

Поморцева О.Є.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО МАРШРУТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІС

У статті описані нові підходи до проектування транспортного руху у великих містах за допомогою геоінформаційних систем. Україна входить до списку країн з найбільшим показником попиту на громадський транспорт. Це своєю чергою потребує поліпшення існуючих та створення нових транспортних маршрутів. Сучасні транспортні системи досить складні, і це вимагає широкого залучення математичних методів, новітніх технічних засобів контролю і управління. Основні критерії, які необхідно враховувати під час формування маршрутної системи, це: зниження витрат часу пасажирів на поїздки, скорочення кількості пересадок пасажирів, економія витрат за рахунок оптимізації кількості зупинок на маршруті, підвищення швидкості руху.

Час перебування пасажирів у дорозі можна скоротити шляхом виключення проміжних зупинок – формуванням «експрес-маршрутів». Під час планування нових транспортних маршрутів у великих містах використовувалося моделювання за допомогою формування міжрайонних кореспонденцій у транспортних системах. Для моделювання було використано ентропійний підхід. Було знайдено матрицю реалізацій, у якій при заданих обмеженнях і перевагах сумарна ймовірна міра реалізації максимальна. Зупинки громадського транспорту протягом експрес-маршруту проектувалися з урахуванням відстані від місця проживання або роботи пасажирів. Проектування зупинок виконувалося за допомогою побудови буферних зон радіусом 500 метрів навколо точок інтересу. Також під час проектування зупинок було виконано прив'язку до інших видів громадського транспорту та місць роботи.

Розробка нових маршрутів складається з вибору і обґрунтування раціональної траси і проміжних зупинок. За допомогою геоінформаційної системи було запроєктовано «експрес-маршрут» від станції метро «Холодна гора» до станції метро «Пушкінська» у місті Харкові. Використання геоінформаційних технологій (програмного продукту ArcGis) допомогло комплексно вирішити поставлене завдання. Підвищення ефективності проектування транспортного маршруту дозволить заощадити значні кошти та покращити обслуговування пасажирів.

Ключові слова: геоінформаційна система, база геоданих, організація руху, експрес-маршрут, точка інтересу.

Постановка проблеми. Україна входить до списку країн з найбільшим показником попиту на громадський транспорт, особливо на автобуси, а це своєю чергою зумовлює необхідність поліпшення існуючих та створення нових транспортних маршрутів. Тому розробка «експрес-маршрутів» та оптимізація вже існуючих дозволить покращити обслуговування пасажирів шляхом скорочення витрат часу на очікування транспортного засобу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Практика показує, що рівень розвитку суспільства прямо пов'язаний з рівнем розвитку транспортної інфраструктури. В транспортній галузі, як і в інших галузях, головним завданням є підвищення продуктивності. Критерієм продуктивності є середня швидкість пересування пасажирів містом. Перевезення людей по місту транспортними засобами набуває з кожним роком масштабних проблем.

Серед усіх видів транспорту найбільшим попитом користуються автобуси (63%). За ними слідує метро і приміська залізниця (по 16%), які обслуговують масові пасажиропотоки в великих мегаполісах. Трамваї найменш популярні (5%) [1], це пояснюється обмеженістю їх поширення і фактичною наявністю тільки в певній кількості великих міст. Будь-які пасажирські перевезення організовують на певних маршрутах, зумовлених розміром і напрямком пасажиропотоків [2]. Метою міської політики в сфері пасажирських перевезень є гарантоване та ефективне задоволення потреб населення у безпечних та якісних послугах пасажирських перевезень [3]. Основними критеріями, що враховуються під час формування маршрутної системи, є зниження витрат часу пасажирів на поїздки, скорочення кількості пересадок, економія витрат шляхом випрямлення маршрутів і підвищення швидкості руху на них [4; 5].

Прогнозування руху починається із збирання даних про поточний трафік. Дані про трафік поєднуються з іншими відомими даними, такими як населення, зайнятість, сезонність пересування тощо, з метою розробки моделі попиту на трафік для поточної ситуації. Геоінформаційні (ГІС) технології полегшують доступ до динамічних даних і тим самим спрощують вирішення цієї задачі [6].

Постановка завдання. Практично у будь-якому місті можна знайти приклади, коли довжина навіть самого оптимального маршруту перевищує геометрично найкоротшу відстань між пунктами відправлення і призначення. Причина цього – невдала організація руху і недосконале прокладання самого маршруту.

У сучасних ГІС існує цілий ряд інструментів, за допомогою яких можна вирішувати транспортні задачі. Зокрема, планування руху транспортних засобів, розробка нових транспортних маршрутів та зупинок протягом маршруту. Ці роботи складні для автоматизації, а використання ГІС під час розв'язання цих завдань дозволить отримати більш якісний результат. Під час розробки нових, більш досконалих автобусних маршрутів слід враховувати економічну доцільність та всі складники, які надалі призведуть до покращення обслуговування пасажирів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розробка нових автобусних маршрутів – вибір і обґрунтування раціональної траси, напрямків руху, кінцевих пунктів і проміжних зупинок повинно проводитися з особливою ретельністю і необхідним техніко-економічним обґрунтуванням, оскільки система автобусних маршрутів значно впливає як на умови і зручність перевезення пасажирів, так і на швидкість і безпеку руху. Вибір напрямків руху автобусів, а також кінцевих і проміжних пунктів маршруту здійснюється відповідно до потреб населення в перевезеннях. При цьому пасажиропотік повинен бути досить стійкий протягом усього маршруту та не залежати від пори року.

Основними критеріями, що враховуються під час формування маршрутної системи, є зниження витрат часу пасажирів на поїздки, скорочення кількості пересадок пасажирів, економія витрат за рахунок оптимізації кількості зупинок на маршруті і підвищення швидкості руху [7]. Великий вплив на організацію перевезень пасажирів і підвищення ефективності використання пасажирського транспорту надає нерівномірність розподілу пасажиропотоків у часі. Коливання пасажиропотоків відрізняються певною

закономірністю. Визначними факторами вибору маршруту переміщення пасажирів транспортною мережею є сумарний час, що витрачається на підхід до зупинки, очікування транспортного засобу, поїздки з пункту відправлення до пункту призначення, пересадку, переміщення від зупинки до місця призначення. Критерій часу, за інших рівних умов, визначає ефективність організації доставки пасажирів і є основним під час вибору виду транспорту, способу пересування. Тобто основним завданням організації руху міського пасажирського транспорту є забезпечення мінімальних часових витрат на поїздки. Скорочення часу перебування пасажирів у дорозі можна досягти шляхом виключення проміжних зупинок, тобто шляхом формування «експрес-маршрутів», які будуть зупинятися тільки на великих пасажироутворюючих пунктах. Під час планування відкриття нових транспортних маршрутів у великих містах і мегаполісах нерідко практикується моделювання за допомогою формування міжрайонних кореспонденцій у міських транспортних системах.

Для моделювання міжрайонних кореспонденцій часто використовується ентропійний підхід, згідно з яким структура випадкового розміщення виникає в процесі масової поведінки, і який є рішенням задачі максимізації ентропії розміщення за наявності стримуючих обмежень. Отримане в результаті розміщення можна інтерпретувати як найбільш ймовірне серед усіх розміщень, прийнятних з погляду стримуючих обмежень і переваг. Універсальність ентропійного підходу полягає в тому, що він дає можливість знайти матрицю реалізацій (розподілів людей по пунктах призначення руху), у якій при заданих обмеженнях і перевагах сумарна ймовірна міра реалізацій максимальна.

Оцінка часу очікування при різних способах організації руху транспортних засобів на маршруті

Підвищення якості обслуговування пасажирів міським транспортом можлива за рахунок мінімізації витрат часу очікування пасажирів транспортних засобів на зупинках на початку поїздки і під час здійснення пересадок. При невідомому розкладі руху транспортних засобів на маршруті тривалість очікування є для пасажирів випадковою величиною, передбачити яку заздалегідь неможливо. За наявності інформації про фактичний час прибуття транспортного засобу на зупинку очікування пасажирів посадки в транспортний засіб першого з відповідних маршрутів буде визначатися тільки особистим ставленням пасажирів до

свого вільного часу у поїзді загалом. Під час розробки нового «експрес-маршруту» було враховано, що шлях пасажирів до зупинки описується найпростішим потоком і має властивості стаціонарності, ординарності і відсутності післядії, а також тим, що пасажир не має інформації про розклад руху. Тому вважали прибуття транспорту на зупинку через рівні інтервали часу без відхилень від графіка. За таких умов середній час очікування пасажирів приймає мінімальне значення, яке дорівнює половині інтервалу.

Під час розгляду іншого варіанту зазвичай виходить так, що відхилення часу прибуття транспорту на зупинку розподіляється за стандартизованим нормальним законом. А неможливість з'єднання автобусів призводить до того, що стандартне відхилення цієї величини розраховується згідно з правилом трьох сигм. Під час спостереження за роботою міського пасажирського транспорту було виявлено, що в багатьох випадках транспортні засоби відправляються від кінцевої зупинки слідом за попереднім транспортним засобом у разі наповнення салону до якогось критичного рівня. В такому разі транспорт відправляється від кінцевої зупинки слідом за попереднім через час, за який салон наповниться до заданого рівня I § 1.

Стаціонарне математичне очікування часу перебування пасажирів на зупинці розраховується як:

$$M(t) = \frac{M(I^2)}{2M(I)} = \frac{I}{2} \times \left(1 + \frac{1}{I}\right), \quad (1)$$

де l – заданий рівень наповнення автобусу, пас.;
 I – інтенсивність потоку пасажирів, пас./хв.

Якщо рівень наповнення салону $l = 10$, а параметр найпростішого потоку $I = 60$ пас./година, тоді середній інтервал відправлення транспортного засобу від зупинки дорівнюватиме 10 хвилин.

Для такого випадку математичне очікування часу перебування пасажирів транспортного засобу на зупинці буде 5 хвилин 30 секунд. Оскільки функція має монотонний характер, то обмеження по часу відправлення транспортного засобу скорочує час очікування пасажирів.

Формування швидкісних маршрутів у міській транспортній системі

Час перебування транспортного засобу під час перевезення від початкового до кінцевого пункту на маршруті M , що включає послідовність дуг із суміжними вершинами, визначається за формулою:

$$T_M = \sum_{(i,j) \in M} T_{ij}(l_{ij}) + k \times T_i^{cp}, \quad (2)$$

де $T_{ij}(l_{ij})$ – час, необхідний транспортному засобу на подолання відстані l_{ij} ;

l_{ij} – довжина перегону (i,j) ;

$L = \sum_{(i,j) \in M} l_{ij}$ – протяжність маршруту M ;

i,j – номери зупинок на маршруті;

$(i,j) \in M$ – ділянка між двома суміжними пунктами маршруту M ;

$k = |M|$ – кількість проміжних зупинок на маршруті;

T_i^{cp} – середній час, що витрачається на посадку і висадку пасажирів на проміжній зупинці на маршруті.

У середньому відстань між зупинками на міському громадському транспорті становить 0,4–0,6 км, при цьому протягом усього маршруту існують різні за обсягом пасажиропотоки. На кожній зупинці транспортний засіб здійснює зупинку і виробляє посадку і висадку пасажирів, тим самим збільшуючи час перебування пасажирів в салоні рухомого складу.

Скорочення часу перебування пасажирів можна досягти за рахунок виключення проміжних зупинок, тобто шляхом формування «експрес-маршрутів», які будуть зупинятися тільки на великих пасажироутворюючих пунктах. Тоді час перебування пасажирів на маршруті буде зменшуватися. Економія від створення «експрес-маршруту» буде складатися з економії часу пасажирів в вартісному вираженні і збільшення доходів від експлуатації транспортного засобу.

Нехай C_{nac} – вартість одиниці часу пасажирів, Δd_{mc} – чистий дохід від експлуатації транспортного засобу в одиницю часу. Нехай відомі величини $P_{M_e}^{min}$ та $P_{M_e}^{max}$ – відповідно мінімальне і максимальне завантаження «експрес-маршруту» під час перевезення, $P^{гран}$ – гранична місткість транспортного засобу експрес-маршруту M_e . Тоді економічно доцільний «експрес-маршрут» M_e буде визначатися під час вирішення завдання:

$$(T_{II}^M - T_{II}^{M_e}) \times \Delta C_{nac} + \Delta d_{mc} \times \Delta T_{mc}^{M_e} \rightarrow \min M_e \quad (3)$$

при обмеженнях:

$$P_{M_e}^{min} \leq \sum_{(i,j) \in M_e} P_{ij} \leq P_{M_e}^{max} \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j) \in M_e} P_{ij} \leq P^{гран}, \quad (5)$$

де $i \in M_e, j \in M_e, i_k \in M_e$ – вершини мережі, за якими проходить «експрес-маршрут».

Обмеження (4) – визначає межі беззбитковості організації «експрес-маршруту», (5) – гранично

допустима кількість пасажирів в транспортному засобі по пунктах проходження за умови використання пасажиром одного транспортного засобу для поїздки. За інших рівних умов фактичне число пасажирів «експрес-маршруту» може тільки збільшуватися за рахунок пересадки пасажирів від транспортних засобів, які підвозять до зупинок «експрес-маршруту». Кількість використуваних автобусів на цьому маршруті залежить від обсягу пасажиропотоку і його розподілу по мережі.

На рис. 1 представлена блок-схема формування «експрес-маршруту». Вихідною інформацією для формування «експрес-маршрутів» є відомості про пасажиропотік – матриця кореспонденції пасажиропотоку.

Забезпечення ефективного проектування транспортних маршрутів міста, зокрема розміщення зупинок, у межах перспективної концепції сталого розвитку транспорту є складною задачею, що вимагає використання сучасних технологій, зокрема геоінформаційних. Саме ці технології допомагають не тільки враховувати різнобічні фактори, а й просторові дані та відображати їх на карті місцевості. Для вирішення завдання з планування розміщення зупинок необхідно враховувати розміщення торгово-розважальних центрів, лікарень, магазинів, житлових масивів, підприємств і навчальних закладів, станцій метрополітену, місць масового відпочинку. Все це було враховано під час створення бази геоданих за допомогою програмного забезпечення ArcMap.

За допомогою ГІС було запроєктовано «експрес-маршрут» від станції метро «Холодна гора» до станції метро «Пушкінська» у місті Харкові. Послідовність планування розміщення зупинок продемонстровано на рисунку 2, де колами відображено буферні зони, а крапками – точки інтересу (POI) [8]. До точок POI відносять різні об'єкти інфраструктури, у тому числі різноманітні елементи транспортної системи: станції метро, зупинки громадського транспорту, вокзали, аеропорти та інші транспортні вузли.

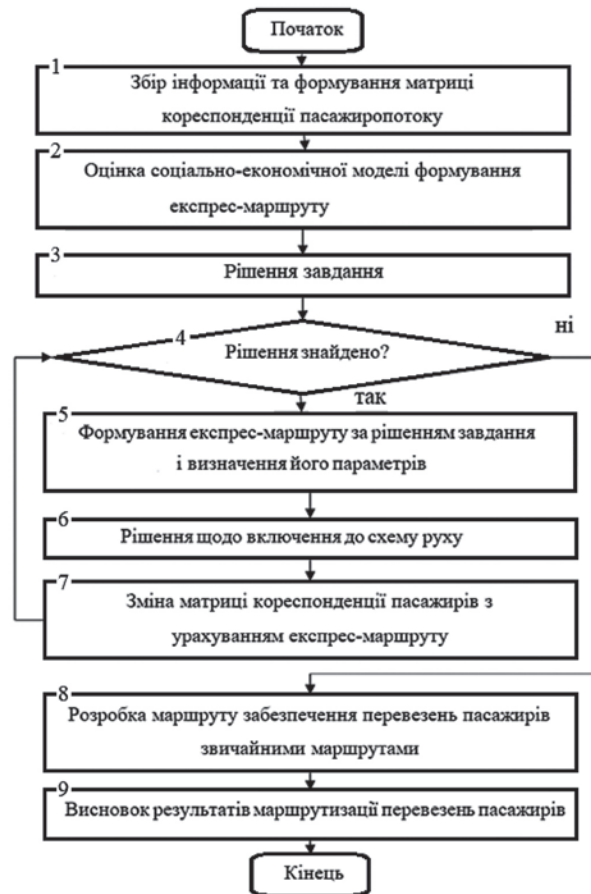


Рис. 1. Блок-схема формування експрес-маршруту транспорту

Зупинки громадського транспорту проектувалися з урахуванням того, що відстань від місця проживання або роботи до зупинки не повинна перевищувати 500 метрів. Проектування зупинок виконувалося за допомогою побудови буферних зон навколо місць роботи та станцій метрополітену – це шість хвилин пішохідної доступності. Зупинки було запроєктовано на перетині цих буферних зон. Таким чином, на прикладі зупинки «Архітектора Бекетова» наочно видно, що в буферній зоні зупинки знаходяться станція метро «Архітектора Бекетова» та чимало офісів та магазинів – основних місць роботи та відпочинку



Рис. 2. Схема планування зупинок на транспортному маршруті

харків'ян (див. рис. 2). Зупинки повинні бути пов'язані з іншими видами громадського транспорту та підприємствами. Завдання з планування зупинок виконувалося за допомогою геоінформаційної системи ArcMap.

Висновки. Проектування регулярності і швидкості пересування транспортних маршрутів за допомогою ГІС-технологій дозволило оцінити час очікування пасажирів транспортних засобів на зупинках за різних способів організації руху та дозволило зменшити витрати часу на очікування.

Було запроєктовано розташування зупинок на запропонованому «експрес-маршруті», який проходить у Холодногірському та Київському районах міста Харкова. Ентропійний підхід дозволив визначити економічну доцільність розробки нового експрес-маршруту. Використання ГІС технологій, а саме програмного продукту ArcGis, для комплексного вирішення цих завдань надасть змогу заощадити значні кошти, покращити обслуговування пасажирів міста за рахунок розробки нових, більш досконалих автобусних маршрутів.

Список літератури:

1. Пасажирський транспорт. URL: <https://traffic.od.ua/news/worldtrans/1198424>.
2. Poile C., Safayeni F. (2016) Using computational modeling for building theory: A double-edged sword. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, № 19 (3), p. 8.
3. Технологія перевезень пасажирів у міському сполученні. URL: <http://studall.org/all-28722.html>.
4. Горбачов П.Ф., Чижик В.М. Аналітична оцінка мінімальних та максимальних витрат часу пасажирів на зупинці міського маршруту. *Автомобільний транспорт*. 2012. С. 67–71.
5. Поморцева О.Є. Використання геоінформаційної системи у проектуванні інфраструктури міста. *Сучасні методи, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Люблін, Республіка Польща, 2017)*. Люблін, 2017. С. 223–226.
6. Федоров В.П., Буличова Н.В., Пахомова О.М., Лосин Л.А. Модель формування міжрайонних кореспонденцій в транспортних системах великих міст. Санкт-Петербург : Изд-во ТОВ «Г-ПРЕСА». 2008. С. 16–17.
7. Буренніков Ю.А., Біліченко В.В., Буренніков Ю.Ю., Цимбал С.В. Стан та перспективи розвитку маршрутної мережі пасажирських перевезень (на прикладі м. Вінниці). *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: збірник тез доповідей IV міжнародної науково-практичної конференції (Вінниця, 24–26 жовтня 2011) р.* Вінниця, 2011. С. 20.
8. Поморцева О.Є., Герасименко М.Д. Розробка туристичного маршруту за допомогою геоінформаційних технологій. *Системи обробки інформації*. 2019 р. Випуск 1 (156), Харків. С. 37–43.

Pomortseva O.E. INCREASING EFFICIENCY OF DESIGNING A TRANSPORT ROUTE USING A GIS

The article describes new approaches to the design of vehicles and technologies using geographic information systems. Public transport in Ukraine is popular. Buses are especially popular. There are drawbacks to the operation of transport. There are deficiencies in passenger service. This requires the creation of new transportation routes. The population is constantly growing in large cities. Effective transport routes need to be designed. This is an important task. Economic feasibility must be considered.

Modern transport systems are complex. It is necessary to use mathematical methods. It is necessary to use computers, new approaches in calculations and management. These tasks must be solved in steps. There are a number of criteria that must be met. Reducing travel time, reducing the number of transfers, reducing costs – these are the criteria. The time spent by the passenger on the road must be reduced. Creating an express route for the bus will allow this.

Such a route will stop at large passenger-forming points. Routes are developed for large cities. The formation of inter-district correspondence is used. When modeling inter-district correspondence, an entropy approach is used. There are limitations. The random placement structure solves the problem of maximizing entropy. The entropy approach is universal. It consists in finding an implementation matrix. The total possible measure of implementation will be maximum. Public transport stops along the route also need to be designed. Stops were designed taking into account the distance from the place of residence and work. Buffer zones with a radius of 500 meters were taken into account. The geographic information system made it possible to show buffer zones on the map. The geographic information system allowed to attach zones to points of interest. Stops were designed at the intersection of these buffer zones. Stops must be linked to other modes of transport.

The development of new routes is a phased process. It is necessary to develop a route and intermediate stops. Using the geographic information system, an “express route” was developed from the Kholodnaya Gora metro station to the Pushkinskaya metro station in Kharkov. The task was solved comprehensively. ArcGis software allowed us to solve the problem as a whole. It is necessary to develop routes efficiently. This will save money. This will help to better serve passengers.

Key words: *geographic information system, geodatabase, traffic management, express route, point of interest.*