

УДК 004.051

Волошин В. В. ORCID: 0009-0004-7121-0950 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. техн. наук, доцент Данилюк І. А. ORCID: 0000-0003-0955-0108 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
Карпенко А. О. ORCID: 0000-0002-8372-6303 (ВІТІ ім. Героїв Крут)
канд. ф.-м. наук Ковальчук Б. П. ORCID: 0000-0001-5219-7624 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ПОБУДОВИ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ З ВИКОРИСТАННЯМ «ГАРЯЧИХ ЗОН»

У статті авторами розглянуто вирішення проблеми планування оптимальних маршрутів у динамічному середовищі з використанням географічних даних OpenStreetMap (OSM) для території України. В умовах конфліктних ситуацій та ведення бойових дій виникає необхідність адаптації класичних алгоритмів пошуку маршрутів для врахування специфічних обмежень на місцевості. Основна мета дослідження – розробка адаптивного алгоритму A^* , який враховує наявність зон підвищеного ризику ("гарячих зон"), які можуть значно вплинути на ефективність та безпечність розрахованого маршруту. Для реалізації поставленої мети був проведений аналіз існуючих алгоритмів пошуку найкоротшого шляху з використанням класичного алгоритму A^* та його евристичної функції, що враховує відстань між точками маршруту. Розглянута алгоритмічна особливість модифікації алгоритму A^* , що включає врахування додаткового коефіцієнта вартості для "гарячих зон". Запропонований підхід базується на додаванні адаптивного множника, який обмежує можливість прокладання маршруту через небезпечні ділянки. Для перевірки запропонованого методу було використано OSM-дані, що містять лише базову інформацію про дороги без врахування воєнних обмежень. Це обмеження підкреслює важливість додаткового аналізу таких факторів, як безпека та ризик при плануванні маршруту. Отримані результати показують ефективність розробленого адаптивного алгоритму A^* для задачі побудови маршруту в умовах динамічного середовища, зокрема з можливістю уникнення небезпечних зон ("гарячих зон"). Висновки проведеного дослідження підтверджують, що додатковий коефіцієнт вартості у "гарячих зонах" покращує точність маршруту та підвищує безпеку пересування. Розроблений алгоритм може застосовуватися для автоматизованого планування маршрутів у ситуаціях, де критично важливо враховувати змінні фактори ризику та специфічні умови на місцевості.

Ключові слова: алгоритм A^* , маршрутизація, "гарячі зони", OpenStreetMap, динамічне середовище, найкоротший шлях, воєнні обмеження.

V. Voloshyn, I. Danylyuk, A. Karpenko, B. Kovalchuk Development of an optimal route planning algorithm using hot zones

The authors in the article address the problem of planning optimal routes in a dynamic environment using OpenStreetMap (OSM) geographic data for the territory of Ukraine. Amid conflict situations and active hostilities, there is a need to adapt classical route-finding algorithms to account for specific terrain constraints. The main aim of the research is to develop an adaptive A^* algorithm that considers high-risk areas ("hot zones") which can significantly impact the efficiency and safety of the calculated route. To achieve this goal, the authors conducted an analysis of existing shortest path search algorithms using the classic A^* algorithm and its heuristic function, which considers the distance between route points. The study explores a modified version of the A^* algorithm that includes an additional cost factor for "hot zones." The proposed approach introduces an adaptive multiplier that restricts route planning through dangerous areas. To validate the proposed method, OSM data containing only basic road information, without military restrictions, was used. This limitation highlights the importance of additional analysis of factors such as safety and risk in route planning. The results demonstrate the effectiveness of the developed adaptive A^* algorithm in constructing routes in a dynamic environment, particularly with the ability to avoid dangerous ("hot") zones. The study's conclusions confirm that adding a cost factor in "hot zones" improves route accuracy and enhances travel safety. The developed algorithm can be applied to automated route planning in scenarios where it is crucial to consider variable risk factors and specific terrain conditions.

Keywords: A^* algorithm, routing, hot zones, OpenStreetMap, dynamic environment, shortest path, military restrictions.

Постановка завдання

Постановка проблеми у задачі побудови оптимального маршруту полягає у забезпеченні швидкого, безпечного та ефективного планування шляхів у динамічних умовах, які включають різноманітні ризики та обмеження. У мирних умовах алгоритми вибору найкоротшого шляху,

такі як класичний A^* , успішно виконують завдання, проте в умовах бойових дій або інших надзвичайних ситуацій виникає потреба в адаптації до специфічних загроз. Однією з ключових перешкод є наявність "гарячих зон" – територій з підвищеним рівнем ризику, яких необхідно уникати або обирати обхідні шляхи. Ця проблема є актуальною для таких наукових і практичних сфер, як військове планування, безпека транспорту та системи управління надзвичайними ситуаціями, оскільки точне врахування ризикованих зон дозволяє підвищити безпеку переміщення і зменшити ресурси, необхідні для реалізації кожного маршруту. Геопросторові дані OpenStreetMap (OSM) [1], які використовуються для побудови маршрутів, надають лише базову інформацію про дорожню інфраструктуру, без урахування факторів підвищеної небезпеки, спричинених бойовими діями чи іншими загрозами. Отже, актуальним є розроблення адаптивного алгоритму, здатного враховувати динамічні обмеження та забезпечувати безпеку при переміщенні через території, які зазнали змін у зв'язку з військовою діяльністю чи іншими небезпечними факторами.

Аналіз останніх публікацій

Останні дослідження в області планування оптимальних маршрутів із врахуванням динамічних умов значною мірою зосереджені на удосконаленні алгоритмів пошуку шляхів [2], таких як A^* , Dijkstra та їхніх модифікацій для роботи в середовищах з ризиками та обмеженнями [3]. Зокрема, дослідження в рамках військового планування та інтелектуального управління транспортом спрямовані на розроблення адаптивних алгоритмів, що можуть враховувати часові та географічні змінні. Наприклад, дослідження Кортеса та колег [4] розглядає адаптивний підхід до A^* для роботи з динамічними перешкодами. Проте більшість із цих робіт зосереджена на теоретичних моделях і лише частково охоплює проблему інтеграції актуальних даних про ризики в режимі реального часу. Водночас, важливою частиною, що залишається невирішеною, є розроблення практичного підходу до адаптації традиційних алгоритмів найкоротшого шляху з урахуванням специфічних обмежень, пов'язаних із веденням бойових дій, що робить критичним використання "гарячих зон" у маршрутах на основі даних OSM.

Проведений аналіз виявив необхідність вдосконалити алгоритм A^* , оскільки його класична реалізація не враховує специфічних аспектів реального часу та зон підвищеного ризику, що особливо важливо в умовах динамічних середовищ, як-от зони бойових дій або інтенсивного транспортного трафіку. Використання так званих "гарячих зон" дозволяє алгоритму більш точно адаптувати маршрути до змінних умов, таких як нові перешкоди, небезпечні ділянки чи блокування, що може значно покращити безпеку та ефективність маршрутизації. Вдосконалений підхід також враховує можливість оновлення інформації про ці зони в режимі реального часу, що розширює можливості алгоритму в контексті військових та інтелектуальних транспортних застосувань.

Метою даної статті є вдосконалення класичного алгоритму A^* шляхом інтеграції адаптивного коефіцієнта ризику, що дозволить ефективніше будувати маршрути, уникаючи "гарячих зон" в умовах бойових дій, враховуючи обмеженість доступних геопросторових даних.

Виклад основного матеріалу

У цьому дослідженні проведено комплексний аналіз проблем, пов'язаних з вирішенням задачі маршрутизації в динамічному середовищі, використовуючи географічні дані з OSM для території України. Основним завданням є планування оптимального маршруту між двома точками з урахуванням топографічних, дорожніх, та інших характеристик місцевості. Задача найкоротшого шляху полягає у пошуку мінімальної відстані між вершинами в графі (де граф представлений даними OSM для України), що є абстрактним математичним об'єктом із множинами вершин та ребер [5]. За Парвін Шармою і Неї Курханом, задача найкоротшого шляху визначається як мінімізація довжини (вартості) між вузлами [6], а Карішма Талан та

Г. Р. Бамнот підкреслюють її як пошук найшвидшого маршруту [7]. У загальному вигляді, це пошук шляху з найменшою вартістю між двома вершинами графа [8].

Одним із найпоширеніших алгоритмів для вирішення задач найкоротшого шляху є алгоритм A^* (A-star), який використовує евристичні оцінки для зменшення кількості перевірених вузлів у процесі пошуку [9]. Результати застосування алгоритму A^* до даних OSM показали його ефективність у генерації маршрутів на основі відкритих геопросторових даних. Однак OSM-дані містять лише інформацію про дороги та маршрути, які придатні для загального використання [10], але не включають специфічних обмежень, зумовлених воєнною обстановкою чи (та) реальними бойовими діями. Хоча алгоритм успішно знаходить найкоротший шлях, він не враховує ризиків, пов'язаних із переміщенням через "гарячі зони". Для повноцінного планування маршруту в умовах військових дій важливо інтегрувати інформацію про такі зони, оскільки вони можуть значно впливати на безпечність та ефективність побудованого маршруту.

Для подолання цієї проблеми було розроблено адаптивний алгоритм на основі A^* , що враховує динамічні зміни середовища. Цей підхід доповнює алгоритм A^* обробкою "гарячих зон", дозволяючи алгоритму змінювати маршрут відповідно до поточної навколишньої обстановки. Він працює шляхом додавання додаткової вартості для проходження через небезпечні зони, що змушує алгоритм уникати їх у процесі пошуку оптимального шляху. Таким чином, новий адаптивний алгоритм надає пріоритет маршрутам, що мінімізують ризики, пов'язані з пересуванням через небезпечні ділянки. Це робить його більш гнучким та ефективним у випадках, де обставини змінюються динамічно.

Експериментальні результати досліджень свідчать, що адаптивний алгоритм демонструє покращену ефективність у порівнянні з класичним A^* , особливо в умовах, де необхідно уникати певних зон. Такий підхід враховує не тільки відстань, але й фактори безпеки, що є вирішальним для складних маршрутів. Це робить його корисним у завданнях планування складних маршрутів, особливо у випадках, коли наявні зовнішні чинники, які впливають на безпечність чи швидкість переміщення.

Алгоритм A^* працює з графом, що представляє просторову структуру дороги, де вузли відповідають перехрестям або кінцевим точкам доріг, а ребра – шляхам між ними з певними характеристиками, такими як довжина та обмеження швидкості. Для перевірки ефективності та точності роботи алгоритму A^* було використано дані OSM, які конвертувалися у граф для подальшої обробки. Процес конвертації даних з OSM у граф складається з кількох важливих етапів. Спочатку дані OSM завантажуються для обраного регіону за допомогою API або з готових файлів (зазвичай у форматах .osm або .pbf). Потім ці дані проходять фільтрацію: залишаються тільки елементи, пов'язані з транспортними маршрутами, як-от *highway*, *motorway*, *secondary*, *residential*. Інші елементи, які не впливають на планування маршрутів, відкидаються.

На етапі створення вершин, кожен вузол у графі відповідає перехрестю або кінцевій точці дороги. Усі унікальні координати з OSM перетворюються на вершини, де кожна вершина має ідентифікатор, широту та довготу. набір вершин позначається як

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad (1)$$

де кожна вершина v_i представляє певне географічне положення.

Далі відбувається створення ребер. Кожне ребро графа представляє дорогу, що з'єднує вузли. Воно має напрямок, довжину (розраховану за Евклідовою або Манхеттенською метрикою). Граф представлений як

$$G = (V, E), \quad (2)$$

де $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – набір ребер.

Для ефективної роботи алгоритму A^* на великих картах граф оптимізується. Наприклад, зменшується кількість вершин шляхом об'єднання прямих відрізків в одне ребро. Після

завершення побудови граф зберігається в базі даних або у форматах для швидкого доступу, як-от матриця суміжності або список суміжності.

Класичний алгоритм A^* використовує евристичну функцію для оцінки вартості шляху $f(n)$, яка обчислюється як сума двох складових:

$$f(n) = g(n) + h(n), \quad (3)$$

де $g(n)$ – фактична вартість маршруту від початкової точки до вузла;

$h(n)$ – евристична оцінка вартості маршруту від вузла до кінцевої точки (зазвичай Евклідова або Манхеттенська відстань).

Для адаптації алгоритму до обробки "гарячих зон" вводиться додатковий коефіцієнт вартості $\alpha(n)$, що відображає підвищену вартість проходження через такі зони. Модифікована функція вартості для кожного вузла виглядає наступним чином:

$$f(n) = g(n) + h(n) + \alpha(n), \quad (4)$$

де $\alpha(n)$ – додаткова вартість для вузлів у "гарячих зонах". Функція евристики $h(n)$, як і в класичному алгоритмі A^* , оцінює залишкову відстань до цілі, використовуючи, наприклад, Евклідову відстань:

$$h(n) = \sqrt{(x_{end} - x_n)^2 + (y_{end} - y_n)^2}. \quad (5)$$

Щоб додати динамічне врахування "гарячих зон", вводимо додаткову функцію $\alpha(n)$, яка змінює основну вартість залежно від знаходження вузла в "гарячій зоні":

$$\alpha(n) = \begin{cases} w_{hot}, & \text{якщо } n \text{ знаходиться в "гарячій зоні"} \\ 0, & \text{якщо } n \text{ не належить до "гарячої зони"} \end{cases} \quad (6)$$

Тут w_{hot} – додаткова вартість проходження через "гарячу зону", залежна від ступеня небажаності або інтенсивності цієї зони.

Адаптивний алгоритм A^* функціонує за такою послідовністю кроків, що враховують динамічну зміну вартості шляхів залежно від наявності "гарячих зон".

Алгоритм починає з ініціалізації двох основних структур даних – відкритого списку вузлів (*open list*) та закритого списку вузлів (*closed list*). Відкритий список включає всі вузли, які будуть розглянуті для подальшої обробки, тоді як закритий список містить вузли, що вже були опрацьовані. Для кожного вузла n встановлюється початкове значення функції вартості $g(n) = \infty$ (символізує нескінченну віддаленість, тобто шлях ще не знайдений), а евристична функція $h(n)$ розраховується на основі обраного методу, такого як Евклідова відстань. Ця евристика відображає приблизну відстань від вузла n до кінцевої точки. Далі для кожного вузла обчислюється значення функції $f(n) = g(n) + h(n)$, яка відображає поточну оцінку вартості проходження через цей вузол.

На кожній ітерації алгоритм обирає вузол із відкритого списку, який має мінімальне значення $f(n)$. Цей вузол вважається найбільш перспективним для подальшого пошуку оптимального шляху. Вибір мінімального $f(n)$ забезпечує баланс між фактично пройденою відстанню $g(n)$ та оцінкою залишкового шляху $h(n)$.

Для кожного обраного вузла n алгоритм розглядає його сусідів m і обчислює нове значення функції $g(m)$, що включає:

$$g(m) = g(n) + cost(n, m) + \alpha(m), \quad (7)$$

де $cost(n, m)$ – вага (або вартість) переходу між вузлами n та m , а $\alpha(m)$ – додатковий коефіцієнт, що враховує підвищену вартість при проходженні через "гарячі зони".

Важливо, що якщо вузол m ще не був оброблений або нове значення $g(m)$ виявиться меншим за попереднє, значення $g(m)$ оновлюється, і вузол додається до відкритого списку. Цей підхід дає змогу алгоритму адаптивно обирати вузли, що уникатимуть зон з високою вартістю, якщо альтернативні шляхи є менш витратними.

Процес продовжується, доки не досягнуто кінцевої точки або відкритий список не стане порожнім. У випадку досягнення цілі, алгоритм повертає оптимальний маршрут; якщо ж

відкритий список порожній і ціль не досягнута, алгоритм сигналізує про відсутність можливого шляху.

Розрахунок вартості проходження через "гарячі зони" проводимо наступним чином. Для кожного ребра e , що з'єднує вузли n та m , якщо відома його вага $w(e)$, загальна вартість шляху через "гарячу зону" визначається як:

$$g(m) = g(n) + w(e) + a(m), \quad (8)$$

де $a(m)$ адаптивно змінюється залежно від поточних умов, наприклад, часу або ситуації, що впливає на актуальність уникнення "гарячої зони". У цьому контексті $a(m)$ можна розглядати як функцію часу або іншого параметру, що динамічно коригується в ході виконання алгоритму

$$a(m, t) = \begin{cases} w_{hot}(t), & \text{якщо } m \text{ знаходиться в "гарячій зоні" на момент } t \\ 0, & \text{якщо } m \text{ не належить до "гарячої зони"} \end{cases}. \quad (9)$$

Для перевірки роботи даного алгоритму було написано програму мовою програмування C#:

```
// Евристична функція з урахуванням "гарячих зон"
Func<uint, float> heuristic = vertex =>
{
    var vertexLocation = graph.GetVertex(vertex);
    var endLocation = graph.GetVertex(endVertex);
    var dx = vertexLocation.Latitude - endLocation.Latitude;
    var dy = vertexLocation.Longitude - endLocation.Longitude;
    var baseHeuristic = (float)Math.Sqrt(dx * dx + dy * dy);
    return baseHeuristic + GetHeatFactor(vertex);
};
int i = 0;
while (priorityQueue.Count > 0)
{
    i++;
    var (currentDistance, currentVertex) = priorityQueue.Min;
    priorityQueue.Remove(priorityQueue.Min);

    if (currentVertex == endVertex)
        break;

    foreach (var edge in graph.GetEdgeEnumerator(currentVertex))
    {
        var neighbor = edge.To;
        // Додаємо вартість зони до ваги
        var weight = edge.Data.Distance + GetHeatFactor(neighbor);
        var distance = currentDistance + weight;

        if (!distances.ContainsKey(neighbor) || distance < distances[neighbor])
        {
            priorityQueue.Remove((distances.GetValueOrDefault(neighbor, float.MaxValue)
                + heuristic(neighbor), neighbor));
            distances[neighbor] = distance;
            previous[neighbor] = currentVertex;
            priorityQueue.Add((distance + heuristic(neighbor), neighbor));
        }
    }
}
}
```

Для перевірки роботи реалізації даного стандартного алгоритму A^* , маршрут був прокладений через місто Охтирка (Рис. 1). На рисунку маршрут зображено зеленим кольором. Адаптивний алгоритм A^* при додаванні "гарячої зони" в місті Охтирка при інших однакових даних побудував маршрут іншими дорогами (на рисунку маршрут зображено синім кольором).

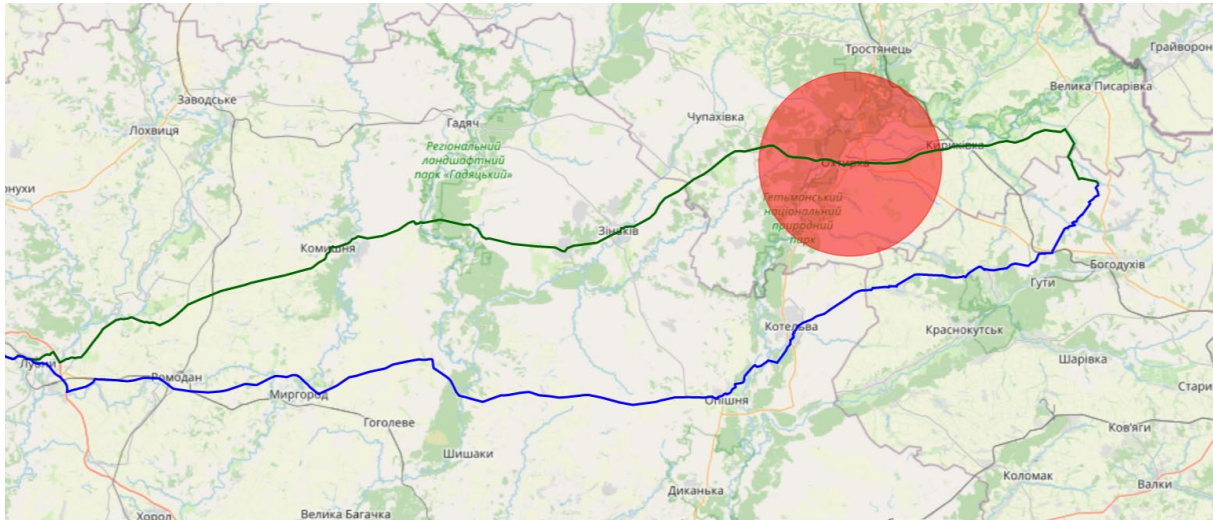


Рисунок 1. Порівняння роботи алгоритмів A^* та адаптивного алгоритму A^* з врахуванням "гарячих зон"

Був проведений порівняльний аналіз роботи запропонованих двох алгоритмів (класичного алгоритму A^* та його адаптацію, яка враховує "гарячі зони"). Результати порівняння представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння алгоритмів A^* та адаптивного алгоритму A^* з урахуванням "гарячих зон"

Характеристика	Алгоритм A^*	Адаптивний алгоритм A^* з урахуванням "гарячих зон"
Функція вартості	$f(n)=g(n)+h(n)$	$f(n) = g(n) + h(n) + \alpha(n)$
Метод евристики	Евклідова або Манхеттенська відстань	Евклідова або Манхеттенська відстань
Врахування "гарячих зон"	Не враховує	Враховує
Складність	$O(b^d)$	$O(b'^d)$, де $b' > b$ через додаткові обмеження
Планування в умовах змінної обстановки	Не враховує зміни	Враховує зміни у вигляді додаткової вартості для небезпечних зон
Придатність для реальних карт	Висока	Вища через можливість об'їзду небезпечних ділянок
Обчислювальна вартість	Низька	Трохи вища через додаткові обчислення для "гарячих зон"
Точність маршруту	Висока	Вища через уникнення небезпечних зон

Порівняння адаптивного алгоритму A^* з урахуванням "гарячих зон" та класичного алгоритму A^* демонструє важливі відмінності в підходах до оптимізації маршрутів у динамічних умовах. Адаптивний алгоритм A^* , завдяки функції вартості, доповненій параметром $\alpha(n)$, враховує додаткові обмеження у вигляді ризикових зон, що дає йому перевагу в адаптації до змінної обстановки. У той час як класичний алгоритм A^* з базовою функцією вартості $f(n)=g(n)+h(n)$ залишається ефективним для статичних середовищ, його

недолік проявляється у неврахуванні небезпечних зон, що може знижувати точність у складних ситуаціях. Адаптивний алгоритм A^* зазвичай має трохи вищу обчислювальну вартість через додаткові розрахунки для "гарячих зон", що, в свою чергу, збільшує складність. Однак така підвищена обчислювальна вартість компенсується більш точною маршрутизацією та можливістю об'їзду ризикових ділянок, що робить адаптивний алгоритм A^* кращим вибором для використання на реальних картах з динамічними умовами.

Висновки

Таким чином, в рамках даного дослідження було проведено аналіз проблем, пов'язаних із вирішенням задачі маршрутизації в динамічному середовищі, що допомогло визначити основні виклики для безпечного та ефективного планування маршруту. Було проведено дослідження в цій сфері, проаналізовано роботу класичного алгоритму A^* і його вдосконалений адаптивний варіант, який враховує "гарячі зони". Порівняння алгоритмів показало, що адаптивний алгоритм A^* забезпечує більшу точність і надійність маршруту завдяки здатності реагувати на динамічні зміни в середовищі, що відкриває нові можливості для його застосування в умовах реальних бойових дій, де важлива оперативність і безпека руху. Запропонований адаптивний алгоритм A^* може бути використаний в транспортних системах, де необхідно уникати небажаних ділянок "гарячих зон", або знайти оптимальні альтернативні маршрути. Додатково, адаптивний алгоритм A^* здатен працювати з даними в реальному часі, що дозволяє реагувати на зміни в обстановці, оперативно перераховуючи маршрут, відповідно до актуальної інформації. Така адаптивність відкриває нові можливості для застосування алгоритму не лише у цивільних, але й у військових середовищах, де критично важливо забезпечувати швидкість і безпеку руху в складних та небезпечних умовах.

Подальшими можливими науковими дослідженнями автори розглядають підвищення швидкодії роботи запропонованого алгоритму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. OpenStreetMap // [Електронний ресурс]. 29.10.2024. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>.
2. Ваврук Є. Я., Мозіль З. Г. Вибір алгоритму пошуку оптимального шляху передавання даних у розподіленій системі. 2018 URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/sep/18542/182073vis905ksmzvichniy-42-48.pdf>.
3. Бульба С. С., Соловійова О. І., Семеренко Ю. О. Дослідження алгоритмів пошуку оптимального шляху 19.04.2024. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.067>.
4. Hybrid A^* path search with resource constraints and dynamic obstacles. Security Intelligent Aerospace Systems / Alán Cortez and oth. 25 January 2023. Vol. 1. URL: <https://doi.org/10.3389/frace.2022.1076271>.
5. Бартіш М. Я., Дудзяний І. М. Дослідження операцій. Частина 2. Алгоритми оптимізації на графах: Підручник. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. 120 с.
6. Comparison of optimal path finding techniques for minimal diagnosis in mapping repair. International Conference on Data and Software Engineering (ICoDSE) / Inne Gartina Husein*, Saiful Akbar, Benhard Sitohang, Fazat Nur Azizah. 2017. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ICODSE.2017.8285853>.
7. Analysis of Dijkstra's Algorithm and A^* Algorithm in Shortest Path Problem. Journal of Physics: Conference Series / Dian Rachmawati1 and Lysander Gustin. 2019. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1566/1/012061>.
8. Трохимчук Р. М. Теорія графів. Навчальний посібник для студентів факультету кібернетики / Р. М. Трохимчук. К.: РВЦ «Київський університет», 1998. 43 с.
9. Шевцов М. В., Ніколюк П. К. Порівняння різних евристичних функцій в алгоритмі A^* 18.07.2023. URL: <https://jait.donnu.edu.ua/article/view/14012>.
10. Change Detection from Remote Sensing to Guide OpenStreetMap Labeling / Conrad M. Albrecht and oth. 2020. Journal: ISPRS Int. J. Geo-Inf. Vol. 9. Num. 427. URL: <https://doi.org/10.3390/ijgi9070427>.