

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИВЧЕННІ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

Ругало Дмитро, Халецька Зоя

*Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,
м. Кропивницький, Україна*

В статті проілюстровано застосування системного та порівняльного аналізу для розробки комплексних методичних рекомендацій щодо вибору цифрових технологій для вивчення та практичного використання теорії графів. Актуальність дослідження зумовлена складністю опанування абстрактних математичних концепцій без візуалізації та практичного моделювання на реальних даних.

Сучасний технологічний ландшафт включає програмні бібліотеки, графові бази даних та розподілені фреймворки, що відкриває широкі можливості для освітніх та дослідницьких цілей. Попри наявність численних досліджень окремих аспектів графових технологій, відсутній комплексний підхід до їх порівняльного аналізу та вибору з урахуванням множини критеріїв, що може призвести до значних втрат ресурсів, часу та неможливості досягнення проектних цілей.

Метою роботи є розробка методики вибору технологій на основі багатокритеріального порівняльного аналізу для забезпечення ефективного навчально-дослідницького процесу. Було досліджено теоретичні основи графового аналізу та проведено огляд сучасних цифрових технологій. Розроблено комплексну систему критеріїв, адаптовану для потреб дослідників-початківців, що охоплює зручність використання, функціональні можливості, доступність та продуктивність. На основі аналізу синтезовано модель прийняття рішень щодо вибору технології для виконання навчальних та наукових проектів.

Ключовим результатом є модель вибору технології на основі зваженої суми оцінок та каталог архітектурних патернів, які допомагають систематизувати знання про побудову графових систем. Апробація методики на прикладі навчально-дослідної задачі аналізу соціальної мережі наукових співпраць підтвердила її ефективність. Обґрунтовано використання графової бази даних Neo4j як оптимального інструменту для вивчення графових алгоритмів завдяки наочності та розвиненій екосистемі. Запропоновані методичні рекомендації сприяють глибшому розумінню теорії графів через призму сучасних цифрових інструментів.

Ключові слова: теорія графів, цифрові технології, графовий аналіз, модель вибору, освітні інструменти, Neo4j, багатокритеріальне оцінювання.

Using digital technologies in the study of graph theory

D. Ruhalo, Z. Khaletska

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytsky, Ukraine

The article illustrates the use of system and comparative analysis to develop comprehensive methodological recommendations for the selection of digital technologies for the study and practical use of graph theory. The relevance of the study is due to the difficulty of mastering abstract mathematical concepts without visualization and practical modeling on real data.

The modern technological landscape includes software libraries, graph databases, and distributed frameworks, which opens up wide opportunities for educational and research purposes. Despite the presence of numerous studies of individual aspects of graph technologies, there is no comprehensive approach to their comparative analysis and selection taking into account a variety of criteria, which can lead to significant losses of resources, time, and the inability to achieve project goals.

The aim of the work is to develop a methodology for selecting technologies based on multi-criteria comparative analysis to ensure an effective educational and research process. The theoretical foundations of graph analysis were investigated and a review of modern digital technologies was conducted. A comprehensive system of criteria adapted to the needs of novice researchers has been developed, covering usability, functionality, accessibility, and productivity. Based on the analysis, a decision-making model for choosing a technology for implementing educational and scientific projects has been synthesized.

The key result is a technology selection model based on a weighted sum of scores and a catalog of architectural patterns that help systematize knowledge about building graph systems. Testing the methodology on the example of an educational and research problem of analyzing a social network of scientific collaborations confirmed its effectiveness. The use of the Neo4j graph database as an optimal tool for studying graph algorithms due to its clarity and developed ecosystem is justified. The proposed methodological recommendations contribute to a deeper understanding of graph theory through the prism of modern digital tools.

Keywords: graph theory, digital technologies, graph analysis, selection model, educational tools, Neo4j, multi-criteria evaluation.

Постановка проблеми. Теорія графів є фундаментальною складовою сучасної математичної підготовки фахівців у галузі комп'ютерних наук. Однак, вивчення цього розділу дискретної математики часто ускладнюється високим рівнем абстракції. Ефективне засвоєння матеріалу потребує переходу від теоретичних викладок до практичного моделювання реальних систем

(соціальних мереж, транспортних потоків тощо). Стрімкий розвиток цифрових технологій надає широкий спектр інструментів для цього: від бібліотек NetworkX та igraph до потужних систем керування базами даних (Neo4j, Amazon Neptune).

Основна проблема полягає у відсутності універсальних та систематизованих методичних рекомендацій для обґрунтованого вибору відповідного інструментарію для навчальних та дослідницьких цілей. Молоді науковці часто стикаються з дилемою: використовувати прості бібліотеки, які легкі у вивченні, але обмежені у продуктивності, чи опановувати складні промислові системи. Відсутність систематизованих методичних рекомендацій, які б враховували специфіку навчального процесу (обмежений час, потреба у візуалізації, безкоштовність ліцензій), ускладнює практичне опанування теорії графів. Таким чином, актуальною науково-прикладною проблемою є розробка комплексної методики вибору та архітектурного проектування систем графового аналізу, яка інтегрує багатокритеріальне оцінювання та сучасні інженерні патерни для поглибленого вивчення дисципліни.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження у сфері графового аналізу та технологій його реалізації у науці та освіті ведуться у кількох ключових напрямках. Перший напрям зосереджений на розвитку алгоритмів графового аналізу та їх ефективності, наприклад, роботи Golino Н. та ін. [7] щодо продуктивності експлораторного графового аналізу. Другий напрям охоплює архітектурні рішення. Усенко В. [3] досліджує адаптивні підходи до аналізу топологічної зв'язності, що є критичним при проектуванні великих систем. Horbova O. V., Syrota O. A. [4] акцентують увагу на використанні патернів, що є важливим методичним елементом при вивченні архітектури ПЗ. Однак, більшість робіт мають вузькоспеціалізований характер. Вони або фокусуються на теоретичній оптимізації конкретного алгоритму, або описують архітектуру вже реалізованої системи без подання загальної методики вибору технології. Комплексний підхід до порівняння сучасних графових технологій в контексті їх наукового та навчального потенціалу, висвітлено недостатньо.

Метою статті є розробка та обґрунтування методичних рекомендацій щодо вибору цифрових технологій, які сприяють ефективному вивченню теорії графів, шляхом систематизації критеріїв оцінювання, моделювання процесу прийняття рішень та демонстрації практичного застосування на навчальному прикладі.

Виклад основного матеріалу (результатів) дослідження. Для досягнення поставленої мети було послідовно виконано три ключові етапи: розробка системи критеріїв для порівняльного аналізу, синтез моделі вибору технологій та формування каталогу архітектурних патернів.

1. Розробка системи критеріїв для порівняльного аналізу.

Була розроблена адаптована ієрархічна система критеріїв, яка охоплює всі значущі аспекти вибору програмних засобів для освітньо-наукових завдань графового аналізу. Ця система поділена на п'ять основних груп:

- * **Продуктивність:** Включає швидкість виконання базових операцій (вставка, видалення, пошук сусідів), латентність запитів, пропускну здатність (throughput) та ефективність обчислення ключових алгоритмів (наприклад, PageRank, пошук найкоротшого шляху).

- * **Масштабованість:** Оцінює здатність системи обробляти зростаючий обсяг даних. Розділяється на вертикальну (за рахунок ресурсів одного вузла) та горизонтальну (розподіл даних та обчислень по кластеру) масштабованість.

- * **Функціональність:** Оцінює повноту та глибину підтримки графових алгоритмів, гнучкість мови запитів (наприклад, підтримка Cypher, Gremlin, SQL/Graph), наявність вбудованих інструментів для імпорту/експорту даних та візуалізації.

- * **Експлуатаційна зручність та екосистема:** Включає якість документації, активність спільноти, простоту розгортання та адміністрування, наявність API для різних мов програмування, а також підтримку транзакцій та відмовостійкість.

* Економічні та ліцензійні аспекти: Оцінка вартості ліцензування (якщо не Open Source), сукупної вартості володіння (Total Cost of Ownership, TCO), включаючи витрати на обладнання та підтримку.

Кожному критерію присвоюється ваговий коефіцієнт (від 0 до 1), що відображає його важливість для конкретного проекту, дозволяючи врахувати унікальні пріоритети, наприклад, висока масштабованість для соціальної мережі або критична латентність для системи виявлення шахрайства.

2. Синтез моделі вибору технологій на основі багатокритеріального оцінювання.

Для формалізації процесу вибору була розроблена модель прийняття рішень, яка базується на методі зваженої суми (Weighted Sum Model, WSM). Цей метод забезпечує об'єктивне порівняння альтернативних технологій (наприклад, Neo4j, GraphX, NetworkX) через агрегацію їхніх оцінок, помножених на вагові коефіцієнти. Для навчальних проектів було встановлено вищі вагові коефіцієнти для критеріїв «Зручність» та «Екосистема».

Процедура вибору виглядає так:

1. Ідентифікація та оцінювання альтернатив: Кожна технологія-кандидат оцінюється за шкалою (наприклад, від 1 до 5) по кожному з розроблених критеріїв.

2. Призначення вагових коефіцієнтів: Керівник проекту або архітектор визначає вагові коефіцієнти (w_j) для кожного критерію j відповідно до пріоритетів проекту $\sum w_j = 1$.

3. Обчислення зваженої оцінки: Для кожної технології i обчислюється загальна оцінка S_i за формулою: $S_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot w_j$, де r_{ij} – оцінка технології i за критерієм j , а w_j – ваговий коефіцієнт критерію j .



Рис. 1.1. Процес вибору графової технології

Технологія з найбільшою сумарною зваженою оцінкою $S_{\max}$ є рекомендованою для проекту. Ця модель дозволяє перевести якісні характеристики та пріоритети в кількісно обґрунтоване рішення.

3. Розробка каталогу архітектурних патернів.

Вибір інструменту є лише першим кроком, критично важливим є його правильне інтегрування в загальну архітектуру системи. Вивчення архітектурних патернів, дозволяє студентам переходити від теорії алгоритмів до проектування реальних систем. Для забезпечення надійності, масштабованості та гнучкості було розроблено каталог архітектурних патернів для графових систем, що набуває подальшого розвитку. Серед ключових патернів:

* Патерн Гібридної Архітектури (Hybrid Architecture): Використовується, коли дані мають подвійну природу. Наприклад, зберігання основних атрибутів об'єктів у традиційній реляційній БД (для ACID-гарантій) та зберігання складних зв'язків у графовій БД (для ефективного обходу). Це мінімізує недоліки кожної бази даних.

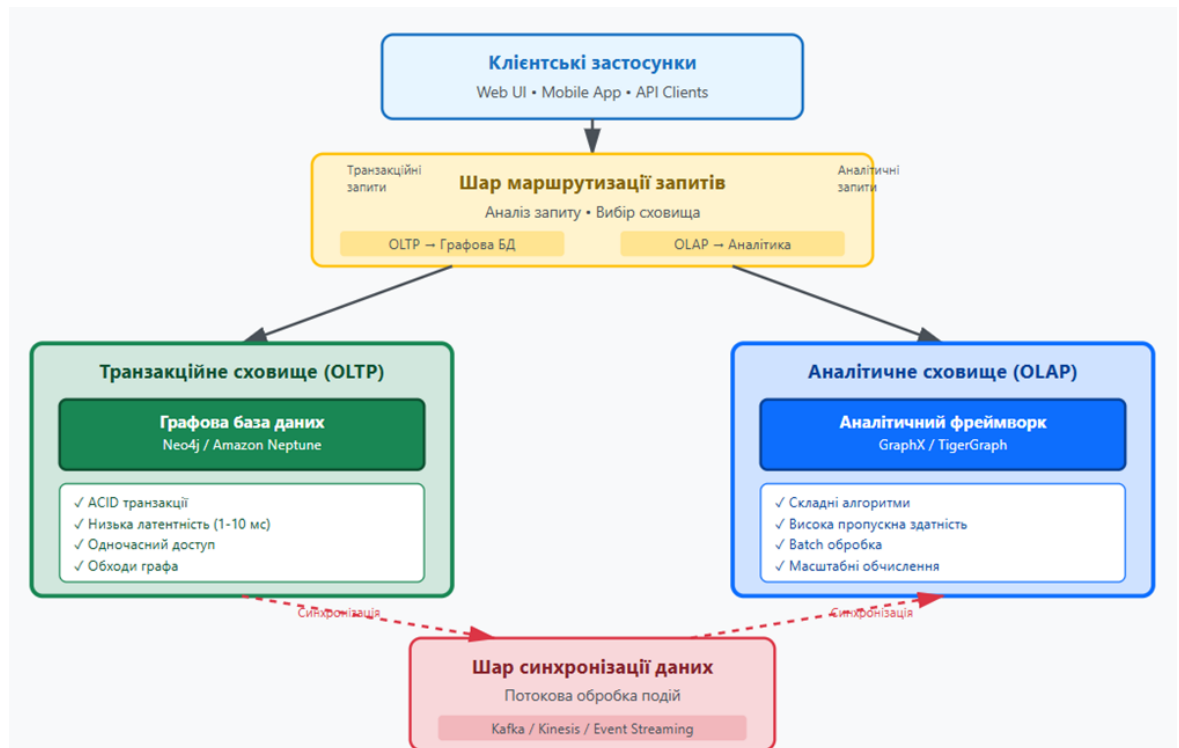


Рис. 1.2. Патерн гібридної архітектури графової системи

* Патерн Кешування Графових Обходів: Застосовується для оптимізації продуктивності. Результати ресурсомістких графових обчислень (наприклад, центральність між посередництвом або великі спільноти), які нечасто змінюються, зберігаються у швидкому кеші (Redis) або у вигляді властивостей вершин, що значно знижує латентність наступних запитів.

* Патерн Графового Машинного Навчання (GNN Integration): Забезпечує інтеграцію графової платформи з фреймворками машинного навчання. Дані витягуються з графової БД, обробляються (node embedding, feature extraction) і передаються до GNN-моделей для задач прогнозування зв'язків або класифікації вершин.

* Патерн Спостережуваності (Observability): Включає інструменти для моніторингу, логування та трасування операцій графової СУБД, що є критично

важливим для діагностики проблем продуктивності у складних розподілених системах.

Практична апробація розробленої методики була проведена на прикладі задачі аналізу соціальної мережі наукових співпраць. Задача імітує реальний дослідницький проект. Вихідні дані моделювали мережу з понад мільйоном науковців та кількома мільйонами зв'язків. Функціональні вимоги включали швидкий пошук співавторів, виявлення наукових спільнот (Community Detection) та розрахунків метрик впливу (наприклад, центральність за посередництвом).

За результатами багатокритеріального оцінювання для реалізації було обрано Neo4j (Community Edition). Вибір зумовлений високою оцінкою за критерієм «Зручність» (наявність візуального інтерфейсу Neo4j Browser), потужною бібліотекою алгоритмів Graph Data Science та безкоштовністю для навчання. Була спроектована архітектура на основі патерну Гібридної Архітектури для ефективної обробки метаданих та графових даних.

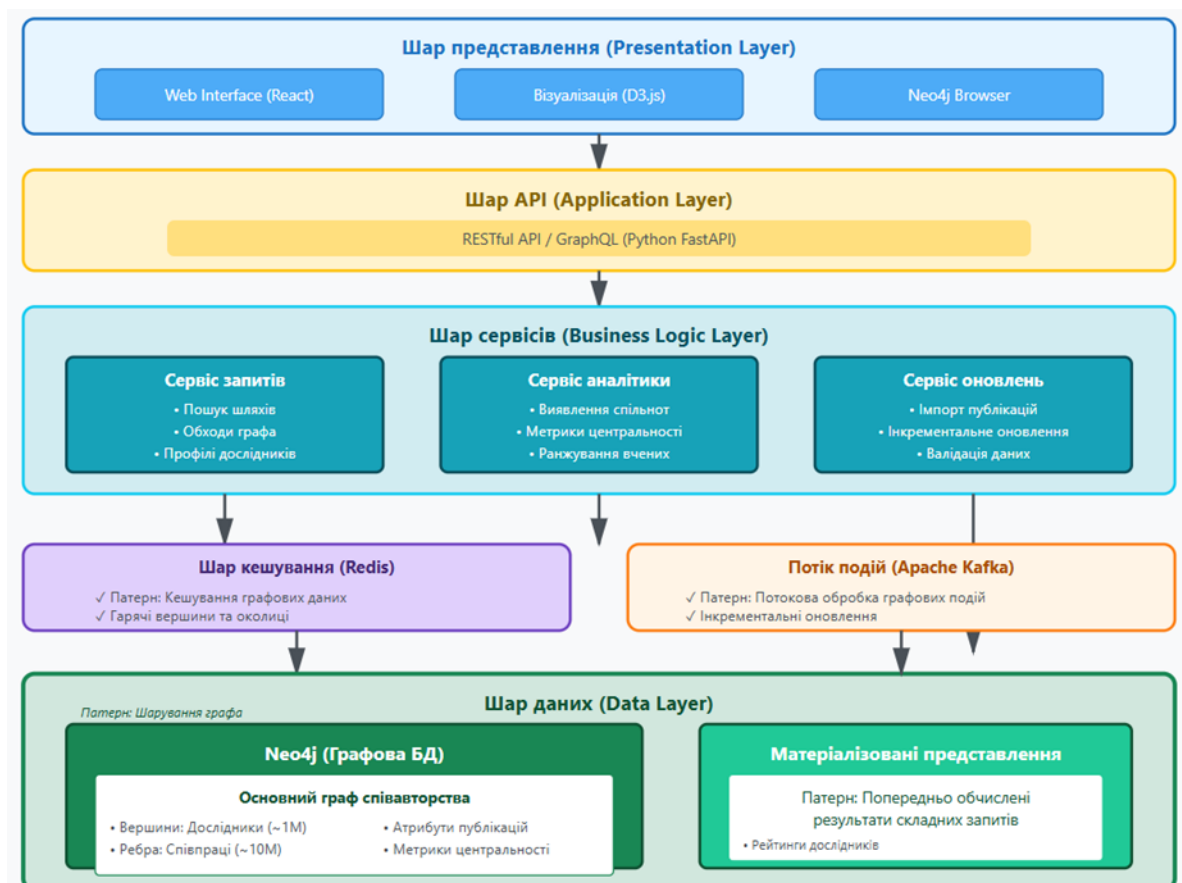


Рис. 1.3. Архітектура системи аналізу мережі наукових співпраць

Прототип системи, реалізований на Neo4j та Python, продемонстрував високу продуктивність. Виконання складних запитів (глибокий обхід та розрахунок PageRank на всьому графі) знаходилось у межах прийнятної латентності, що підтвердило правильність вибору технології та архітектурних рішень, обґрунтованих методикою. Результати апробації підтвердили, що методичні рекомендації забезпечують зниження ризиків неправильного вибору та оптимізацію архітектурних рішень, підтвердивши, що правильний вибір технології значно полегшує процес дослідження та засвоєння матеріалу.

Висновки та перспективи подальших пошуків у напрямі дослідження.

У результаті проведеного дослідження була вирішена актуальна науково-прикладна задача систематизації процесу вибору цифрових технологій при вивченні завдань теорії графів. Основними досягненнями є:

1. Розроблена комплексна багатокритеріальна система критеріїв, яка дозволяє оцінювати програмні засоби за технічними, функціональними та економічними аспектами.
2. Синтезована модель прийняття рішень на основі методу зваженої суми, яка забезпечує структурований та кількісно обґрунтований вибір найбільш придатної технології, мінімізуючи суб'єктивізм.
3. Сформований каталог архітектурних патернів, який служить інженерним орієнтиром для побудови надійних та масштабованих графових систем.
4. Проведена успішна апробація методики на прикладі аналізу наукової співпраці, що підтвердила практичну цінність та ефективність запропонованих рекомендацій.
5. Застосування запропонованої моделі та архітектурних патернів у навчальному процесі сприяє формуванню у здобувачів освіти практичних навичок роботи з даними, розумінню принципів побудови складних систем та підвищує якість наукових досліджень.

Подальші дослідження у напрямі використання цифрових технологій при вивченні теорії графів можуть бути зосереджені на створенні навчальних

лабораторних практикумів на базі розглянутих технологій та розширенні каталогу патернів для задач машинного навчання на графах.

Список використаної літератури:

1. Борисова С. Аналіз моделей процесу проектування об'єктів дизайну. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2025. С. 99. URL: <https://www.apnn-journal.in.ua/...#page=99>
2. Настенко Є. А. та ін. *Методи моделювання складних систем і процесів*. 2022. URL: <https://ela.kpi.ua/server/.../content>
3. Усенко В. Адаптивні підходи до аналізу топологічної зв'язності в архітектурних системах. *Архітектурний вісник КНУБА*. 2025. С. 300–305. URL: <http://av.knuba.edu.ua/article/view/335968/324745>
4. Horbova O. V., Syrota O. A. Дослідження наслідків використання патернів у побудові архітектури кросплатформних додатків. *Science and Transport Progress*. 2021. С. 65–76. URL: <https://stp.ust.edu.ua/article/view/258109/255714>
5. Харченко М. Аналіз та використання патернів проектування. 2021. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/.../content>
6. Зацепін К. О. Метод тестування безпеки програмного забезпечення для захисту інформації в корпоративній мережі. 2024. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/.../content>
7. Golino H. et al. Investigating the performance of exploratory graph analysis... *Psychological Methods*. 2020. Vol. 25. P. 292. URL: <https://psycnet.apa.org/record/2020-19298-001>
8. Kline R. B. *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*. Guilford Press, 2023. URL: <https://books.google.com/>
9. Masry A. et al. ChartQA: A benchmark for question answering about charts. *ACL 2022*. URL: <https://aclanthology.org/2022.findings-acl.177.pdf>
10. Meeker W. Q., Escobar L. A., Pascual F. *Statistical Methods for Reliability Data*. Wiley, 2021. URL: <https://books.google.com/>
11. Simonsohn U., Simmons J., Nelson L. Specification Curve Analysis. *Nature Human Behaviour*. 2020. Vol. 4. P. 1208–1214. URL: <https://www.nature.com/articles/s41562-020-0912-z>

Відомості про авторів:

Ругало Дмитро Андрійович – студент II курсу магістратури факультету інформаційних технологій, математики та природничих наук Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка, тел. +380957052924, e-mail: 12072663@cuspu.edu.ua.

Халецька Зоя Петрівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, фізики та методик викладання Центральноукраїнського державного

університету імені Володимира Винниченка, тел. +380991817048,
e- mail: z.p.khaletska@cuspu.edu.ua.