

СИСТЕМА ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ДЛЯ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ: ВИБІР І МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ

Анотація: У статті розглядається задача побудови оптимального маршруту для громадського транспорту в умовах змінного транспортного потоку, динамічних затримок та розкладів. Обґрунтовано вибір алгоритму A^* як базового та його адаптацію (ALT). Запропоновано архітектуру модуля пошуку маршруту.

Ключові слова: пошук маршруту, алгоритм A^* , громадський транспорт, ALT-оптимізація, часові евристики, мобільні застосунки, динамічні графи.

Вступ

У сучасних міських умовах ефективне управління громадським транспортом неможливе без застосування автоматизованих систем планування маршрутів. Зростання пасажиропотоку, нерівномірність завантаження окремих ділянок маршрутної мережі, наявність заторів та часові затримки обумовлюють необхідність використання алгоритмів, які здатні динамічно адаптуватися до змін середовища. Особливої актуальності це набуває при розробці мобільних додатків для перевізників, у яких критично важливим є оперативне знаходження оптимального маршруту з урахуванням поточних умов.

Одним із найважливіших питань у процесі створення таких систем є вибір відповідного алгоритму пошуку. Попри наявність значної кількості відомих рішень у теорії графів, не всі вони є придатними для задач реального часу, особливо на мобільних пристроях із обмеженими ресурсами. У цій роботі розглядається підхід до побудови ефективного маршрутизатора для громадського транспорту на основі модифікованого алгоритму A^* , адаптованого під часові характеристики руху та оптимізованого за допомогою методу орієнтирів.

У ході дослідження було проаналізовано п'ять основних алгоритмів маршрутизації у графах: Дейкстри, A^* , Беллмана-Форда, Флойда-Воршелла та Джонсона. Основними критеріями для порівняння стали обчислювальна складність, наявність підтримки часових характеристик, можливість інтеграції в мобільне середовище та практичність у динамічних транспортних умовах. Після аналізу було обрано алгоритм A^* як найбільш збалансований з погляду продуктивності та можливості модифікації.

Для покращення роботи A^* було реалізовано дві модифікації: по-перше, введено часову евристику з урахуванням розкладу руху та очікування на пересадках (Time-Dependent A^*), а по-друге, застосовано оптимізацію через попереднє обчислення евристич-

них оцінок на основі орієнтирів (ALT-метод) [1]. Також розглянуто можливість реалізації двобічного пошуку, при якому маршрути обчислюються одночасно з двох напрямків (від початку та від кінця).

Порівняльний аналіз класичних алгоритмів пошуку маршруту наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.

Порівняльний аналіз класичних алгоритмів пошуку маршруту

Алгоритм	Часова складність	Переваги	Обмеження
Дейкстри	$O(E + V \log V)$	Надійність, простота	Не враховує час; повільний
A*	$O(E)$ – залежить від $h(n)$	Продуктивність, масштабованість	Потребує ефективної евристики
Беллмана-Форда	$O(VE)$	Робота з від'ємними вагами	Повільність; обмежене застосування
Флойда-Воршелла	$O(V^3)$	Універсальність для повних графів	Непридатний для великих мереж
Джонсона	$O(V^2 \log V + VE)$	Для пошуку всіх шляхів	Складність реалізації

Стандартна реалізація алгоритму A* базується на поєднанні фактичної відстані $g(n)$ та евристичної оцінки $h(n)$, яка найчастіше визначається як евклідова або мангеттенська [2]. Для умов міського транспорту така евристика не є релевантною, оскільки не враховує часових параметрів. Тому в межах даного дослідження використано модифіковану функцію оцінки:

$$f(n) = g(n) + h(n, t) \quad (1)$$

де t – час, у який розраховується маршрут, $h(n, t)$ – очікуваний час прибуття з урахуванням розкладу, пересадок та заторів.

ALT-евристика на основі трикутної нерівності:

$$h_{ALT}(n, t) = \max_{l \in L} |d(l, t) - d(l, n)| \quad (2)$$

де L – множина орієнтирів, $d(x, y)$ – відстань між вершинами графа.

Це дозволяє створити модель, яка є чутливою до часу доби, враховує середні затримки за історичними даними та змінює поведінку залежно від часу старту.

Щоб покращити швидкодію алгоритму на великих графах, було застосовано ALT-оптимізацію. Суть методу полягає у попередньому обчисленні відстаней до певного набору фіксованих точок – орієнтирів. Завдяки використанню нерівності трикутника, можна отримати нижню межу шляху до цілі, не проходячи всі вершини [5].

Це дозволяє скоротити кількість операцій та значно зменшити час виконання пошуку, що особливо важливо для мобільних пристроїв із обмеженою обчислювальною потужністю.

У задачах пошуку в умовах великого міста із щільною мережею пересадок доцільним є застосування двобічного пошуку. У цьому підході два A*-алгоритми

запускаються одночасно – один від початкової точки, другий від кінцевої. У момент зустрічі двох хвиль пошуку визначається оптимальний маршрут [3].

Для наочного представлення етапів роботи розробленого програмного модуля доцільно подати його загальну архітектуру у вигляді блок-схеми. Нижче представлено логіку проходження даних у системі побудови оптимального маршруту з урахуванням географічних координат, динамічних обмежень, а також евристичних оцінок, що використовуються на етапі пошуку шляху. Архітектура є результатом адаптації класичної схеми пошуку до потреб автоматизованого проєктування маршрутів громадського транспорту в умовах міської інфраструктури.

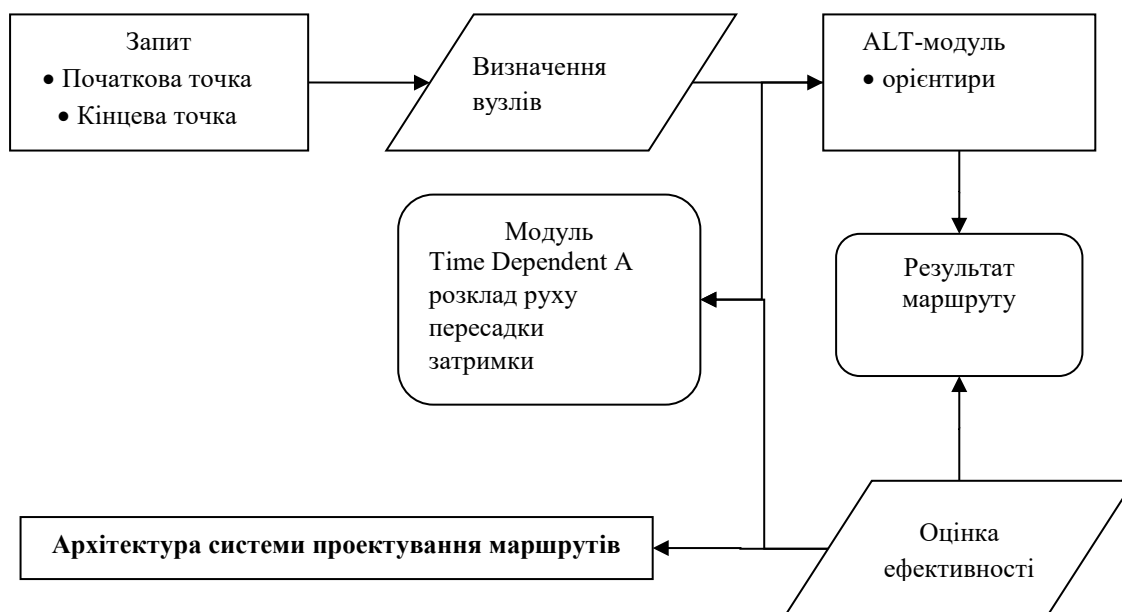


Рисунок 1. Архітектура системи побудови оптимального маршруту громадського транспорту

Як видно з рис. 1, система функціонує на основі покрокової обробки вхідних даних: координати початкової та кінцевої точок надходять у модуль трансформації, який визначає відповідні вузли графа. Наступним кроком є підключення ALT-структур, які забезпечують швидку евристичну оцінку відстані до цілі через попередньо розраховані орієнтири. Ці дані передаються до основного модуля Time-Dependent A*, який враховує розклад руху, середні затримки та можливість пересадок. Після цього здійснюється оцінка ефективності побудованого маршруту за критеріями довжини шляху, часу поїздки, зручності та навантаження на мережу [5].

У поєднанні з часовою евристикою та ALT-підходом це забезпечує значне пришвидшення пошуку, що критично важливо для використання системи в реальному

часі. Для кращого розуміння відмінностей між класичною та вдосконаленою реалізацією алгоритму A* доцільно порівняти їх у вигляді блок-схем. Нижче наведено візуалізацію ключових етапів виконання стандартного A* та модифікованого варіанту з урахуванням часових характеристик і ALT-евристики.

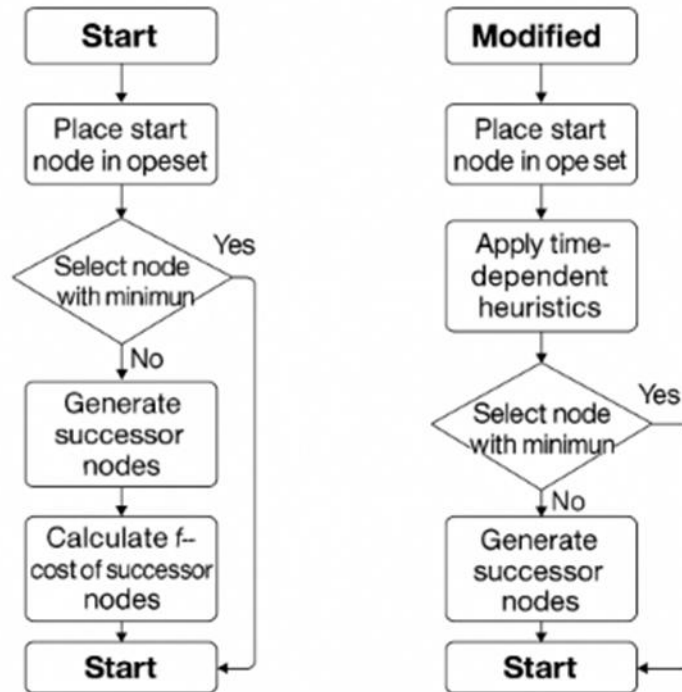


Рисунок 2. Порівняння блок-схем роботи стандартного та модифікованого алгоритму A*

На рис. 2. представлено логіку виконання класичного A* (ліворуч) та його модифікованої версії з урахуванням часових евристик (праворуч). Додатковий крок аналізу часу в модифікованому варіанті дозволяє підвищити точність пошуку в умовах міського трафіку.

Архітектурна модель модуля маршрутизації включає кілька взаємопов'язаних компонентів. На вхід модулю надходить запит із координатами початкової та кінцевої точок. Далі виконується трансформація координат у відповідні вузли графа транспортної мережі. У наступному блоці відбувається застосування ALT-структур із використанням попередньо обчислених відстаней до орієнтирів. Потім активується основний блок Time-Dependent A*, який здійснює динамічний пошук маршруту з урахуванням часу очікування, розкладу руху та затримок. Результат передається на рівень візуалізації або навігації у мобільному інтерфейсі [4].

Порівняльне тестування алгоритмів на моделі умовного міста з 1000 зупинок і 300 маршрутів показало, що використання модифікованого A* із часовими

евристиками дозволяє зменшити середній час пошуку маршруту з 1.8 с до 0.6 с. ALT-оптимізація скоротила кількість переглянутих вершин на 60%. Двобічний пошук зменшив час відповіді ще на 20%. В результаті запропонована система забезпечила сумарне прискорення в 3–4 рази без втрати точності.

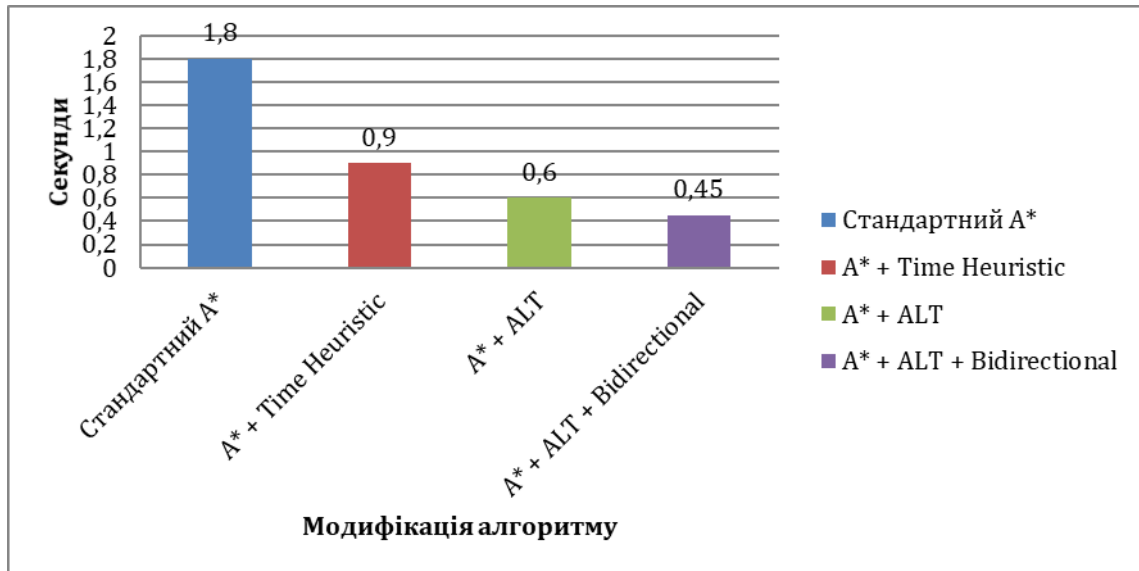


Рисунок 3. Порівняння середнього часу пошуку маршруту для різних варіантів алгоритму A*

Як показано на рис. 3, застосування часових евристик і орієнтирної оптимізації дозволяє суттєво знизити час виконання пошуку. Комбінування підходів у модифікованій версії A* забезпечує прискорення в 3–4 рази порівняно з базовим алгоритмом, що підтверджує доцільність впровадження запропонованої системи в реальні мобільні застосунки для управління громадським транспортом.

Висновки

Запропонована в роботі система маршрутизації на основі модифікованого алгоритму A* з урахуванням часу, орієнтирної евристики та двобічного пошуку забезпечує ефективний і масштабований інструмент для побудови маршрутів у системах громадського транспорту. Урахування динамічних параметрів підвищує релевантність результату, а використання оптимізаційних підходів дозволяє зменшити обчислювальні витрати, що є критично важливим для мобільних застосунків. У перспективі доцільним є додаткове впровадження методів прогнозування затримок на основі машинного навчання.

Список використаних джерел

1. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1. – P. 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390
2. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – Vol.4, No.2. – P. 100-107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136
3. Goldberg A.V., Harrelson C. Computing the shortest path: A* meets graph theory // ACM-SIAM SODA. – 2005. – P. 156-165.
4. Bast H., Delling D., Goldberg A. et al. Route Planning in Transportation Networks // Algorithm Engineering. – 2016. – P. 19-80. DOI: 10.1007/978-3-319-49487-6_2
5. Gutman R. Reach-based routing: A new approach to shortest path algorithms optimized for road networks // ALENEX. – 2004. – P. 100-111.