно-крапельним шляхом) або опосередковано (через контактні поверхні).

На ступінь ризику передачі захворювання при користуванні громадським транспортом потенційно впливає низка факторів, таких як пасажиромісткість

рухомого складу та ступінь її використання, закономірності обсягів пасажирообміну на зупинках, тривалість перебування пасажирів на зупинках в очікуванні транспорту та у транспортних засобах під час поїздки, просторова та об'ємна щільність пасажирів у салоні транспортного засобу, кількість і характеристики контактних поверхонь салону (пасажирських дверей, поручнів, люків) тощо. Крім того, структура маршрутної мережі також може впливати на процеси передавання захворювання [3].

Оскільки механізм передавання вірусних інфекцій від хворої людини до здорової при користуванні громадським транспортом передбачає їх безпосередній або опосередкований контакт, постає задача встановлення закономірностей виникнення таких контактів, їх впливу на потенційний ризик розповсюдження інфекцій та захворювання пасажирів, а також оцінки ефективності використання організаційно-технологічних заходів, які можуть бути застосовані на громадському транспорті, щодо ступеня цього ризику під час спалаху епідемічних небезпек.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світова пандемія коронавірусу Covid-19 та його важкі наслідки на початку розповсюдження інфекції вимусили операторів громадського транспорту у містах реагувати на нові виклики з метою вирішення основного завдання – зменшення потенційної епідемічної небезпеки для пасажирів при користуванні міським масовим пасажирським транспортом. На практиці для вирішення цього завдання вживались різноманітні заходи, такі як: обов'язкове носіння засобів індивідуального захисту (захисних масок) під час перебування у салоні транспортних засобів; забезпечення певного рівня соціального дистанціювання у салоні транспортного засобу та на обмежених площах інфраструктури громадського транспорту (зупинках, терміналах, транспортно-пересадкових вузлах); регулярна санітарна обробка внутрішніх поверхонь рухомого складу громадського транспорту; контроль та виявлення ознак захворювання під час доступу до рухомого складу та об'єктів інфраструктури громадського транспорту тощо.

Індивідуальні захисні маски використовувались майже всюди і показали значну ефективність. Дослідження показали, що цей найпростіший спосіб захисту від прямого потрапляння вірусу від хворої до здорової людини дозволяє знизити потенційний ризик захворювання більш ніж на 90% [4].

Концепція фізичного дистанціювання стала одним з найпоширеніших нефармацевтичних заходів, які були застосовані для запобігання передаванню коронавірусу Covid-19. Всесвітня організація охорони здоров'я рекомендувала уникати скупчення людей і тісного контакту, тримати фізичну дистанцію принаймні 1 метр від інших, навіть якщо вони не виглядають хворими [5]. З точки зору механізму передавання інфекції, такі заходи виглядають ефективними, але вони є найбільш складними для реалізації саме у громадському транспорті, бо збільшення відстані фізичного дистанціювання суттєво зменшує провізну спроможність рухомого складу громадського транспорту через зменшення його ефективної пасажиромісткості. Можна навіть сказати, що концепція фізичного дистанціювання прямо суперечить самій концепції громадського транспорту [6].

Окрім згаданих вище підходів до зменшення ризиків розповсюдження інфекції у міських системах громадського транспорту, використовувалось також

припинення функціонування окремих міських маршрутів [7], запровадження обмежень на кількість пасажирів, що одночасно перебувають у пасажирських транспортних засобах [8], введення пріоритетів серед населення щодо доступу до послуг міського громадського транспорту з метою обмеження потенційної кількості пасажирів та транспортної рухливості населення [9]. Всі ці заходи мали на меті мінімізацію ризиків захворювання у громадському транспорті за умови, що транспорт є джерелом подібної небезпеки. Втім, результати досліджень науковців не дають підстав для однозначного твердження, що це насправді так.

Так, у роботі [2] громадський транспорт розглядається як каталізатор для розповсюдження інфекційних захворювань та висувається твердження про його значний потенційний вплив на прискорення розповсюдження інфекційних захворювань. Аналогічно, у роботі [7] стверджується, що автобусна маршрутна система та її характеристики відіграють суттєву роль в процесі поширення інфекційних захворювань. У роботі ж [4] науковці вважають міський громадський транспорт найбільш критичним фактором у механізмі поширення інфекції серед населення.

Втім, існують й інші думки стосовно ролі громадського транспорту в розповсюдженні епідемічної загрози. Дані досліджень, наведені у роботі [3], свідчать про те, що поїздки в громадському транспорті не є основними причинами захворювання для пасажирів, при цьому частка випадків захворювань у громадському транспорті не перевищує 18% від їх загального масиву. Результати, наведені у роботі [10], показали, що міський громадський транспорт виявився навіть відносно безпечним середовищем для пасажирів і не став причиною захворювання основної маси населення.

Таким чином, роль громадського транспорту у розповсюдженні небезпечних епідемічних захворювань залишається до кінця не з'ясованою. Втім, як показав урок пандемії коронавірусу Covid-19, міський громадський транспорту стикнувся з відсутністю дієвих та науково обґрунтованих політик і заходів протидії можливого розповсюдженню вірусних інфекцій у разі виникнення пандемій, особливо на їх початковій стадії. Виходячи з цього, дослідження з аналізу заходів протидії потенційному поширенню інфекційних захворювань на громадському транспорті під час раптового виникнення епідемій та пандемій, а також визначення ступеня ефективності таких заходів, є актуальною науковою задачею.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є розробка підходу до побудови мереж контактів пасажирів на міському громадському транспорті на підставі результатів обстеження пасажирських потоків та змістовний статистичний аналіз таких мереж, отриманих емпіричним шляхом, методами теорії складних мереж у контексті ризику захворювання пасажирів під час спалаху вірусних інфекцій.

Викладення основного матеріалу дослідження. Мережа контактів пасажирів та її формування. Мережею контактів пасажирів (МКП) громадського транспорту будемо називати неорієнтований незважений граф без петель і кратних ребер $G = (V, E)$, множину вершин якого V утворюють пасажирів, які були перевезені пасажирським транспортним міського громадського транспорту під час виконання останнім одного рейсу на деякому маршруті. Дві вершини такого графа будуть з'єднані ребром $e \in E$, якщо відповідна пара пасажирів під час здійснення поїздки одночасно перебувала, та, отже, мала високу імовірність контакту

один з одним в салоні транспортного засобу. Зрозуміло, що сам факт знаходження пасажирів в одному транспортному засобі з іншими пасажирів під час поїздки ще не означає у наслідку його захворювання, оскільки на процес передавання інфекції впливає низка невизначених факторів, таких як: сприйнятливість пасажирів до захворювання, фактичний стан здоров'я інших пасажирів, дистанція між пасажирів у салоні, використання пасажирів засобів індивідуального захисту тощо. Але цілком логічним є припущення, що чим більше контактів з іншими пасажирів має пасажир під час поїздки, тим вищим є ризик його захворювання інфекційними хворобами, які передаються повітряно-крапельним або контактним шляхом.

Подібний підхід до формального представлення мереж контактів людей між собою, в тому числі пасажирів на міському громадському транспорті, широко використовується науковцями, в тому числі і у аспекті дослідження процесів поширення вірусних інфекцій. У попередніх дослідженнях мережі контактів пасажирів в залежності від мети та умов вирішуваних задач використовувались: статичні (з постійним набором вершин та ребер у часі) та динамічні (зі змінним набором вершин і ребер у часі), орієнтовані, напіворієнтовані, зважені графи та мультиграфи; елементарні (що відбивають контакти пасажирів протягом одного рейсу на міському маршруті) та агреговані (що відбивають контакти пасажирів на одному чи декількох маршрутах протягом певного проміжку часу). В якості ваги ребра у мережі контактів людей зазвичай приймається ефективний рівень передавання захворювання або тривалість безпосереднього контакту [2, 7, 11, 12, 13, 14, 15]. Так, у роботі [7] моделювався процес розповсюдження епідемічної загрози з використанням динамічної мережі контактів окремого пасажирів. У роботі [4] з використанням зваженої МКП моделювався процес пересування хворої людини з використанням системи міського громадського транспорту. З використанням МКП у [16] моделювався сам процес передачі захворювання, а у роботі [8] – оцінювався ризик посадки в пасажирський транспортний засіб на окремих зупинках та моделювався вплив окремих обмежувальних заходів на громадському транспорті на потенційне розповсюдження хвороби.

Вихідною інформацією для побудови МКП служить рейсова матриця міжзупинкових пасажирських кореспонденцій (ММПК) $X = \{x_{ij}\} (i, j = \overline{0, n})$, де n – кількість зупинок на маршруті. Елементи ММПК x_{ij} показують кількість пасажирів, що проїхали маршрутом від зупинки i до зупинки j з усіх пасажирів, що увійшли до транспортного засобу на зупинці i . Вони можуть бути отримані за даними безпосередніх спостережень або за допомогою моделювання. Останній спосіб є найпоширенішим, оскільки інформація про кількість пасажирів a_i , що увійшла до транспортного засобу на зупинці i ($i = \overline{0, n-1}$) та кількість пасажирів b_j , що вийшла з транспортного засобу на зупинці j ($j = \overline{1, n}$) може бути отримана з автоматизованих систем обліку пасажирів та оплати проїзду за допомогою смарт-карт (такий спосіб використовувався при дослідженні МКП у системі автобусних перевезень Сінгапуру [7], в метрополітенах міст Китаю [2], в громадському транспорті міст Південної Кореї [4]) або безпосередньо за допомогою обстеження пасажирських потоків.

Нехай зупинки маршруту, починаючи з початкової, пронумеровані порядковими числами $0, 1, \dots, n$. Якщо відома інформація про кількість пасажирів, які увійшли a_i

та вийшли b_j на кожній зупинці маршруту під час рейсу ($\sum_{i=0}^n a_i = \sum_{j=0}^n b_j$, $i, j = \overline{0, n}$), тоді елементи ММПК з достатньою для практичних цілей точністю можуть бути розраховані за формулою [17]:

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{\prod_{r=i+1}^{j-1} (Q_r - b_r)}{\prod_{r=i+n}^j Q_r} \cdot a_i \cdot b_j, \text{ якщо } j > i + 1; \\ \frac{1}{Q_j} \cdot a_i \cdot b_j, \text{ якщо } j = i + 1; \\ 0, \text{ якщо } j \leq i, \end{cases} \quad (1)$$

де $i, j = \overline{0, n}$; $Q_r = Q_{r-1} - b_{r-1} + a_{r-1} = \sum_{i=0}^{r-1} (a_i - b_i)$.

Кількість вершин МКП, побудованої на підставі відомої ММПК, буде дорівнювати загальній кількості пасажирів, що скористалися маршрутом за рейс, тобто $n(G) = \sum_{i=0}^n a_i = \sum_{j=0}^n b_j$. Зрозуміло, що довільний пасажир $v_k = v(s, d) \in V$ ($s \in [0 \dots n-1], d > s$), який увійшов до транспортного засобу на деякій зупинці s та вийшов з нього на деякій зупинці d , протягом поїздки знаходився у транспортному засобі одночасно з усіма пасажирами $v_p = v(i, j) \in V$ ($j > i$), для яких виконується умова $(j > s) \& (i < d)$. У такому випадку відповідні вершини v_k та v_p МКП будуть зв'язані ребром (v_k, v_p) .

Побудована таким чином МКП представляє собою граф, формування якого відбувається під дією випадкових факторів, оскільки імовірність повторення однієї й тієї ж ММПК для різних рейсів транспортного засобу на міському маршруті громадського транспорту є низькою. Таким чином, кожному окремому рейсу транспортного засобу буде відповідати майже унікальна МКП. З цієї точки зору цікавість представляє пошук спільності і відмінності окремих МКП та дослідження їх властивостей з метою віднесення таких МКП до одного з окремих класів складних мереж [18], закономірності розповсюдження у яких інфекційних захворювань вже отримані науковцями.

Характеристики мереж контактів пасажирів. До основних числових характеристик мереж контактів пасажирів, які визначають їх властивості з позиції теорії складних мереж, відносять [18, 19]:

1) середню степінь вершини мережі $\langle k \rangle$, яка визначається як середнє арифметичне степенів усіх вершин мережі

$$\langle k \rangle = \frac{1}{n(G)} \sum_{i=1}^{n(G)} k_i, \quad (2)$$

де k_i – степінь вершини i ($v_i \in G$) мережі;

2) середню довжину найкоротшого шляху мережі $\langle l \rangle$, виражену у кількості ребер мережі, яка є лінійною характеристикою мережі та розраховується як середнє арифметичне найкоротших шляхів між усіма парами вершин мережі \tilde{l}_{ij}

$$\langle l \rangle = \frac{2}{n(G)[n(G)-1]} \sum_{j=1, i>j}^{n(G)} \tilde{l}_{ij}. \quad (3)$$

3) кластерний коефіцієнт C мережі є мірою її зв'язності та розраховується за формулою

$$C = \frac{1}{n(G)} \sum_{i=1}^{n(G)} c_i, \quad (4)$$

де c_i – кластерний коефіцієнт вершини $(v_i \in G)$ мережі, який дорівнює імовірності того, що будь-які дві вершини, суміжні даній, також є суміжними, та розраховується за формулою

$$C_i = \frac{2 \cdot E_i}{k_i(k_i-1)}, \quad (5)$$

де E_i – кількість ребер мережі, які зв'язують між собою усі вершини, які суміжні даній вершині v_i .

Значення кластерного коефіцієнта мережі $C \in [0..1]$ при цьому $C = 0$ для ациклічних мереж (дерев) та $C = 1$, для повних мереж, у яких будь-яка пара вершин з'єднана ребром;

4) коефіцієнт асортативності мережі r розраховується як коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона між степенями усіх її суміжних вершин та може бути визначений за формулою

$$r = \frac{\sum \sum_{e=1}^E k_{ei} \cdot k_{ej} - [\sum_{e=1}^E k_{ei}]^2}{\sqrt{\sum \sum_{e=1}^E k_{ei}^2 - [\sum_{e=1}^E k_{ei}]^2}}, \quad (6)$$

де E – кількість ребер мережі;

k_{ei}, k_{ej} – степені вершин мережі, які є інцидентними ребру $e \in E$.

Мережі, для яких $r \rightarrow -1$, називають дизасортативними, у той час як мережі з $r \rightarrow 1$ називають асортативними.

Дослідження мереж контактів пасажирів на автобусних маршрутах міста Запоріжжя. Для дослідження було обрано чотири міських автобусних маршрути загального користування міста Запоріжжя (рис. 1), які обслуговуються рухомим складом різної пасажиромісткості. Характеристики досліджуваних маршрутів наведені у табл. 1.

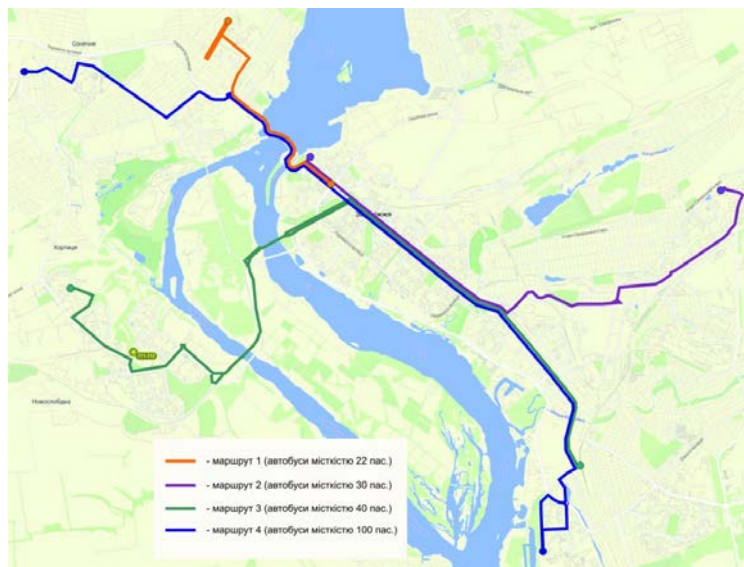


Рис. 1. Досліджувані автобусні маршрути міста Запоріжжя

Для кожного маршруту протягом одного дня тижня було проведено вибіркове обстеження рейсів обліковцями, що перебували у салоні транспортного засобу. Обліковці фіксували кількість пасажирів, що увійшли та вийшли на кожній зупинці маршруту. Надалі за отриманими даними для кожного обстеженого рейсу за формулою (1) розраховувались елементи рейсової ММПК, будувалась рейсова МКП

та розраховувались її показники за формулами (2)-(6). Для розрахунку показників МКП було розроблене програмне забезпечення мовою Python з використанням функцій бібліотеки networkX. Приклади візуалізації рейсових МКП наведені на рис. 2.

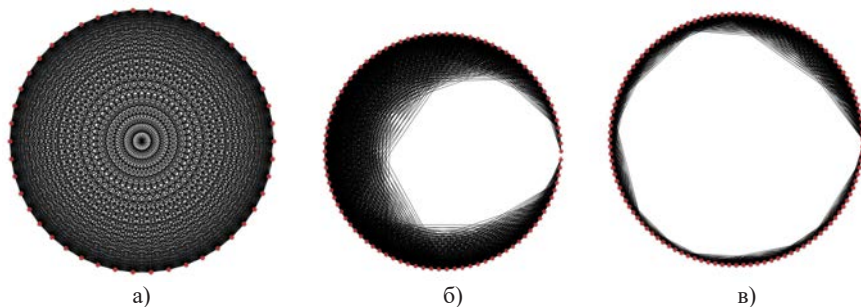


Рис. 2. Приклади рейсових мереж контактів пасажирів:

$$n(G) = 46, E = 1031, \langle l \rangle \sim 1 \text{ (a)}; n(G) = 94, E = 2059, \langle l \rangle = 1,78 \text{ (б)}; n(G) = 112, E = 1438, \langle l \rangle = 3,54 \text{ (в)}$$

Результати розрахунку усереднених показників рейсових МКП (за години «пік», міжпіковий період доби та в цілому за добу) наведений у табл. 2. До пікових періодів з максимальним попитом на перевезення пасажирів віднесені рейси, що виконувались з 06:00 до 09:00 та з 16:00 до 19:00, до міжпікового періоду – рейси, що виконувались з 09:00 до 16:00.

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних маршрутів

Номер маршруту	Тип маршруту	Довжина маршруту, км	Кількість зупинок	Місткість автобусів, пас.	Кількість обстежених рейсів
1	радіальний	7,9	13 (12)	22	96
2	радіальний	15,1	25 (27)	30	52
3	діаметральний	22,5	33 (34)	40	31
4	діаметральний	22,4	35 (34)	100	34

Аналіз результатів розрахунків характеристик МКП свідчить, що вони характеризуються великими значеннями кластерного коефіцієнту C та малими значеннями середньої довжини найкоротшого шляху $\langle l \rangle$ у порівнянні з розміром мережі. Це цілком відповідає механізму утворення таких МКП, зумовленому технологією роботи міського маршрутного пасажирського транспорту та дає підстави віднести такі МКП до класу моделей мереж «тісного світу» Вотса-Строгаца [11], у яких середня довжина найкоротшого шляху дорівнює $\langle l \rangle = n(C)/2\langle k \rangle$, а кластерний коефіцієнт $C \rightarrow 3/4$.

Дійсно, в процесі руху пасажирського транспортного засобу по маршруту усі пасажирів, що перебувають у ньому, утворюють кластер, якому відповідає повний підграф МКП. Множина пасажирів, що входять до транспортного засобу на деякій зупинці, у свою чергу теж представляють собою такий підграф (кластер), який приєднується до кластеру пасажирів у салоні транспортного засобу, утворюючи зв'язки між кожним пасажиром, що увійшов до транспортного засобу та кожним

пасажиром, що перебуває у транспортному засобі після виходу пасажирів на даній зупинці. Пасажири у МКП можуть бути попарно не зв'язаними між собою чи зв'язаними між собою безпосередньо або через деяку кількість посередників. У останньому випадку безпосереднє контактування цих пасажирів під час поїздки взагалі є виключеним. Ризик передавання інфекційного захворювання через одного або декількох посередників під час поїздки громадським транспортом є малим, оскільки тривалість рейсової поїздки у місті є невеликою, при цьому напрямок передавання інфекції може бути лише одностороннім – від пасажирів, що зайшов до транспортного засобу раніше, до пасажирів, що зайшов до транспортного засобу пізніше. Зауважимо також, що ми не розглядаємо малоймовірний випадок, коли протягом рейсу на деяких перегонах маршруту, окрім першого та останнього, у транспортному засобі не перебувало жодного пасажирів. У такому разі МКП розпадається на декілька незв'язних компонент.

Значення коефіцієнтів асортативності досліджуваних МКП свідчать, що вони переважно є близькими до некорельованих мереж для маршрутів з пасажиромісткістю транспортних засобів 22 ... 40 пасажирів та асортативними для маршруту з пасажиромісткістю 100 пасажирів. Це можна пояснити тим, що при використанні на маршруті рухомого складу великої пасажиромісткості кількість пасажирів, що входять до нього на зупинці, є близькою до кількості пасажирів, що вже знаходяться у салоні, у той час як для рухомого складу середньої та малої пасажиромісткості ці кількості є суттєво відмінними.

З точки зору ризику передачі захворювання пасажирів при користуванні громадським транспортом визначальним є середня кількість контактів пасажирів з іншими пасажирів під час поїздки, яка у прийнятій моделі відповідає середній

Таблиця 2

Усереднені характеристики МКП по обстежених маршрутах

Показник	Період часу	Маршрут			
		1	2	3	4
1. Середня кількість вершин мережі $n(G)$	пік	19,27	32,22	42,53	129,53
	міжпік	15,18	27,00	39,08	118,84
	доба	17,40	29,71	41,19	123,56
2. Середня кількість ребер мережі E	пік	229,79	473,04	863,47	5297,8
	міжпік	125,02	311,52	708,25	4102,8
	доба	181,77	395,38	803,39	4630,0
3. Середня степінь вершини $\langle k \rangle$	пік	17,74	28,1	36,9	73,4
	міжпік	13,9	22,26	35,28	57,28
	доба	15,98	25,3	36,26	64,38
4. Середня довжина найкоротшого шляху $\langle l \rangle$	пік	1,045	1,101	1,139	1,619
	міжпік	1,017	1,147	1,072	1,869
	доба	1,032	1,123	1,113	1,759
5. Кластерний коефіцієнт C	пік	0,973	0,950	0,939	0,845
	міжпік	0,990	0,935	0,961	0,827
	доба	0,981	0,943	0,948	0,835
6. Коефіцієнт асортативності r	пік	-0,079	-0,028	-0,036	0,395
	міжпік	-0,061	-0,068	-0,035	0,441
	доба	-0,072	-0,047	-0,036	0,421

степені вершини $\langle k \rangle$. Зрозуміло, що на фактичні значення $\langle k \rangle$ рейсової МКП впливають особливості формування пасажиропотоків на певному маршруті у певний період часу, втім можна зробити припущення, що у загальному випадку середня кількість контактів пасажирів за рейс залежить від обсягу перевезень пасажирів за рейс Q , пасажиромісткості рухомого складу q , та показників змінюваності пасажирів у рухомому складі протягом рейсу. Числовою характеристикою останнього може служити коефіцієнт змінюваності пасажирів $k_{зм}$, який визначається за формулою:

$$k_{зм} = \frac{l_M}{\bar{l}} = \frac{Q}{\bar{q}}, \quad (7)$$

де l_M – довжина маршруту, км;

\bar{l} – середня відстань поїздки пасажирів за рейс, км;

\bar{q} – середня кількість фактично використаних пасажиро-місць за рейс, яку назвемо рейсовою ефективною пасажиромісткістю рухомого складу (РЕПМ).

Оскільки у нашому дослідженні пасажиромісткість рухомого складу не є достатньо варіативною, дискретною і представлена лише чотирма значеннями, умовно приймемо в якості фактичної пасажиромісткості рухомого складу саме РЕПМ, який у відповідності до (7) можна розрахувати за формулою:

$$\bar{q} = \frac{Q \cdot \bar{l}}{l_M} \quad (8)$$

Складові формули (8) можна знайти для кожного обстеженого рейсу, використовуючи рейсову ММПК за відомою довжиною перегонів маршруту.

На рис. 3 наведені залежності середньої кількості контактів одного пасажирів за рейс від обсягу перевезених пасажирів за рейс та рейсової ефективною пасажиромісткості рухомого складу (обсяг вибірки $n=213$ пар даних).

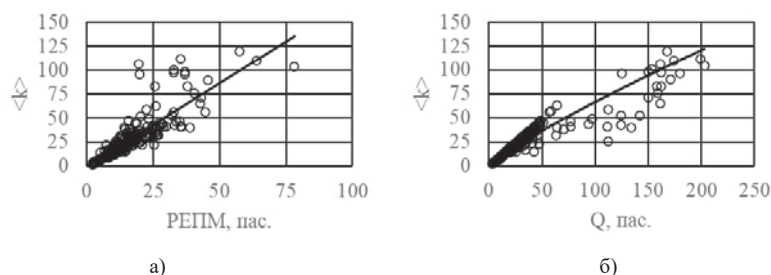


Рис. 3. Залежність середньої кількості контактів пасажирів від рейсової ефективною пасажиромісткості рухомого складу (а) та обсягу перевезень пасажирів за рейс (б)

Аналіз залежностей, наведених на рис. 3, свідчить, що середня кількість контактів пасажирів за рейс лінійно зростає при зростанні РЕПМ (розрахунковий лінійний коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,713$). Залежність середньої кількості контактів пасажирів від обсягу перевезень пасажирів за рейс є прямою лінійною для рухомого складу ефективною пасажиромісткістю до $q \approx 50$ пасажирів, після чого має тенденцію до нелінійного зростання при збільшенні значень РЕПМ ($R^2 = 0,864$ для степеневої моделі з показником степеня меншим за одиницю та $R^2 = 0,859$ для лінійної моделі).

Висновки. В результаті моделювання та дослідження рейсових мереж контактів пасажирів на підставі результатів обстеження пасажирських потоків на маршрутах міського громадського транспорту міста Запоріжжя виявлено, що досліджувані мережі контактів пасажирів мають властивості мереж «тісного світу» Вотса-Строгаца з великими значеннями кластерного коефіцієнту та малим значенням середньої довжини найкоротшого шляху у порівнянні з розмірами мережі. Це дає можливість застосувати для аналізу ризику передачі інфекційних захворювань під час користування громадським транспортом результатів щодо механізмів поширення інфекцій у подібних мережах іншої природи походження. В якості показника умовного ризику захворювання пасажира прийнято середню кількість контактів пасажира з іншими пасажирами під час маршрутної поїздки. Дослідженнями встановлено, що умовний ризик захворювання пасажира під час поїздки міським громадським транспортом знаходиться у прямій лінійній залежності від середньої кількості фактично використаних пасажиромісць у рухомому складі за рейс та нелінійно зростає в залежності від обсягу перевезень пасажирів за рейс. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування режимів роботи та ефективності заходів щодо обмеження користування громадським транспортом під час пандемії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кузькін О.Ф., Райда І.М., Лебідь О.С. Проблематика функціонування транспортної інфраструктури під час епідемічних спалахів – Транспортні технології та безпека дорожнього руху. Збірник тез доповідей Четвертої всеукраїнської науково-практичної конференції 13–14 квітня 2023 р., Запоріжжя [Електронний ресурс] – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2023, 33-35 с. URL: http://eir.zp.edu.ua/bitstream/123456789/9941/1/Transport_technologies.pdf
2. Qian X., Sun L., Ukkusuri S.V. Scaling of contact networks for epidemic spreading in urban transit systems. *ResearchGate*, February 2021, 11(1):4408. doi:10.1038/s41598-021-83878-7
3. Qian X., Ukkusuri S.V. Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion. *Cornell University*, May 2020, arXiv: 2005.04583. doi:10.48550/arXiv.2005.04583
4. Ku D., Yeon C., Lee S., Lee K., Hwang K., Li Y.C., Wong S.C. Safe traveling in public transport amid COVID-19. *Science Advances*, October 2021, Vol. 7, Issue 43. doi: 10.1126/sciadv.abg3691
5. Advice for the public: Coronavirus disease (COVID-19) [Electronic resource]. URL: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public> (accessed: 07.12.2024)
6. Musselwhite Ch., Aveneri E., Susilo Y. The Coronavirus Disease COVID-19 and implications for transport and health. *Journal of Transport & Health*, April 2020, 16(1): 100853. doi: 10.1016/j.jth.2020.100853
7. Mo B., Feng K., Shen Yu, Tam C., Li D., Yin Y., Zhao J. Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, January 2021, Volume 122:102893. doi: 10.1016/j.trc.2020.102893
8. Kumar P., Khani A., Lind E., Levin J. Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data. *Transportation Research Record Journal*, February 2021, Vol. 2675(6). doi: 10.1177/0361198120985133

9. Luo Qi, Gee M., Piccoli B., Work D., Samaranayake S. Managing public transit during a pandemic: The trade-off between safety and mobility. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, May 2022, Volume 138:103592. doi: 10.1016/j.trc.2022.103592
10. Tapiador L., Gomez J., Vassallo J.M. Exploring the relationship between public transport use and COVID-19 infection: A survey data analysis in Madrid Region. *Sustainable Cities and Society*, May 2024, Volume 104:105279. doi: 10.1016/j.scs.2024.105279
11. Pastor-Satorras R., Vespignani A. Epidemic dynamics in finite size scale-free networks. *Physical Review E*, March 2002, Vol. 65:035108. doi: 10.1103/PhysRevE.65.035108
12. Zhang X., Sun G.-Q., Zhu Y.-X., Ma J. Epidemic dynamics on semi-directed complex networks. *Mathematical Biosciences*, October 2013, Vol. 246(2). doi: 10.1016/j.mbs.2013.10.001
13. Barrat A., Barthelemy M., Pastor-Satorras R., Vespignani A. The architecture of complex weighted networks. *Applied Physical Sciences*, March 2004, 101(11)3774-3752. doi: 10.1073/pnas.04000871
14. Lü L., Chen D.-B., Zhou T. The small world yields the most effective information spreading. *New Journal of Physics*, December 2011, abs/1107.0429(12). doi: 10.1088/1367-2630/13/12/123005
15. Sun L., Axhausen K.W., Lee D.-H., Huang X. Understanding metropolitan patterns of daily encounters. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, January 2013. Vol. 110, № 34. doi: 10.1073/pnas.1306440110
16. Bota A., Gardner L.M., Khani A. Identifying Critical Components of a Public Transit System for Outbreak Control. *Networks and Spatial Economics*, December 2017, 17(1). doi: 10.1007/s11067-017-9361-2
17. Організація автобусних перевезень у містах: навч. посібник / О. С. Ігнатенко, В. С. Маруніч. Український транспортний ун-т. – К. : [б.в.], 1998. – 193 с.
18. Складні мережі / [Ю. Головач, О. Олемської, К. фон Фербер та ін.] *Журнал фізичних досліджень*, 2006, Т. 10, № 4, С. 247-289.
19. Кузькін О.Ф. Розвиток маршрутних мереж громадського транспорту великих міст України. *Наукові нотатки*, 2014, № 46, С. 332–340.

REFERENCES

1. Kuzkin O.F., Raida I.M., Lebid O.S. (2023) Problematyka funktsionuvannia transportnoi infrastruktury pid chas epidemichnykh spalakhiv. [Problems of functioning of transport infrastructure during epidemic outbreaks] – Transportni tekhnolohii ta bezpeka dorozhnoho rukhu. Zbirnyk tez dopovidei Chetvertoi vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii 13–14 kvitnia 2023 r., Zaporizhzhia [Transport technologies and road safety. Collection of abstracts of the Fourth All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, April 13–14, 2023, Zaporizhzhia] [Electronic resource]. [in Ukrainian].
2. Qian X., Sun L., Ukkusuri S.V. (2021) [Scaling of contact networks for epidemic spreading in urban transit systems]. [ResearchGate], February, 11(1):4408.
3. Qian X., Ukkusuri S.V. (2020) [Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion]. [Cornell University], May, arXiv: 2005.04583.

4. Ku D., Yeon C., Lee S., Lee K., Hwang K., Li Y.C., Wong S.C. (2021) [Safe traveling in public transport amid COVID-19]. [Science Advances], October, Vol. 7, Issue 43.
5. Advice for the public: Coronavirus disease (COVID-19) (2024) [Electronic resource].
6. Musselwhite Ch., Aveneri E., Susilo Y. (2020) [The Coronavirus Disease COVID-19 and implications for transport and health]. [Journal of Transport & Health], April, 16(1): 100853.
7. Mo B., Feng K., Shen Yu, Tam C., Li D., Yin Y., Zhao J. (2021) [Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network]. [Transportation Research Part C: Emerging Technologies], January, Volume 122:102893.
8. Kumar P., Khani A., Lind E., Levin J. (2021) [Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data]. [Transportation Research Record Journal], February, Vol. 2675(6).
9. Luo Qi, Gee M., Piccoli B., Work D., Samaranayake S. (2022) [Managing public transit during a pandemic: The trade-off between safety and mobility]. [Transportation Research Part C: Emerging Technologies], May, Volume 138:103592.
10. Tapiador L., Gomez J., Vassallo J.M. (2024) [Exploring the relationship between public transport use and COVID-19 infection: A survey data analysis in Madrid Region]. [Sustainable Cities and Society], May, Volume 104:105279.
11. Pastor-Satorras R., Vespignani A. (2002) [Epidemic dynamics in finite size scale-free networks]. [Physical Review E], March, Vol. 65:035108.
12. Zhang X., Sun G.-Q., Zhu Y.-X., Ma J. (2013) [Epidemic dynamics on semi-directed complex networks]. [Mathematical Biosciences], October, Vol. 246(2).
13. Barrat A., Barthelemy M., Pastor-Satorras R., Vespignani A. (2004) [The architecture of complex weighted networks]. [Applied Physical Sciences], March, 101(11)3774-3752.
14. Lü L., Chen D.-B., Zhou T. (2011) [The small world yields the most effective information spreading]. [New Journal of Physics], December, abs/1107.0429(12).
15. Sun L., Axhausen K.W., Lee D.-H., Huang X. (2013) [Understanding metropolitan patterns of daily encounters]. [Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.], January, Vol. 110, № 34.
16. Bota A., Gardner L.M., Khani A. (2017) [Identifying Critical Components of a Public Transit System for Outbreak Control]. [Networks and Spatial Economics], December, 17(1).
17. Ihnatenko O. S., Marunych V. S. (1998) Orhanizatsiia avtobusnykh perevezen u mistakh. [Organization of bus transportation in cities]. Study Guide. Ukrainian Transport University – Kyiv : [w.p.] – 193 p. [in Ukrainian].
18. Holovach Yu., Oliemskoi O., fon Ferber K. etc. (2006) Skladni merezhi. [Complex networks]. Zhurnal fizychnykh doslidzhen. [Journal of Physical Research], Vol. 10, № 4, P. 247-289. [in Ukrainian].
19. Kuzkin O.F. (2014) Кузькін О.Ф. Rozvytok marshrutnykh merezh hromadskoho transportu velykykh mist Ukrainy. [Development of public transport route networks in large cities of Ukraine]. Naukovi notatky. [Scientific notes], № 46, C. 332–340. [in Ukrainian].