

О.Ф. Кузькін

Запорізький національний технічний університет

ВПЛИВ ТОПОЛОГІЇ МАРШРУТНОЇ МЕРЕЖІ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Досліджено показники розвитку маршрутних мереж міського електричного транспорту крупних міст України за різного представлення цих мереж методами теорії графів. Запропоновано показники, що виражають результати пасажирських перевезень міського громадського транспорту з урахуванням лінійного розміру його маршрутної мережі. Встановлено наявність значимого кореляційного зв'язку між топологічними показниками розвитку маршрутних мереж та результативними показниками пасажирських перевезень електричного транспорту у розглянутих містах.

Ключові слова: пасажирські перевезення, маршрутна мережа, теорія графів, кореляційно-регресійний аналіз.

А.Ф. Кузькин

Запорожский национальный технический университет

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МАРШРУТНОЙ СЕТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Исследованы показатели развития маршрутных сетей городского электрического транспорта в крупных городах Украины при разном представлении этих сетей методами теории графов. Предложены показатели, выражающие результаты пассажирских перевозок городского общественного транспорта с учетом линейных размеров ее маршрутной сети. Установлено наличие значимой корреляционной связи между топологическими показателями развития маршрутных сетей и результативными показателями пассажирских перевозок в рассмотренных городах.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, маршрутная сеть, теория графов, корреляционно-регрессионный анализ.

O. Kuz'kin

Zaporizhzhia National Technical University

IMPACT OF TRANSIT NETWORK TOPOLOGY ON RESULT INDICATORS OF PUBLIC TRANSIT PERFORMANCE

Development indicators of transit networks of city electric transport in the large Ukrainian cities at different representation of these networks are investigated by methods of the graph theory. The indicators which express the results of public transit activity taking into account the linear sizes of route network are offered. Existence of the significant correlation between topological indicators of route network and performance indicators of public transit in the considered cities is established.

Keywords: public transit, transit network, graph theory, correlation, regression analyses.

Вступ і постановка проблеми. Масові пасажирські перевезення у сучасних містах виконуються здебільшого за маршрутною технологією, яка застосовується при відносно сталих пасажиропотоках і передбачає організацію руху транспортних одиниць по незмінних маршрутах у вигляді послідовності рейсів, що повторюються, протягом певного періоду доби або дня тижня. Сукупність усіх маршрутів певного виду пасажирського транспорту, що цілком знаходяться у межах обслуговуваної міської території, представляє собою його *маршрутну мережу*. Сукупність маршрутних мереж різних видів транспорту міста, спільно з узгодженими у часі режимами руху на окремих маршрутах, утворюють міську маршрутну систему [1].

Конфігурація маршрутної мережі та окремих маршрутів, що її складають, впливають на низку показників, що відбивають якість та ефективність процесу перевезень пасажирів в цілому. До показників, що визначають ступінь розвитку маршрутної мережі, зазвичай відносять *щільність маршрутної мережі* δ (відношення довжини маршрутної мережі L_m до площі території міста F_c , що нею обслуговується) та *маршрутний коефіцієнт* k_m (відношення сумарної довжини маршрутів до довжини маршрутної мережі)[2]. Щільність маршрутної мережі визначає тривалість підходу пасажирів до ліній міського громадського транспорту. Маршрутний коефіцієнт опосередковано впливає на рівень пересадочності поїздок. Крім того, щільність маршрутної мережі та маршрутний коефіцієнт безпосередньо впливають на величину середнього мережевого інтервалу руху пасажирського транспорту і, відповідно, на середню тривалість очікування пасажирами посадки на зупинках.

Окрім витрат часу пасажиром на пересування, конфігурація, а у більш широкому сенсі, топологія маршрутної мережі впливає також на результуючі показники діяльності транспортних підприємств, що виражаються, зокрема, у питомих витратах на перевезення одного пасажиром на мережі. Втім, згадані вище показники розвитку маршрутних мереж не дають можливість оцінити характер і ступінь цього впливу аналітично. При цьому у зменшенні питомих витрат на перевезення зацікавлені також пасажиром, для яких вони визначають вартість поїздки і, таким чином, є одним з показників якості надання транспортних послуг, доступності і привабливості міського громадського транспорту для потенційних користувачів.

Таким чином, **метою роботи** ємпіричнодослідження порівняльний аналіз топології маршрутних мереж міського громадського транспорту з позицій теорії графів, змістовний аналіз топологічних показників мереж та дослідження їх впливу на результативні показники роботи транспорту.

Результати досліджень.

Для проведення топологічного аналізу маршрутних зручним є представлення їх у вигляді простого графа [3], вершинами якого є зупинки маршрутного пасажирського транспорту, а ребра – перегони між ними. Таке традиційне представлення маршрутних мереж є найпоширенішим і широко застосовується при їх представленні у пам'яті ЕОМ та сучасних геоінформаційних системах. Однак, таке представлення є не єдиним. Дослідниками запропоновано ще низку представлень маршрутних мереж у вигляді графів [4], серед яких, зокрема, так звані, *L*-простір та *P*-простір (рис. 1).

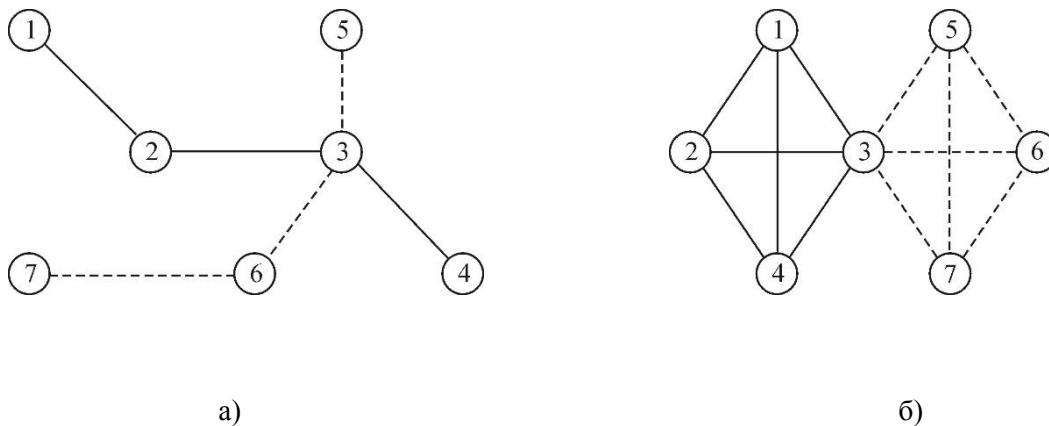


Рис. 1. Представлення міської маршрутної мережі у *L*-просторі (а) та *P*-просторі (б)

У наведеному на рис. 1 фрагменті маршрутної мережі наявні два маршрути (1–2–3–4 та 5–3–6–7). При цьому у мережі, представленій у *L*-просторі (рис. 1, а), ребра графа представляють собою перегони між зупинками, тож дві зупинки є суміжними і зв'язані ребром тільки у випадку, якщо між ними можна проїхати (без проміжних зупинок) хоча б одним з маршрутів маршрутної мережі. У випадку представлення цього ж фрагменту мережі у *P*-просторі (рис. 1, б), вершини графа будуть зв'язані ребром тільки у випадку, якщо між відповідними зупинками існує можливість безпересадочної поїздки на хоча б одному з маршрутів мережі. Таким чином, у цьому просторі маршрути представляються повними підграфами (кліками), зв'язок між якими здійснюється у вершинах (зупинках), на яких можлива пересадка з одного маршруту на інший.

Виходячи з визначення вищезазначених просторів можна зробити висновок, що топологічні характеристики маршрутної мережі, представлені у *L*-просторі визначають лінійні показники поїздки пасажиром, зокрема, довжину поїздки. При цьому, оскільки розглядається незважений граф, довжина шляху буде вимірюватися у кількості перегонів між зупинками, які необхідно подолати пасажиром під час поїздки. Аналогічні характеристики маршрутної мережі, представлені у *P*-просторі визначають пересадочність сполучень. Очевидно, якщо граф маршрутної мережі, представлені у *P*-просторі є повним, то всі поїздки на даній мережі можна виконати без пересадок.

Для дослідження і аналізу графів маршрутних мереж пропонується низка показників [5], серед яких з точки зору транспортного планування і управління пасажирськими перевезеннями слід відзначити наступні:

1) середня $\langle l \rangle$ і максимальна L_{\max} довжина найкоротшого шляху на мережі визначають її лінійні розміри. Величина $\langle l \rangle$ розраховується як середнє арифметичне найкоротших шляхів між всіма парами вершин мережі, тобто

$$\langle l \rangle = \frac{2}{V(V-1)} \sum_{\substack{j=1 \\ i>j}}^V l_{ij}, \quad (1)$$

де V – кількість вершин мережі;

l_{ij} – найкоротший шлях між вершинами i та j , виражений у кількості ребер;

2) степінь складності мережі β визначає середню кількість ребер мережі, що припадає на одну її вершину, тобто

$$\beta = \frac{E}{V}, \quad (2)$$

де E – кількість ребер мережі;

3) степінь зв'язності мережі γ виражається як відношення між кількістю ребер графа E і максимально можливою кількістю ребер графа E_{\max}

$$\gamma = \frac{E}{E_{\max}} = \frac{2E}{V(V-1)}. \quad (3)$$

Визначимо характер і степінь впливу вищезазначених показників на результативні показники роботи з пасажиропереvezень міського електричного транспорту у п'яти великих містах України, які відносяться до групи крупних міст: Донецька, Запоріжжя, Кривий Ріг, Львова та Одеси. Статистичні дані про показники роботи міського тролейбуса (ТР) і трамвая (Т) цих міст за 2013 рік, отримані з сайту корпорації «Укрелектротранс» (www.corpmet.org.ua) наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники роботи міського тролейбуса і трамвая крупних міст України за 2013 рік

Показник	Значення показника для міста і виду транспорту									
	Донецьк		Запоріжжя		Кривий Ріг		Львів		Одеса	
	ТР	Т	ТР	Т	ТР	Т	ТР	Т	ТР	Т
1. Річний обсяг перевезень пасажирів Q_p , млн. пас.	86,4	63,2	18,3	40,9	22,9	23,7	22,9	35,9	38,1	56,0
2. Середньодобовий випуск рухомого складу на лінію N_{pc}	163,7	113,4	63,4	84	60,8	95,9	55,1	54,1	92	128,2
3. Річні експлуатаційні витрати Z_p , млн. грн.	94,23	94,15	46,52	56,86	63,02	106,0	34,61	54,26	50,82	76,24

4. Загальний річний пробіг рухомого складу L_{pc} , млн. км	8,61	5,73	3,60	4,45	4,48	6,01	3,37	2,70	4,78	6,92
---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Топологічні показники розвитку маршрутних мереж міського тролейбуса і трамвая досліджуваних міст станом на кінець 2013 року у просторах зупинок і пересадок (відповідний нижній індекс показника) наведені у таблиці 2.

За даними, наведеними у табл. 2 можна зробити деякі висновки про розвиток маршрутних мереж електротранспорту у крупних містах України. Так, наприклад, найбільші лінійні розміри має маршрутна мережа одеського трамвая ($L_{\max L} = 75$), найбільшою середньою дальністю поїздки пасажира характеризується маршрутна мережа криворізького тролейбуса ($\langle l_L \rangle = 24,59$), а найменший рівень пересадочності (за умови рівноімовірності поїздок з усіх зупинок) спостерігається у мережі криворізького трамвая, де імовірність безпересадочної поїздки дорівнює $\gamma_p = 0,686$.

Таблиця 2

Показники розвитку маршрутних мереж міського тролейбуса і трамвая крупних міст України

Показник	Значення показника для міста і виду транспорту									
	Донецьк		Запоріжжя		Кривий Ріг		Львів		Одеса	
	ТР	Т	ТР	Т	ТР	Т	ТР	Т	ТР	Т
$V_L = V_P$	183	117	97	85	173	70	106	57	150	202
E_L	204	121	100	88	188	75	134	74	191	215
E_P	2979	1559	1670	1561	2949	1657	1469	708	2832	2803
$\langle l_L \rangle$	19,18	22,16	15,11	15,4	24,59	14,59	14,20	6,22	12,14	23,89
$\langle l_P \rangle$	2,703	2,218	1,670	1,627	2,480	1,314	2,013	1,606	1,951	2,586
$L_{\max L}$	50	64	41	40	72	41	43	17	33	75
β_L	1,115	1,034	1,031	1,035	1,087	1,071	1,264	1,298	1,273	1,064
β_P	16,28	13,32	17,22	18,36	17,05	23,67	13,86	12,42	18,88	13,88
$\gamma_L, \times 10^3$	12,25	17,83	21,48	24,65	12,64	31,06	24,08	46,37	17,09	10,59
γ_P	0,179	0,230	0,359	0,437	0,198	0,686	0,264	0,444	0,253	0,138

Для дослідження впливу характеру і степені впливу топологічних показників розвитку маршрутних мереж електротранспорту досліджуваних міст на його показники роботи застосуємо метод кореляційно-регресійного аналізу. Зважаючи на відмінності у лінійних розмірах досліджуваних мереж, в якості результативної ознаки пропонується використовувати три показники:

1) *добова продуктивність одиниці рухомого складу* $P_{\text{доб}}$ (пас./добу), що визначається як відношення добового обсягу перевезень пасажирів до середньодобового випуску рухомого складу на лінію N_{pc} , тобто

$$P_{\text{доб}} = \frac{Q_p}{365 \cdot N_{pc}}; \quad (4)$$

2) *приведений питомий пробіг* $L_{\text{пр.л.}}$ (км/пас.), що визначається як відношення річного пробігу рухомого складу на мережі L_{pc} до річного обсягу перевезень пасажирів Q_p з урахуванням лінійних розмірів мережі, тобто

$$L_{\text{пр.л.}} = \frac{L_{pc}}{Q_p \cdot \langle l_L \rangle}; \quad (5)$$

3) *приведені питомі витрати на перевезення одного пасажирів* $Z_{\text{пр.л.}}$ (грн/пас.), що визначаються як відношення річних експлуатаційних витрат Z_p до річного обсягу перевезень пасажирів Q_p з урахуванням лінійних розмірів мережі, тобто

$$Z_{\text{пр.л.}} = \frac{Z_p}{Q_p \cdot \langle l_L \rangle}. \quad (6)$$

У табл. 3 наведені коефіцієнти парної кореляції Пірсона R між топологічними показниками розвитку досліджуваних маршрутних мереж та наведеними вище результативними ознаками. Статистично значимі кореляції на рівні значимості $\alpha = 0,05$ позначені напівжирним шрифтом.

Таблиця 3

Значення парних коефіцієнтів кореляції Пірсона між факторними і результативними ознаками

Ознаки	$\langle l_p \rangle$	$L_{\text{max}L}$	β_L	β_p	γ_L	γ_p
$P_{\text{доб}}$	0,252	-0,194	0,357	-0,726	0,272	-0,296
$L_{\text{пр.л.}}$	-0,802	-0,608	0,261	0,562	0,626	0,799
$Z_{\text{пр.л.}}$	-0,792	-0,582	0,196	0,453	0,779	0,875

Аналіз кореляційної матриці свідчить про те, що зі збільшенням середньої довжини найкоротшого шляху мережі, представленої у P -просторі $\langle l_p \rangle$, *приведений питомий пробіг* $L_{\text{пр.л.}}$ і *приведені питомі витрати на перевезення одного пасажирів* $Z_{\text{пр.л.}}$ зменшуються. У той же час ці показники збільшуються при збільшенні степені зв'язності мережі, представленої у тому ж просторі. При цьому природно значення $\langle l_p \rangle$ та γ_p є корельованими між собою, оскільки при збільшенні середньої кількості пересадок на випадково обраному шляху між двома зупинками на мережі імовірність здійснення пасажиром в мережі поїздки без пересадки зменшується (коефіцієнт парної кореляції $R = -0,91$).

Добова продуктивність рухомого складу $P_{\text{доб}}$ зменшується при збільшенні степені складності мережі, представленої у P -просторі β_p . Це є наслідком того, що більш розгалужена маршрутна мережа, на кожній зупинці якої наявна більша кількість варіантів поїздки пасажирів без пересадок, є більш складною в обслуговуванні з точки зору організації руху рухомого складу.

Приведені питомі витрати на перевезення одного пасажирів $Z_{np.n.}$ збільшуються при збільшенні степені зв'язності мережі, представленої у L -просторі γ_L . Оскільки мінімальні значення степені зв'язності мають деревоподібні мережі, більші значення степені зв'язності мережі γ_L відповідають маршрутним мережам, які є більш розгалуженими з точки зору можливих напрямків і шляхів руху рухомого складу і, відповідно, є більш витратними при їх обслуговуванні.

На рис. 1 наведені оціночні показники регресійних моделей, що можуть бути використані для оцінки і прогнозування результативних показників роботи електричного транспорту у досліджуваних містах.

Таблиця 4

Результати регресійного аналізу

Рівняння регресії	Коефіцієнт детермінації R^2	Стандартна похибка апроксимації S	Значення критерію Фішера	
			розрахункове	критичне
$P_{доб} = 25,17 - 0,00717\beta_p$	0,527	2,486	8,91	5,32
$L_{np.n.} = 2,81 \times 10^{-3} + 0,0202\gamma_p$	0,639	2,617	14,14	
$Z_{np.n.} = (0,722 + 6,01\gamma_L) \times 10^{-3}$	0,607	0,055	12,36	
$Z_{np.n.} = -0,0091 + 0,4418\gamma_p$	0,765	0,042	26,09	

На підставі результатів регресійного аналізу можна зробити висновок, що отримані лінійні парні регресійні залежності є достатньо точними і статистично адекватними, що дозволяє використовувати їх для оцінки результативних показників роботи міського електричного транспорту досліджуваних міст при зміні конфігурації їх маршрутних мереж.

Висновки. В результаті проведених досліджень виконано порівняльний аналіз розвитку маршрутних мереж міського електричного транспорту у великих містах України за різних способів представлення цих мереж з використанням показників, що ґрунтуються на положеннях теорії графів. Встановлено наявність статистично значимого кореляційного зв'язку між топологічними показниками їх розвитку та запропонованими результативними показниками пасажирських перевезень, що враховують лінійні характеристики досліджуваних мереж.

Література

1. Ефремов И.С. Теория городских пассажирских перевозок / И.С. Ефремов, В.М. Кобозев, В.А. Юдин. – М. : Высшая школа, 1980. – 535 с.
2. Зильберталь, А. Х. Трамвайное хозяйство: руководство для работников трамвая и учащихся [Текст] / А. Х. Зильберталь. – М.-Л. : ОГИЗ-Гострансиздат, 1932. – 304 с.
3. Харрари, Ф. Теория графов [Текст] / Ф. Харрари. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.
4. Von Ferber, C. Public transport networks: empirical analysis and modeling [Text] / C. Von Ferber, T. Holovatch, Y. Holovatch [et al.] // The European Physical Journal B. – 2009. – Vol. 68. – № 2. – P. 261-275.
5. Garrison, W. L. The structure of Transportation networks [Text] / W. L. Garrison, D. F. Marble. – Evanston : Transportation Center Northwestern University, 1962. – 100 p.

Стаття надійшла до редакції 23.04.2016