

АЛГОРИТМИ ПОШУКУ НАЙКОРОТШОГО ШЛЯХУ (ДЕЙКСТРИ) В ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИЧНИХ МАРШРУТІВ НА БАЗІ NEO4J

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено застосування графових баз даних, зокрема Neo4j, для вирішення задач транспортної логістики за допомогою алгоритму Дейкстри. Проведено порівняльний аналіз ефективності виконання пошукових запитів у реляційній СУБД PostgreSQL та графовій СУБД Neo4j. Математично обґрунтовано переваги використання моделі зберігання даних без використання індексів (*index-free adjacency*) для обробки зв'язних даних. Встановлено, що використання бібліотеки Graph Data Science у середовищі Neo4j дозволяє скоротити час розрахунку маршрутів у складних топологіях, забезпечуючи прийняття рішень у реальному часі.

Ключові слова: алгоритм Дейкстри, теорія графів, Neo4j, логістика, маршрутизація, PostgreSQL, релаксація ребер, зважений граф.

Abstract

The paper investigates the application of graph databases, specifically Neo4j, for solving transport logistics problems using Dijkstra's algorithm. A comparative analysis of query execution efficiency in the relational DBMS PostgreSQL and the graph DBMS Neo4j is conducted. The advantages of using the index-free adjacency data storage model for processing connected data are mathematically substantiated. It is established that utilizing the Graph Data Science library within the Neo4j environment reduces route calculation time in complex topologies, enabling real-time decision-making.

Keywords: Dijkstra's algorithm, graph theory, Neo4j, logistics, routing, PostgreSQL, edge relaxation, weighted graph.

Вступ

Ефективність сучасних логістичних систем критично залежить від швидкості та точності алгоритмів маршрутизації. Зі зростанням обсягів даних традиційні реляційні бази даних (RDBMS) стикаються з проблемою продуктивності при обробці складних запитів, що вимагають багаторазових операцій з'єднання таблиць (JOIN). В цьому контексті актуальним є перехід до графових моделей даних, які базуються на фундаментальних положеннях дискретної математики та теорії графів.

Графові СУБД, такі як Neo4j, розглядають зв'язки як об'єкти першого класу, що дозволяє реалізувати класичні алгоритми пошуку шляху, зокрема алгоритм Дейкстри, з високою обчислювальною ефективністю. [1] Метою роботи є аналіз переваг використання алгоритму Дейкстри в середовищі Neo4j для оптимізації логістичних маршрутів порівняно з реляційними аналогами.

Результати дослідження

В основі математичного моделювання транспортної мережі лежить поняття зваженого орієнтованого графа $G = (V, E)$, де V — множина вершин (складів, точок доставки), а E — множина ребер (доріг). Кожному ребру $e = (u, v)$ приписується вага $w(e)$, що відображає вартість переходу (відстань, час або фінансові витрати). Оптимальний маршрут визначається як шлях P з мінімальною сумарною вагою $\sum w(e_i)$. Алгоритм Дейкстри, який є стандартом для вирішення задачі пошуку найкоротшого шляху від однієї вершини (SSSP), базується на жадібній стратегії та принципі релаксації ребер. [2] Процедура релаксації перевіряє, чи можна покращити шлях до вершини v , пройшовши через вершину u . Математично це записується нерівністю: якщо $d[v] > d[u] + w(u, v)$, то значення оновлюється $d[v] \leftarrow d[u] + w(u, v)$. Коректність роботи алгоритму гарантується невід'ємністю ваг ребер, що є природним обмеженням для фізичних транспортних мереж.

Реалізація цього математичного апарату суттєво різниться в реляційних та графових системах. У реляційних СУБД, таких як PostgreSQL з розширенням pgRouting, граф моделюється через таблиці вузлів і ребер. Пошук маршруту вимагає побудови топології та виконання складних SQL-запитів, які

емують обхід графа через рекурсію або численні з'єднання індексів. Це призводить до експоненційного зростання часу виконання запиту при збільшенні глибини пошуку. [3] Натомість Neo4j використовує архітектуру «index-free adjacency» (суміжність без індексів), де кожен вузол зберігає фізичні посилання на сусідні вузли. Це дозволяє алгоритму Дейкстри переміщатися по графу зі складністю, що залежить лише від кількості зв'язків у досліджуваній частині мережі, а не від загального розміру бази даних. [1]

Проведене порівняльне дослідження (бенчмаркінг) на наборах даних дорожніх мереж показує суттєву різницю в продуктивності. Для локальних маршрутів (невелика кількість хопів) різниця може бути незначною, проте при розрахунку складних логістичних ланцюгів у масштабах регіону чи країни Neo4j демонструє прискорення у сотні разів. [4] Зокрема, використання бібліотеки Neo4j Graph Data Science (GDS), яка завантажує граф у оперативну пам'ять у стислому форматі, дозволяє виконувати алгоритм Дейкстри за мілісекунди навіть на графах з мільйонами вузлів. Експериментальні дані підтверджують, що там, де запит у PostgreSQL може виконуватися декілька секунд, оптимізована процедура `gds.shortestPath.dijkstra` повертає результат менш ніж за 50 мс, що є критичним для систем динамічної маршрутизації в реальному часі. [5]

Висновки

Застосування апарату теорії графів та алгоритму Дейкстри в середовищі Neo4j забезпечує значні переваги при вирішенні задач логістичної оптимізації порівняно з реляційними підходами. Математична модель графа природно відображається в структуру зберігання даних Neo4j, що усуває накладні витрати на операції з'єднання таблиць. Використання спеціалізованих алгоритмічних бібліотек дозволяє досягти високої швидкодії, необхідної для побудови адаптивних транспортних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Robinson I., Webber J., Eifrem E. Graph Databases: New Opportunities for Connected Data. 2nd ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2015. 238 p.
2. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Рівест Р., Стайн К. Вступ до алгоритмів. Київ: К.І.С., 2019. 1288 с.
3. Fotache M., Teacă N. Query Performance Comparison of PostgreSQL vs. Neo4j. A Basic Distributed Setup on OpenStack // ResearchGate. – 2024.
4. Miler M., Medak D., Odobašić D. The shortest path algorithm performance comparison in graph and relational database on a transportation network // Promet - Traffic & Transportation. – 2014. – Vol. 26, № 1. – P. 75–82.
5. Dijkstra Source-Target Shortest Path - Neo4j Graph Data Science [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://neo4j.com/docs/graph-data-science/current/algorithms/dijkstra-source-target/>.

Мусієнко Ігор Сергійович — студент групи 1KI-25МС, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shark9248@gmail.com

Добровольська Наталія Вікторівна — канд. технічних наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Науковий керівник: **Добровольська Наталія Вікторівна** — канд. технічних наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Musienko Ihor S. — student of group 1KI-25MS, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: shark9248@gmail.com

Dobrovol'ska Natalia V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Supervisor: **Dobrovol'ska Natalia V.** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia