

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ НОВИХ ДЕПО В МЕРЕЖІ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Л. І. Іванець^{1, a}, І. М. Терещенко¹

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
ІН Фізико-технічний інститут

Анотація

В даній роботі розглянуто алгоритм, який дозволяє визначити оптимальне місце розташування для нового депо в мережі громадського транспорту серед визначеного набору альтернатив. Алгоритм дозволяє провести всебічний аналіз впливу від впровадження депо на кожний з ділянок. На прикладі тролейбусної мережі Києва показано, як даний метод може бути застосований при ухваленні управлінських рішень.

Ключові слова: громадський транспорт, транспортна задача, методи прийняття рішень

Вступ

У життєдіяльності міст та агломерацій громадський транспорт відіграє провідну роль. В той же час, оскільки його функціонування потребує суттєвих фінансових впливів з бюджету, то важливою є ефективність використання цих коштів. Таким чином, мають забезпечуватись регулярні та надійні послуги при якомога менших витратах.

В містах України вуличний громадський транспорт представлений автобусами, тролейбусами та трамваями. Одним з важливих чинників, які впливають на функціонування мережі будь-якого з видів транспорту є кількість та місця розташування депо, з яких рухомий склад виїжджає на маршрути. Вони мають бути розташовані таким чином, щоб при найменших витратах на будівництво та викуп землі забезпечувались якнайменші пробіги рухомого складу під час виходу на маршрути. Над формалізацією та вирішенням подібних задач працював ряд дослідників, зокрема Piotr Sawicki та Hanna Sawicka, Enrico Musso та Anna Sciomachen, Raviraj Mulangi та інші. Переважна більшість з них фокусується на мінімізації сумарної відстані, яку рухомий склад долає при поїзді від депо до маршрутів. В пострадянській літературі це визначають як нульові рейси, в англійській - dead kilometres.

У роботі [1] Enrico Musso та Anna Sciomachen розглядали визначення оптимальної місткості кожного з депо та їх розташування. Модель передбачала відтворення графу вулично-дорожньої мережі міста, на якій за допомогою алгоритму Дейкстри визначався найкоротший шлях від кожного з депо до кожного з маршрутів. Після цього за допомогою методів лінійного програмування оптимізувалася цільова функція витрат. За основу для розрахунків була обрана автобусна мережа міста Генуя.

В статті [2] була розглянута задача оптимізації розподілу маршрутів між існуючими депо на прикладі автобусної мережі міста Бангалор. Основним параметром розглянутої моделі була кількість нульових кілометрів.

В статті [3] розглянули різні альтернативи розвитку трамвайної мережі Познаня. Модель враховувала ряд параметрів, в тому числі загальні витрати на нульовий пробіг, стабільність роботи системи, вплив на екологію та інші.

Проаналізувавши вищенаведені роботи, автори запропонували описану нижче модель та дослідили її на прикладі тролейбусної мережі Києва.

1. Опис алгоритму

Розглянемо детально модель, що досліджувалась в роботі [3].

1.1. Визначення основних обмежень

На цьому кроці проводиться якісний та кількісний аналіз обраної системи громадського транспорту. Структурується інформація щодо діючого положення – кількість маршрутів, розташування кінцевих та початкових зупинок, кількість рухомого складу, розташування та кількість діючих депо, які обслуговують мережу.

Також аналізується загальна містобудівна ситуація, короткострокова та довгострокова стратегія розвитку міських територій та транспортної мережі. Також важливою є оцінка економічної спроможності бюджету втілити заплановані заходи.

1.2. Формулювання альтернатив

Нехай $i = 1 \dots I$ – локації, на яких розташовані майданчики для існуючих або проєктованих депо.

^aivanetslev@gmail.com

Тоді

$$A = \{A_1, \dots, A_r, \dots, A_R\}$$

– набір альтернативних сценаріїв, або альтернатив. Кожна з альтернатив A_r складається з визначеного набору депо.

1.3. Визначення критеріїв для оцінки альтернатив

Кожна з альтернатив описується критеріями, які визначають її оцінку:

$$F = \{f_1(A), \dots, f_n(A), \dots, f_N(A)\}.$$

У даному випадку це наступні критерії:

$$F = \{WE(A_r), IC(A_r), OR(A_r), TL(A_r), LU(A_r)\}.$$

Ці критерії можна розділити на дві підмножини:

$$F = F^0 \cup F^a.$$

Причому:

$$F^0 = \{WE(A_r)\}$$

– до цієї підмножини відносяться прямі витрати на здійснення нульових рейсів.

$$F^a = \{IC(A_r), OR(A_r), TL(A_r), LU(A_r)\}$$

– до цієї підмножини відносяться непрямі втрати від спорудження депо.

Далі розглянемо кожен з критеріїв детально:

$$WE(A_r) = \min(d \cdot c \sum_{i=1}^I y_{ir} \sum_{j=1}^J (l_{ij}^s + l_{ij}^l) \sum_{k=1}^K \rho_k x_{ijk_r}),$$

$\forall r = 1, \dots, R$, при обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ijk_r} = N, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r} \leq Q_i + \Delta q_i; \forall i = 1, \dots, I, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K y_{ir} \leq S; \forall r = 1, \dots, R, \quad (4)$$

де: i – індекс локації для депо;

j – індекс початкової зупинки;

k – індекс тролейбусу, який виходить на маршрути;

ρ_k – витрати енергії k -го тролейбусу на 1 км пробігу;

c – вартість одиниці енергії;

d – кількість днів у періоді аналізу;

l_{ij}^s – відстань від i -го депо до j -ї початкової зупинки;

l_{ij}^l – відстань від j -ї кінцевої зупинки до i -го депо;

N – загальна кількість тролейбусів у мережі;

Q_i – місткість i -го депо;

Δq_i – додаткова місткість i -го депо;

S – максимальна кількість депо в транспортній мережі.

Даний критерій відображає вартість витрат на

сумарний нульовий пробіг у мережі.

До F^a відносяться наступні критерії:

Вартість інвестицій:

$$IC(A_r) = \min(\sum_{i=1}^I y_{ir} C_i \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r}), \quad (5)$$

де C_i – вартість нового капітального будівництва i -го депо та шляхів до нього в r -й альтернативі;

Експлуатаційна надійність:

$$OR(A_r) = \max(P_r (\sum_{i=1}^I y_{ir} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r})), \quad (6)$$

де P_r – ймовірність того, що в r -й альтернативі не відбудеться збій руху при виїзді з депо;

Вплив ділянки на оточуюче середовище:

$$TL(A_r) = \min(E_r (\sum_{i=1}^I y_{ir} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r})), \quad (7)$$

де E_r – рівень шкоди для екології, який чинить r -та альтернатива;

Відповідність оточуючому середовищу:

$$LU(A_r) = \min(U_r (\sum_{i=1}^I y_{ir} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r})), \quad (8)$$

де U_r – рівень того, наскільки i -те депо підходить до оточуючої міської забудови.

(1) 1.4. Прийняття рішення

На даному кроці приймається рішення щодо обрання найбільш оптимальної альтернативи. Такою вважається та альтернатива, яка має найменші сумарні витрати.

2. Адаптація моделі

Грунтуючись на моделі, що розглянута вище, вона була трансформована для задачі, в якій за основу приймається тролейбусна мережа Києва. Отже, були внесені наступні зміни:

- константи $\rho \cdot d \cdot c$ у визначенні винесені за межі виразу, що мінімізується. Таким чином, при розрахунку його мінімального значення буде прийматися до уваги лише сума нульових пробігів, які здійснюють тролейбуси; безпосередня вартість здійснення цих пробігів обчислюється після їх мінімізації;
- змінні $(l_{ij}^s + l_{ij}^l)$ замінені на змінну l_{ij} . Значення l_{ij}^s та l_{ij}^l відображають відстань від депо до початку маршруту та від кінця маршруту до депо. Оскільки в даному випадку тролейбуси розпочинають і завершують рух з однієї й тої самої кінцевої, то відстань від депо й до

депо приймається за однакову і позначається l_{ij} ;

- критерій $OR(A_r)$ вилучено, оскільки трамвайна і тролейбусна мережі мають різні особливості організації роботи. Тролейбусна мережа є більш відмовостійкішою: навідміну від трамвая, зламаний тролейбус не блокує рух на лінії, тому цей критерій не є суттєвим;
- критерій $TL(A_r)$ також вилучається, оскільки вплив на екологію того чи іншого рішення потребує окремого детального розрахунку, що виходить за межі даної роботи;
- Δq_i вилучається, оскільки подібна інформація щодо київської мережі відсутня;
- вводиться розділення найдовших маршрутів між двома депо. Це досягається завдяки тому, що для цих маршрутів визначається відстань не до однієї фіксованої кінцевої для усіх депо, а для найближчої кінцевої до кожного з депо.

Таким чином, модель набуває наступного вигляду:

$$WE(A_r) = \rho \cdot d \cdot c \cdot \min(\sum_{i=1}^I y_{ir} \sum_{j=1}^J l_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk_r}), \quad (9)$$

$\forall r = 1, \dots, R$, при обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{ijk_r} = N, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r} \leq Q_i; \forall i = 1, \dots, I, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K y_{ir} \leq S; \forall r = 1, \dots, R, \quad (12)$$

де: i – індекс локації для депо;

j – індекс початкової зупинки;

k – індекс тролейбусу, який виходить на маршрути;

ρ – витрати енергії одного тролейбусу на 1 км пробігу;

c – вартість одиниці енергії;

d – кількість днів у періоді аналізу;

l_{ij} – відстань від i -го депо до j -ї початкової зупинки;

N – загальна кількість тролейбусів у мережі;

Q_i – місткість i -го депо;

S – максимальна кількість депо в транспортній мережі.

До F^a відносяться наступні критерії:
Вартість інвестицій:

$$IC(A_r) = \min(\sum_{i=1}^I y_{ir} C_i \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r}), \quad (13)$$

де C_i – вартість нового капітального будівництва i -го депо та шляхів до нього в r -й альтернативі;

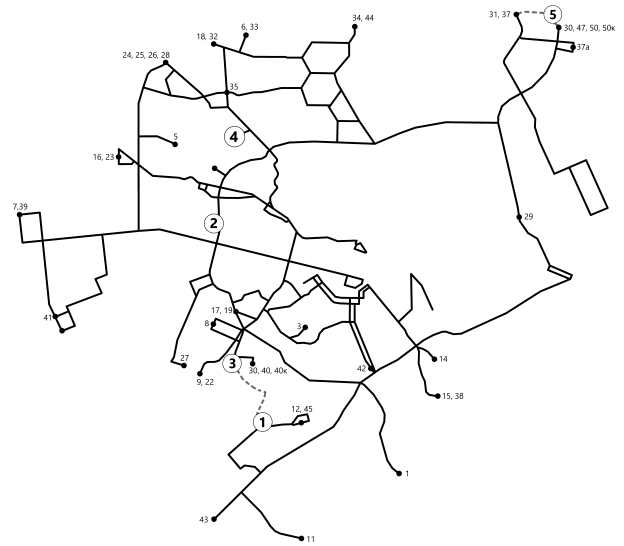


Рис. 1. Схема тролейбусної мережі Києва

Відповідність оточуючому середовищу:

$$LU(A_r) = \min(U_r(\sum_{i=1}^I y_{ir} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk_r})), \quad (14)$$

де U_r – рівень того, наскільки i -те депо підходить до оточуючої міської забудови.

3. Результати розрахунків

Тролейбусна система Києва має розгалужену мережу маршрутів, які покривають майже усе місто, крім південного лівого берега. Станом на 2019й рік на 43 маршрути щодня виходило 399 тролейбусів. Налічується 4 депо, усі вони розташовані на правому березі міста. Схематично мережа зображена на рис. 1.

Генеральний план міста передбачає спорудження нового депо на півночі лівого берега для зменшення нульових пробігів маршрутів, які обслуговують житловий масив Троєщина. В той же час, оскільки кожне з існуючих тролейбусних депо (далі - ТД) розраховане на більш, ніж 150 тролейбусів, то одночасно з цим виникає потреба ліквідувати одне з них на правому березі. Таким чином, формулюються наступні альтернативи:

A_0 : існуючий стан;

A_1 : побудова ТД5, закриття ТД2;

A_2 : побудова ТД5, закриття ТД1;

A_3 : побудова ТД5, закриття ТД3.

При цьому альтернативи A_2 та A_3 передбачають створення додаткової лінії між ТД1 та ТД3 для підвищення зв'язності мережі та зменшення нульових пробігів (на рис. 1 позначено пунктиром). Було визначено відстань від депо до кожного з маршрутів, після чого за допомогою транспортної задачі було визначено оптимальний план розподілу маршрутів між депо. Ці результати наведені в табл. 1.

Після цього для кожної з вищенаведених альтернатив були розраховані критерії $WE(A_r)$, $IC(A_r)$ та $LU(A_r)$. Значення $WE(A_r)$ відображає витрати на

Табл. 1. План оптимального розподілу маршрутів між депо при реалізації різних альтернатив

ТД1
$A_0 : 1, 11, 12, 37, 14, 15, 29, 31, 38, 42, 43, 45$
$A_1 : 1, 11, 12, 14, 15, 38, 42, 43, 45$
$A_2 : -$
$A_3 : 1, 11, 12, 40, 15, 17, 3, 30, 38, 40, 43, 45, 8, 9$
ТД2
$A_0 : 50, 16, 23, 30, 37, 39, 41, 5, 7$
$A_1 : -$
$A_2 : 12, 14, 16, 23, 27, 39, 41, 42, 5, 7$
$A_3 : 14, 16, 23, 27, 3, 39, 41, 42, 5, 7$
ТД3
$A_0 : 40, 17, 19, 22, 27, 3, 40, 8, 9$
$A_1 : 40, 17, 19, 22, 27, 3, 39, 40, 41, 7, 8, 9$
$A_2 : 1, 11, 12, 40, 15, 17, 3, 30, 38, 40, 43, 45, 8, 9$
$A_3 : -$
ТД4
$A_0 : 18, 24, 25, 26, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 44, 47, 50, 6$
$A_1 : 16, 18, 23, 24, 25, 26, 28, 32, 33, 34, 35, 44, 5, 6$
$A_2 : 18, 19, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 44, 5, 6$
$A_3 : 18, 19, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 44, 5, 6$
ТД5
$A_0 : -$
$A_1 : 37, 50, 29, 30, 31, 37, 47, 50$
$A_2 : 37, 50, 30, 31, 37, 47, 50$
$A_3 : 37, 50, 30, 31, 37, 47, 50$

здійснення нульових рейсів за розрахунковий період в 15 років. $IC(A_r)$ відображає витрати, які необхідні на будівництво нових депо та ліній. $LU(A_r)$ відображає вартість звільненої землі після ліквідації депо. Результати наведені в табл. 2.

Табл. 2. Значення критеріїв для кожної з альтернатив

A_r	$WE(A_r)$, млн грн	$IC(A_r)$, млн грн	$LU(A_r)$, млн грн	Всього, млн грн
A_0	1399,1	0	0	1399,1
A_1	725,5	293,5	-127,5	891,5
A_2	594,8	298,7	-114,2	779,3
A_3	653,8	298,7	-80,5	872,0

Результати показують, що побудова нового депо дозволяє більш ніж вдвічі зменшити витрати на нульові пробіги в системі: із 1399,1 млн грн до 594,8 млн грн. Найбільше на це впливає той факт, що суттєво скорочується нульовий пробіг тролейбусів, які обслуговують маршрути масиву Троєщина. Сумарно ці маршрути обслуговує 112 тролейбусів.

У порівнянні з витратами на нульовий пробіг, вартість інвестицій в будівництво та оцінка земельної ділянки на відповідність навколишній забудові складають відносно невелику суму. Таким чином, найоптимальнішою є альтернатива A_2 , яка передбачає побудову ТД5 та одночасне закриття ТД1.

Висновки

У даній роботі було проаналізовано модель визначення найоптимальнішого місця для будівництва нового депо на основі розподілу маршрутів між ними для трамвайної мережі. На її основі було створено модель для виконання аналогічної задачі з тролейбусною мережею. На практиці модель була перевірена при її застосуванні на прикладі Києва. Результати дозволили оцінити кожну із запропонованих альтернатив та визначити найкращу з них. В подальшому така модель може бути використана під час прийняття управлінських рішень.

Перелік використаних джерел

1. E. Musso A. Sciomachen. Optimal location of bus depots in an urban area // Transactions on the Built Environment. — 1997. — Vol. 30. — P. 93–103.
2. Mahadikar Jagadish, Mulangi Raviraj, Thallak Sitharam. Optimization of bus allocation to depots by minimizing dead kilometers: Optimization of Bus Allocation to Depots // Journal of Advanced Transportation. — 2015. — Vol. 49, no. 5. — P. 1–13.
3. P. Sawicki H. Sawicka. Combined optimisation and MCDA based solution of the tram depot location problem // Archives of Transport. — 2021. — Vol. 60, no. 4. — P. 87–103.