

УДК 656.072, 656.078
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/32>

Півторак Г.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Гіць І.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Жила М.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛІ

Транспортно-пересадкові вузли (ТПВ) є важливим елементом міської транспортної системи, місцем взаємодії міського та позаміського транспорту. Вивчення характеристик розподілу пасажирів між зонами ТПВ та того, яким видом переміщень користуються пасажирів при русі в напрямках «місто-ТПВ» та «ТПВ-місто», дозволить оптимізувати пропускну здатність вузла, покращити рівень обслуговування пасажирів та функціонування транспортної системи міста загалом.

ТПВ «Головний залізничний вокзал» у Львові поєднує в собі зони позаміського залізничного та автобусного транспорту, зупинки міських трамвайних та автобусних маршрутів, місця стоянки таксі та паркування приватних автомобілів. На основі збору даних, проведеного в робочі дні тижня, отримано інформацію про обсяги переміщень між окремими зонами ТПВ та розподіл прибуттів пасажирів з міської території у ТПВ і навпаки між режимами переміщення (громадський транспорт, таксі, власний транспорт та піший рух). Визначено вплив інтенсивності прибуття та відправки позаміських залізничних і автобусних маршрутів, а також частоти руху маршрутів міського громадського транспорту, на обсяги пасажиропотоків у ТПВ. В програмному середовищі PTV Visum проведено моделювання добового пасажиропотоку у ТПВ та отримано матриці кореспонденцій між зонами вузла з розподілом за годинами доби. Функція корисності переміщень між окремими зонами враховує альтернативи та характеристики подальших варіантів переміщення.

Отримані результати можна використати для оптимізації функціонування транспортно-пересадкового вузла: виявлення «вузьких» місць та збільшення їх пропускну здатності, коригування часу відправки/прибуття позаміських автобусних маршрутів з врахуванням розкладів руху залізничного транспорту, оптимізації частоти руху транспортних засобів на міських маршрутах громадського транспорту, що обслуговують ТПВ.

Ключові слова: транспортно-пересадковий вузол, пасажиропотік, розподіл переміщень, моделювання, PTV Visum.

Постановка проблеми. Функціонування транспортної системи міста загалом залежить від функціонування її окремих елементів. Одним з таких елементів є транспортно-пересадкові вузли, які знаходяться в межах міської території. ТПВ акумулюють в своїх межах значні обсяги пасажиропотоків, причому накопичення їх відбувається не рівномірно, а швидше стрибкоподібно (наприклад, у зв'язку з прибуттям потяга на станцію).

Вибір користувачами способу свого переміщення до та з ТПВ залежатиме від розташування вузла, періоду доби, видів транспорту у вузлі та характеристик їх роботи. В сукупності ці чинники визначатимуть ефективність взаємодії усіх видів сполучення, представлених у транспортно-пересадковому вузлі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Організація роботи транспортно-пересадкових вузлів в межах міста відбувається у взаємозв'язку з діяльністю всієї міської транспортної системи. Виділяють два рівні цього процесу: організація пасажиропотоків, що в'їжджають в місто, та розподіл цих потоків міською територією [1].

Дослідженням функціонування ТПВ займаються як українські, так і закордонні дослідники. В роботі [2] автори формують перелік чинників, які визначають ефективність функціонування пасажирського хабу, а також пропонують вагові коефіцієнти впливу кожного з цих індикаторів (на основі аналізу експертних оцінок).

Автори [3] прогнозують сумарні річні пасажиропотоки у ТПВ на основі соціальних та полі-

тичних чинників, що характеризують місто, та з урахуванням статистичних даних про обсяги пасажиропотоків у ТПВ в попередні періоди. Методами прогнозування є генетичний алгоритм та нейронні мережі.

Нейронні мережі застосовуються для прогнозування пасажиропотоку в залізничному вузлі (наприкладі залізничної станції в Пекіні) і авторами [4]. В дослідженні враховуються такі чинники, як погодні умови, наявність свят (канікули, державні свята, вихідні), а також коефіцієнти нерівномірності пасажиропотоку протягом дня, визначені на основі даних попередніх періодів.

Автори [5] досліджували переміщення пішохідних потоків в межах транспортно-пересадкового вузла для визначення «вузьких» місць, де виникають найбільші затримки, з використанням аналітичного та імітаційного моделювання (в програмному середовищі PTV Vissim/Viswalk). Таке моделювання доцільно застосовувати при оцінці функціонування, зокрема, новопроєктованих чи реконструйованих ТПВ.

В роботі [6] оцінка функціонування ТПВ проводиться з позиції часу, який проводять пасажирів в кожній із його зон. Визначено, що тривалість перебування у ТПВ та виходу з нього змінюється залежно від дня тижня (робочий, вихідний/святковий чи передсвятковий). Результати роботи можна застосовувати, наприклад, для оцінки пропускної здатності вузла та управління вузлом в періоди нетипового збільшення пасажиропотоку.

Дослідженням часових чинників функціонування транспортно-пересадкового вузла займалися і науковці [7, 8]. На основі даних опитувань щодо тривалості та умов очікування пасажирами ТПВ пересадки формуються рекомендації щодо планування та розмірів зон очікування пасажирів з урахуванням структури пасажиропотоку у ТПВ [7] та пропонується методика розрахунку мінімальної тривалості пересадки у залізничному вузлі [8].

Також проводилися дослідження переміщень пасажирів в межах ТПВ на основі даних стільникового зв'язку. Зокрема, в роботі [9] автори на основі досліджень, проведених в транспортному вузлі Хунцяо (Шанхай), проаналізували подальші напрямки руху пасажирів та визначили, для якої частки користувачів територія ТПВ є частиною їх щоденних маршрутів.

Формулювання цілей статті. Транспортно-пересадкові вузли є пунктами генерації та притягання великих обсягів пасажиропотоків в межах міської транспортної системи. Однак на даний

момент більшість досліджень зосереджено на комплексній оцінці загального пасажиропотоку у транспортно-пересадковому вузлі. Розподіл пасажиропотоку між різними зонами ТПВ при прибутті та відправці є цікавим, але досі недостатньо висвітленим питанням.

Основна ціль дослідження – сформулювати модель розподілу пасажиропотоків між зонами їх відправки з ТПВ в місто та прибуття з міста в ТПВ та визначити чинники, які впливають на кількісні характеристики такого розподілу.

Виклад основного матеріалу. При використанні гравітаційної моделі на основі початкових даних про генеруючу та притягуючу здатність транспортних районів розраховується матриця кореспонденцій між ними. Для коректного розподілу необхідно володіти інформацією про те, як сприймають учасники руху різні параметри свого переміщення (відстань, тривалість, вартість тощо). Математичне відображення цього відбувається з допомогою функції корисності.

Розподіл переміщень між районами відбувається за залежністю [10, ст. 157]:

$$F_{ij} = k_{ij} \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot f(U_{ij}) \quad (1)$$

де Q_i – генеруюча здатність i -ого району відправки;

Z_j – притягуюча здатність j -ого району прибуття;

U_{ij} – значення корисності переміщення між транспортними районами;

k_{ij} – коефіцієнт нормування для переміщень з району i в район j (використовується для стикування сумарних обсягів відправок і прибуттів).

При моделюванні використано функцію корисності типу VoxCox [10, ст. 158]:

$$f(U_{ij}) = e^{\frac{U_{ij}^b - 1}{c}} \quad (2)$$

де a, b, c – параметри функції корисності, які підбираються шляхом порівняння змодельованих результатів з фактичними (отриманими під час натурних обстежень, опитувань тощо).

Корисність переміщення є лінійною комбінацією параметрів, що визначають ступінь впливу на учасника руху різних чинників:

$$U_{ij} = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i \quad (3)$$

Де X_i – чинник, який впливає на вибір користувача;

β_i – коефіцієнт оцінки ступеня впливу чинника на загальну ймовірність вибору

При розподілі переміщень в межах транспортно-пересадкового вузла тривалість чи від-

стань переміщення не має особливого значення для користувача транспортних послуг. Розподіл відбувається залежно від вибору подальшого способу переміщення.

Транспортно-пересадковий вузол «Головний залізничний вокзал» у м. Львові за можливими напрямками розподілу потоків можна поділити на 7 зон: залізничні перони (zone 1), зупинки міських автобусних маршрутів (zone 2), зупинки міжміських автобусних маршрутів (zone 3), зупинки міських трамвайних маршрутів (zone 4), місце зупинки таксі (zone 5), стоянки приватного автотранспорту (zone 6) та умовну зону виходу для осіб, які прибувають з міста в ТПВ чи відправляються з ТПВ в місто пішки (zone 7) – рис. 1.

Основні характеристики цих зон, які визначають їх привабливість для користувача транспортних послуг, подано в табл. 1.

Для отримання фактичного розподілу пішохідних потоків між зонами досліджуваного транспортно-пересадкового вузла проведено натурні обстеження, в ході яких підраховано кількість пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на зупинках ГПТ та в таксі, кількість пішоходів, що здійснюють рух в напрямку до та від автостоянки і до та від виходу в місто. Ці дослідження проводилися з 13:00 до 14:00 год протягом 5 робочих днів тижня у вересні 2021 року. Результати окремих днів відрізняються між собою максимум на 12%, що дозволяє використовувати усереднені значення для подальших обчислень. Відсотковий розподіл між різними способами «виходу» з ТПВ в місто подано на рис. 2а, прибуття з міської території до ТПВ – на рис. 2б.

Найбільшою є різниця між часткою користувачів приватних автомобілів: прибувають у вузол автомобілями 12% користувачів, а відправляються



Рис. 1. Поділ території ТПВ «Головний залізничний вокзал» на зони та їх взаємне розташування

Таблиця 1

Характеристики окремих зон ТПВ «Головний залізничний вокзал»

Зона ТПВ	Характеристика
Зона 1	Залізничний вокзал «Львів» працює цілодобово, протягом доби має 73 відправки у внутрішньому сполученні та 13 – у міжнародному.
Зона 2	Автобусна зупинка ГПТ «Залізничний вокзал» обслуговується 5 маршрутами, середній інтервал руху яких коливається в межах 10 – 20 хв. Початок руху – 6:00, закінчення – 22:00. Зупинка є кінцевою для всіх маршрутів. Вартість проїзду – 10 грн.
Зона 3	З автовокзалу «Двірцевий» відправляються автобуси міжміського та міжнародного сполучення. Внутрішні перевезення виконуються в трьох напрямках. Період роботи – з 6:00 до 24:00. Кількість відправок за добу у внутрішньому сполученні – 64, міжнародних – 31.
Зона 4	Трамвайна зупинка ГПТ «Залізничний вокзал» обслуговується 2 маршрутами, середній інтервал руху яких коливається в межах 10 – 15 хв. Початок руху – 6:00, закінчення – 22:00. Зупинка є кінцевою для всіх маршрутів. Вартість проїзду – 10 грн.
Зона 5	Зона зупинки та стоянки таксі є цілодобовою, вартість проїзду залежить від відстані поїздки та оператора таксі. В межах міста вартість коливається від 40 до 250 грн.
Зона 6	Вартість паркування – 45грн/добу. Година паркування – 25 грн.
Зона 7	ТПВ знаходиться в межах 30 хв пішої ходьби до центру міста.

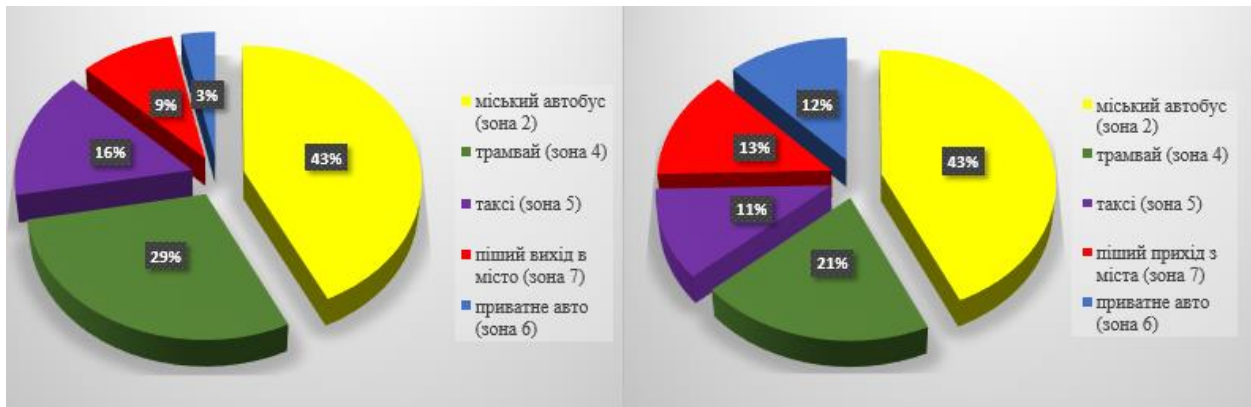


Рис. 2. Розподіл загальної кількості пасажирів, що прибули в ТПВ, між зонами 2 та 4–7

з вузла в місто – тільки 3%. Причиною може бути небажання людей залишати автомобіль на паркувальному майданчику (через вартість паркування чи тривогу за безпеку автомобіля). Тому люди приїжджають не самі, а з кимось, хто забере їх автомобіль.

Розподіл фактичної годинної кількості переміщень між зонами досліджуваного ТПВ подано на рис. 3 (для кращої візуалізації на рисунку зміщене фактичне взаємне розташування зон).

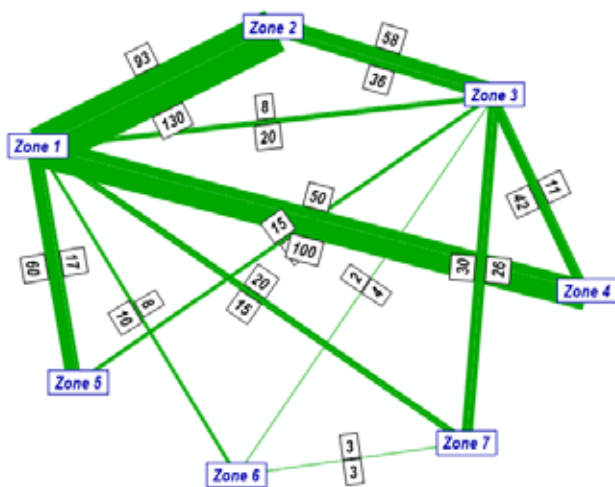


Рис. 3. Годинна кількість переміщень між зонами в межах ТПВ

Наймасовіші пішохідні потоки спостерігаються між залізничним вокзалом та автобусною і трамвайною зупинками громадського транспорту.

Для подальшого моделювання добового обсягу пасажиропотоків у ТПВ проведено аналіз розподілу кількості прибуттів та відправок залізничних потягів та автобусів міжміського сполучення протягом доби (табл. 2).

Нічний часовий період (з 00:00 до 06:00 год) об'єднано, оскільки міський громадський тран-

спорт в цей час не працює, і більшість пасажирів прибувають з міста в ТПВ чи відправляються з ТПВ у місто на таксі. 29% всіх залізничних маршрутів прибувають чи відправляються вночі.

На основі цих даних проведено оцінку нерівномірності пасажиропотоку у ТПВ протягом дня (рис. 4) та розраховано матрицю добових кореспонденцій між зонами ТПВ у PTV Visum.

Добовий обсяг пасажирів, які користуються послугами ТПВ, за результатами моделювання становить 16455 осіб. Аналізуючи зміну обсягів пасажиропотоку в ТПВ протягом доби, можна зробити такі висновки:

- В нічний період доби (з 00:00 до 06:00 год) ТПВ обслуговує в середньому 11% добового пасажиропотоку. Це в основному пасажирів, які переміщуються між зонами 1, 5 та 6 досліджуваного транспортно-пересадкового вузла.

- Протягом дня пасажиропотік розподіляється таким чином: з 6:00 до 7:00 ранку обслуговується 12% добового пасажиропотоку (що пов'язано з найбільшою щільністю прибуттів і відправок потягів в цей період), з 7:00 до 12:00 год обслуговується 25% пасажиропотоку, з 12:00 до 17:00 год – 16%, з 17:00 до 22:00 год – 23%, з 22:00 до 24:00 год – 13%.

Висновки. Транспортно-пересадкові вузли, розташовані в межах міста, забезпечують взаємодію різних видів міського та позаміського транспорту. ТПВ «Головний залізничний вокзал» у м. Львові поєднує на своїй території залізничний вокзал, автовокзал, автобусну та трамвайну зупинки міського громадського транспорту, місця стоянки таксі та приватних автомобілів.

Згідно результатів натурних спостережень в робочі дні тижня, 72% пасажирів, що прибувають в місто, пересідають у ТПВ на міський громадський транспорт. Тих, що прибувають з міської території в транспортно-пересадковий вузол на

ГПТ, 64%. Найбільшою є різниця між напрямками «місто–ТПВ» та «ТПВ–місто» частки користувачів приватних автомобілів: 12% та 3% відповідно. Досить велика частка користувачів таксі – 11 і 16% (порівняно з даними про розподіл переміщень за видами загалом в місті – в межах 3%). Очевидною причиною є функціонування ТПВ в нічний період, коли громадський транспорт не працює.

Серед інших можливих причин: наявність багажу у людей, і, відповідно, незручність переміщення громадським транспортом, особливо при відсутності безпересадкового сполучення.

В програмному середовищі PTV Visum змодельовано добовий пасажиропотік ТПВ (16455 осіб) та отримано матрицю переміщень пасажирів між окремими зонами вузла. З урахуванням інтенсив-

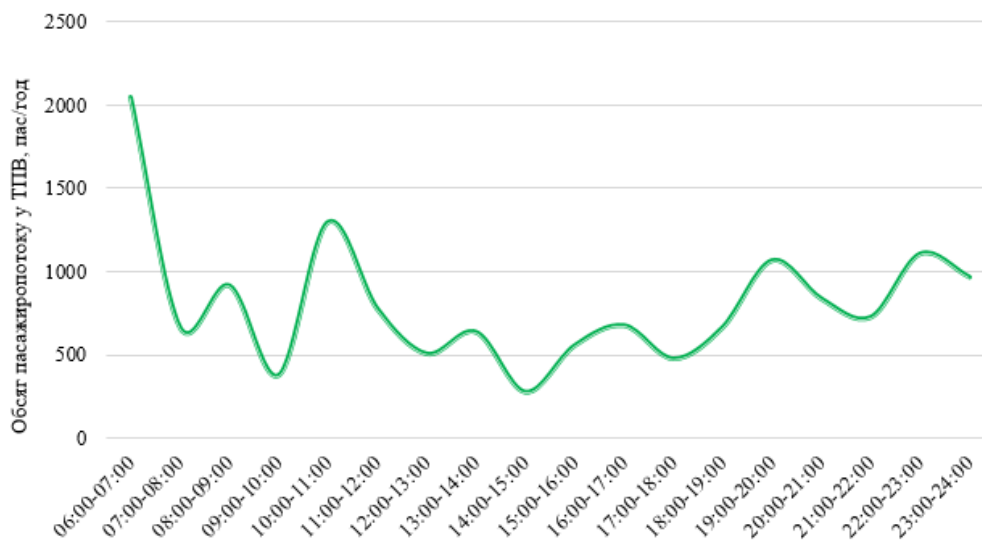


Рис. 4. Денна нерівномірність пасажиропотоків у ТПВ

Таблиця 2

Розподіл кількості відправок та прибуттів позаміських маршрутів ТПВ «Головний залізничний вокзал»

Часовий період доби	Залізничне сполучення			Автобусне сполучення		
	Кількість прибуттів	Кількість відправок	Сума	Кількість прибуттів	Кількість відправок	Сума
00:00 – 06:00	30	25	55	-	-	
06:00-07:00	13	8	21	4	6	10
07:00-08:00	2	4	6	5	4	9
08:00-09:00	5	3	8	6	7	13
09:00-10:00	3	0	3	5	3	8
10:00-11:00	9	3	12	8	7	15
11:00-12:00	2	6	8	4	1	5
12:00-13:00	2	1	3	4	10	14
13:00-14:00	3	2	5	5	7	12
14:00-15:00	1	1	2	4	3	7
15:00-16:00	1	3	4	6	7	13
16:00-17:00	3	2	5	5	9	14
17:00-18:00	2	2	4	6	3	9
18:00-19:00	4	1	5	4	9	13
19:00-20:00	7	3	10	7	5	12
20:00-21:00	1	7	8	6	3	9
21:00-22:00	4	3	7	2	4	6
22:00-23:00	6	5	11	4	4	8
23:00-24:00	3	7	10	1	3	4
Сума	101	86	187	86	95	181

ності прибуття та відправки позаміських автобусних і залізничних маршрутів визначено зміну пасажиропотоку у вузлі з розподілом за годинами доби.

Результати моделювання дозволяють визначати доцільні інтервали руху транспортних засобів на міських маршрутах громадського транспорту, які обслуговують ТПВ, щоб задовільнити попит на цей вид переміщень. Врахування обсягу

пасажиropотоку між зоною залізничних перонів та автобусних платформ дозволить оцінити потребу в узгодженості розкладів руху позаміських маршрутів.

В межах цієї роботи не вивчалось, як змінюється пасажиропотік ТПВ у вихідні чи святкові дні, що може бути завданням подальших досліджень.

Список літератури:

1. Wang X., Rong C. Function-Based Classification Method for Traffic Hub. *Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 97/98. P. 779 – 782.
2. Wei-wen Mao, Shi-wei He. Research on High-speed Railway Hub Passenger Transport System Planning Evaluation System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 587. doi: 10.1088/1755-1315/587/1/012118.
3. Ren X., Li L. Research on Passenger Volume Demand Prediction for External Passenger Transport Hub Based on Genetic Neural Network. *1st International Conference on Transportation Infrastructure and Materials*. 2016. P. 535 – 542.
4. Jing Z., Yin X. Neural Network-Based Prediction Model for Passenger Flow in a Large Passenger Station: An Exploratory Study. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 36876-36884. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972130.
5. Yoongho Ahn, Tomoya Kowada, Hiroshi Tsukaguchi, Upali Vandebona. Estimation of Passenger Flow for Planning and Management of Railway Stations. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 315-330. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.408>.
6. Liu T, Shan J, Liu X, Shang T. Departure efficiency evaluation of a comprehensive transport hub based on Wi-Fi probe data and a multilayer hybrid model. *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17(3):e0264473. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264473>
7. Havlena Ondřej, Jacura Martin, Javořík Tomáš, Svetlík Marián. Area claims of the passengers at mass public transport hubs. *Transport Problems: an International Scientific Journal*. 2013. Vol. 8. P. 83-88.
8. Vojtek Martin, Skrucany Tomas, Kendra Martin, Ponický Ján. Methodology for calculation of minimum transfer time in the transport hub. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235(2)5:00015. doi:10.1051/mateconf/201823500015.
9. Zhong Gang, Yin Tingting, Zhang Jian, He Shanglu, Ran Bin. Characteristics analysis for travel behavior of transportation hub passengers using mobile phone data. *Transportation*. 2019. Vol. 46. doi: 10.1007/s11116-018-9876-5.
10. PTV Vision: VISUM 11.5 Basics – Karlsruhe: PTV AG, 2010. – 756 с.

Pivtorak H.V., Gits I.I., Zhyla M.P. ESTIMATE OF PASSENGER FLOW DISTRIBUTION IN EXTERNAL TRANSPORT HUB

External transport hubs (ETH) are an important element of the urban transport system, a place of interaction between urban and suburban transport. Studying the characteristics of the distribution of passengers between ETH's zones and what mode of movement passengers use when moving in the directions "city-ETH" and "ETH-city", will optimize hub capacity, and improve passenger service and transport system in general.

ETH "Main Railway Station" in Lviv combines zones of suburban rail and bus transport, stops of city tram and bus routes, taxi stands, and parking for private cars. Based on data collection conducted on weekdays, information was obtained on the walking volume between individual zones of the external transport hub and the distribution of passenger arrivals from urban areas to ETH and vice versa between modes of movement (public transport, taxis, own transport, and pedestrian traffic). The influence of the intensity of arrival and departure of the suburban railway and bus routes, as well as the frequency of urban public transport routes on the volume of passenger traffic in ETH is determined. In the software environment of PTV Visum the simulation of daily passenger traffic in ETH was performed and the origin-destination matrices between the zones of the hub with the distribution by hours of the day were obtained. The utility function of movements between individual zones takes into account the alternatives and characteristics of further movement options.

The obtained results can be used to optimize the functioning of the passenger transport hub: identifying "bottlenecks" and increasing their capacity, adjusting the time of departure/arrival of suburban bus routes, taking into account train schedules, and optimizing the frequency of vehicles on urban public transport routes, who serve ETH.

Key words: external transport hub, passenger flow, mode choice, modelling, PTV Visum.