

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Державного університету «Житомирська політехніка»
доктору педагогічних наук, професору
БАКАЛЮК Тетяні Анатоліївні

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, доцента ВОРОТНІКОВА Володимира
Володимировича
на дисертаційну роботу САПОЖНИКА Дмитра Олеговича
на тему «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального розрізу за
допомогою квантово-гібридних алгоритмів»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 12 «Інформаційні технології»
за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Сапожника Д. О. присвячена розробці методів та алгоритмів для розв'язання задачі максимального розрізу графа із застосуванням квантово-гібридних обчислювальних підходів. Задача Max-Cut належить до базових задач комбінаторної оптимізації, має NP-складний характер і водночас використовується для моделювання кластеризації, аналізу мережевих структур, розподілу ресурсів, логістичних маршрутів та інших прикладних процесів.

Актуальність теми посилюється тим, що класичні точні методи швидко втрачають практичну придатність зі зростанням розмірності графа, а наближені методи не завжди забезпечують прогнозовану якість. Квантові та квантово-гібридні алгоритми відкривають перспективний напрям пошуку нових програмно-алгоритмічних рішень, але їх застосування обмежується шумом, похибками гейтів, апаратною зв'язністю та нестабільністю варіаційного налаштування параметрів.

У цьому контексті спрямованість дисертації на створення одноітераційного алгоритму QASPA, у якому структура графа безпосередньо враховується під час параметризації квантової схеми, є своєчасною. Робота корелює з актуальними тенденціями квантового програмування і водночас залишається у полі інженерії програмного забезпечення, оскільки запропонований підхід доведено до програмної реалізації та експериментальної перевірки.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення сформульовані послідовно, аргументовано і спираються на належну методологічну базу. Автором використано системний

підхід, математичне моделювання, методи теорії алгоритмів, об'єктно-орієнтованого проєктування, моделювання квантових обчислень, експериментального та статистичного аналізу. Такий набір методів відповідає природі поставлених завдань і забезпечує комплексне дослідження як алгоритмічної, так і програмно-технічної складової роботи.

Достовірність результатів підтверджується програмною реалізацією QASPA на базі Qiskit, виконанням експериментів у середовищі AerSimulator та запуском на реальних квантових пристроях IBM Quantum. У роботі проведено зіставлення запропонованого підходу з QAOA і методом повного перебору за критеріями якості розв'язку, стабільності, масштабованості та часу виконання. За матеріалами дисертації, QASPA демонструє середній коефіцієнт апроксимації 0.98-1.00 і 100% успішність у межах досліджених тестів.

Важливо, що в дисертаційному дослідженні наведено не лише підсумкові висновки, а й параметри експериментальної перевірки: графи Complete, Cycle та Erdős-Rényi з $p=0.3$, $p=0.5$ і $p=0.7$, діапазон 3-14 вершин для порівняльних тестів, а також окреме вимірювання часу виконання для повних графів із 10-19 вершинами. Така деталізація робить результати більш відтворюваними та придатними для подальшої перевірки.

Наукова новизна отриманих результатів.

Дисертаційна робота містить нові результати, що розвивають методи квантово-гібридної оптимізації для задач комбінаторного типу. Серед найбільш вагомих положень варто відзначити:

1. розроблено квантово-гібридний алгоритм QASPA для задачі максимального розрізу графа, який на відміну від QAOA не потребує багатоітераційного циклу класичної оптимізації параметрів;
2. запропоновано детермінований метод графо-залежної параметризації варіаційної квантової схеми, у межах якого структура графа відображається у матрицю кутів обертання;
3. розроблено метод масштабування кількості квантових запусків на основі афінно-експоненційної апроксимації, що дає змогу визначати статистично доцільну кількість вимірювань при зростанні розмірності задачі;
4. запропоновано спосіб побудови квантових схем із використанням шару гейтів Адамара та тригейтового блоку CX-RY-CX, орієнтований на зменшення глибини квантового кола та адаптацію до обмежень сучасних квантових процесорів.

Зазначені результати мають як теоретичне значення для розвитку алгоритмічних підходів квантово-гібридної оптимізації, так і прикладну спрямованість, оскільки доведені до програмної реалізації та перевірені на симуляційній і апаратній платформах.

Повнота опублікування основних положень дисертації.

Основні наукові положення дисертаційної роботи достатньо повно відображені у публікаціях здобувача. За темою дослідження опубліковано 11 наукових праць, серед яких 4 статті у фахових наукових виданнях України категорії «Б», 1 публікація у матеріалах міжнародної конференції, що індексується у базі даних Scopus, а також 6 публікацій у матеріалах наукових конференцій. Результати дослідження доповідалися на міжнародних і всеукраїнських наукових заходах, що підтверджує належний рівень апробації роботи.

Тематика публікацій узгоджується зі змістом дисертації: у них розглянуто питання квантового програмування, реалізації квантових вентилів, застосування квантових комп'ютерів у прикладних сферах, QUBO-подання задач і безпосередньо розв'язання Max-Cut за допомогою квантово-гібридного підходу. Це свідчить про поступове розгортання дослідницької логіки від аналізу інструментарію до формування авторського алгоритмічного рішення.

Теоретичне та практичне значення результатів.

Теоретична цінність дисертації полягає у поглибленні наукових уявлень про побудову квантово-гібридних алгоритмів для NP-складних задач, зокрема шляхом переходу від ітераційного підбору параметрів до детермінованого формування квантової схеми на основі властивостей графа. Практичне значення полягає у створенні програмних модулів для розв'язання задач Max-Cut із використанням Qiskit та можливістю виконання на симуляторах і квантових пристроях IBM Quantum.

Практична цінність підсилюється тим, що програмна реалізація охоплює підготовку графа, формування матриці кутів, побудову схеми, локальне або хмарне виконання та обробку отриманих бітових рядків. Запропоновані підходи можуть бути використані у системах підтримки прийняття рішень, задачах логістики, балансування навантаження в мережах, ресурсного планування та інших сферах, де задачі оптимізації можуть бути зведені до графових моделей Max-Cut. Практичне впровадження результатів підтверджується довідками від ТОВ «Альянс Діджитал», ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ЦЕНТР ДУАЛЬНОЇ ОСВІТИ» та ТОВ «Н-ІКС ДЕЛІВЕРІ».

Оцінка структури та оформлення дисертації.

Дисертаційна робота має логічну будову і складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг становить 234 сторінки, з яких 167 сторінок основного тексту; робота містить 2 таблиці, 63 рисунки, список використаних джерел із 136 найменувань, з яких 131 – іноземною мовою, та 5 додатків. Структура дослідження відповідає поставленій меті: від аналізу сучасних

підходів до розробки алгоритму, програмної реалізації та експериментальної перевірки.

У першому розділі дисертації розкрито теоретичні та технологічні передумови дослідження, подано постановку задачі Max-Cut, охарактеризовано її обчислювальну складність, розглянуто класичні, квантові та квантово-гібридні підходи. Здійснено аналіз обмежень QAOA, NISQ-пристроїв, апаратної топології та шумів, обґрунтовано потребу в альтернативній схемі обчислень.

У другому розділі представлено запропонований квантово-гібридний алгоритм QASPA, описано перетворення структури графа у матрицю кутів, обґрунтовано використання кута $\pi/4$, розкрито побудову схеми із шаром гейтів Адамара та блоками CX-RY-CX, а також запропоновано підхід до масштабування кількості запусків.

Третій розділ дисертації присвячено програмній реалізації й експериментальній перевірці запропонованого алгоритму з використанням платформи Qiskit та AerSimulator на IBM Quantum. Описано тестування на ручних і згенерованих графах, здійснено порівняння з QAOA та повним перебором. Опис запуску на IBM Marrakesh і труднощів транспіляції для IBM Eagle демонструє увагу до реальних апаратних обмежень.

Мова викладення є науковою, термінологія використовується коректно, матеріал подано послідовно. У тексті поєднано математичний апарат, алгоритмічні описи, схеми, програмну реалізацію та результати експериментів, що забезпечує цілісне представлення виконаного дослідження.

Дотримання принципів академічної доброчесності.

Підстав для встановлення порушень академічної доброчесності у дисертаційній роботі не виявлено, зазначено, що наукові положення, мета, завдання, експериментальна частина та висновки сформульовані автором особисто, а результати інших дослідників супроводжуються належними посиланнями. Використання технологій штучного інтелекту обмежено допоміжною візуалізацією і не стосувалося створення тексту дисертації чи формування наукових результатів.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи.

1. Методику тестування доцільно доповнити використанням визнаних галузевих бенчмарків (наприклад, **G-set** або **SuiteSparse Matrix Collection**) замість використання лише синтетичних графів малої розмірності. Це дозволить об'єктивно оцінити поведінку алгоритму на графах зі складною топологією, які є репрезентативними для реальних інженерних задач Big Data, та виявити «вузькі місця» при переході до задач великої розмірності.

2. Потребує розширення перевірка QASPA для зважених графів. Оскільки в дисертації описано механізм урахування ваг, доцільно продемонструвати його

ефективність на порівняльних результатах, а не обмежуватися незваженими структурами.

3. Хоча автор в роботі демонструє високу швидкодію власного алгоритму QASPA на рівні виконання квантових схем, варто чіткіше розмежувати цей показник та реальні системні затримки (latency), притаманні сучасній хмарній квантовій інфраструктурі. Необхідно уникнути трактування результатів як таких, що претендують на застосування в системах реального часу (Real-time). З огляду на ітеративну природу гібридних обчислень та обмеження NISQ-пристроїв, роботу доцільно позиціонувати як вузькоспеціалізований апарат для стратегічного (Batch) аналізу великих масивів даних (Big Data). Така спеціалізація дозволить сфокусувати алгоритм на задачах, де пошук глобальних мінімумів у складних топологіях є критичним для економічної ефективності (наприклад, довгострокове планування інфраструктурних мереж), і коректно змістити акцент із "швидкості реагування" на "якість отриманого оптимізаційного рішення що є пріоритетом для стратегічного планування.

4. Метод визначення кількості запусків $N * (n) = \text{ceil}(0.03047 \cdot 2^n + 1016.2)$ варто надалі підтвердити на більшій кількості контрольних точок і доповнити оцінкою статистичної впевненості у виділенні домінантних бітових рядків у розподілі частот результатів вимірювань з урахуванням впливу квантового шуму.

5. Необхідно чіткіше окреслити межі ефективності алгоритму, за якими квантовий прискорювач поступається класичним евристичним методам (наприклад, Simulated Annealing). Зокрема, потребує роз'яснення процес транспіляції графових задач: як саме відбувається декомпозиція великих графів для виконання на обмеженій топології кубітів та як при цьому зростає глибина схеми через додавання SWAP-гейтів та яким чином цей оверхед впливає на точність результату.

6. Доцільно обґрунтувати концепцію інтеграції QASPA у багаторівневі системи управління, де стратегічний квантовий рівень (що відповідає за глобальну оптимізацію) доповнюється реактивним класичним шаром. Такий класичний шар має забезпечувати оперативне коригування розв'язків при змінах топології графа без необхідності перерахунку всієї квантової схеми. Це дозволить ефективно інтегрувати розробку в сучасні стеки обробки даних, де квантовий компонент виконує функцію «інтелектуального ядра», а класична логіка – «буфера швидкої адаптації».

7. Варто усунути розбіжності у зазначених обсягах роботи між вступом та основною частиною дисертації.

Наведені зауваження мають рекомендаційний характер і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Слід підкреслити, що більшість зазначених питань фактично продовжує логіку самої дисертації, у якій автор окреслює необхідність подальшого масштабування, роботи зі зваженими графами, вдосконалення методів пом'якшення похибок і розширення порівняльної бази. Це свідчить про цілісне розуміння здобувачем меж отриманих результатів і перспектив розвитку запропонованого підходу.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота Сапожника Дмитра Олеговича на тему «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання розробки методів та алгоритмів квантово-гібридного розв'язання задачі максимального розрізу графа. Робота характеризується належною науковою новизною, обґрунтованістю висновків, практичною значущістю та достатньою апробацією результатів.

З урахуванням актуальності теми, рівня наукових результатів, повноти їх опублікування та відповідності змісту спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, визначеним «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а її автор, Сапожник Дмитро Олегович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення».

РЕЦЕНЗЕНТ:

Професор кафедри комп'ютерної
інженерії та кібербезпеки
Державного університету
«Житомирська політехніка»,
доктор технічних наук, доцент

«08» червня 2026 року

Володимир ВОРОТНИКОВ

Підпис Григоренко
Засвідчую:
Учений секретар
Житомирська політехніка

Олена Григоренко

