

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

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора, професора кафедри комп'ютерних
інформаційних технологій, проректора з наукових досліджень та трансферу
технологій Національного університету «Київський авіаційний інститут»

ГНАТЮКА Сергія Олександровича

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 дисертації.

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладну задачу побудови квантово-гібридних методів для розв'язання задачі максимального розрізу графа. Задача Max-Cut є однією з ключових задач теорії графів і комбінаторної оптимізації, оскільки використовується для формалізації широкого кола практичних проблем: від розподілу ресурсів і балансування навантаження до аналізу мереж та кластеризації даних. Її NP-складність викликає суттєві труднощі при переході до графів великої розмірності, де класичні точні методи стають обчислювально надто витратними.

Розвиток квантових технологій відкриває нові можливості для переосмислення підходів до складних оптимізаційних задач. Водночас сучасні квантові пристрої функціонують в умовах NISQ-ери, де реальними обмежувальними чинниками є шум, похибки багатокубітних операцій, невелика кількість доступних кубітів і топологічні особливості процесорів. Варіаційні алгоритми на кшталт QAOA є перспективними, проте їх практична ефективність залежить від оптимізації параметрів, вибору початкових значень та складності параметричного ландшафту.

Виходячи з вищезазначеного, дисертація Сапожника Д. О. спрямована на розробку алгоритму QASPA з детермінованою графо-залежною параметризацією та одноітераційною архітектурою, є актуальною. Вона відповідає потребі у створенні програмно-алгоритмічних рішень, які можуть працювати з урахуванням

обмежень реальних квантових платформ і водночас забезпечувати прийнятну якість оптимізаційних результатів.

Варто також наголосити, що дослідження виконане на перетині теорії алгоритмів, квантового програмування та інженерії програмного забезпечення. Саме така міждисциплінарність є важливою для сучасних оптимізаційних задач, оскільки практичне використання квантових підходів потребує не лише математичної ідеї, а й продуманої програмної реалізації, засобів інтеграції з хмарними платформами та процедур перевірки результатів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів, їх достовірності та новизни

Наукові результати дисертації мають належний рівень аргументації. Автором послідовно сформульовано мету, об'єкт, предмет і завдання дослідження; обрані методи відповідають змісту поставлених задач. У роботі поєднано аналіз класичних і квантових підходів, математичне моделювання задачі Max-Cut, розробку алгоритмічної структури QASPA, програмну реалізацію та експериментальну валідацію.

Достовірність отриманих положень підкріплена експериментами на симуляторах та реальному обладнанні IBM Quantum. Зокрема, програмна реалізація на платформі Qiskit дала можливість перевірити алгоритм у локальному середовищі AerSimulator і виконати запуск на квантових процесорах IBM із застосуванням технік транспіляції та пом'якшення помилок. Порівняння з QAOA і методом повного перебору дозволило оцінити не лише якість розв'язку, а й стабільність та часові характеристики запропонованого підходу.

У дисертації проведено підбір кута для повних, циклічних і випадкових графів Erdős-Rényi з імовірностями 0.3, 0.5 та 0.7 у діапазоні 3-14 вершин. Для значення $\pi/4$ отримано 100% успішних запусків і середнє відношення наближення 0.9931, що є важливим аргументом на користь обраної параметризації.

Наукова новизна дисертації полягає у тому, що вперше:

- розроблено квантово-гібридний алгоритм QASPA для розв'язання задачі максимального розрізу графа, який, на відміну від алгоритму QAOA, реалізує одноітераційну архітектуру без використання багатоітераційної класичної оптимізації параметрів, що дозволяє зменшити обчислювальні витрати та забезпечує стабільність результатів із досягненням 100% успішності виконання алгоритму для досліджених випадків при середньому коефіцієнті апроксимації в межах 0.98-1.00;

- запропоновано детермінований метод графо-залежної параметризації варіаційної квантової схеми, що базується на відображенні структури графа у матрицю кутів обертання з фіксованим значенням $\pi/4$ для наявних ребер та реалізує фазове кодування зв'язків графа через обертання навколо осі Z);

– розроблено метод масштабування кількості квантових запусків на основі афінно-експоненційної апроксимації, який дозволяє визначати статистично достатню кількість вимірювань для ідентифікації оптимального розв’язку при зростанні розмірності задач;

– запропоновано метод побудови квантових схем для задач комбінаторної оптимізації, що передбачає використання шару гейтів Адамара та тригейтового блоку CX-RY-CX для кодування ребер графа та забезпечує зменшення глибини квантового кола і адаптацію до обмежень сучасних квантових процесорів.

Особливої уваги заслуговує процес зменшення залежності алгоритму від класичної оптимізації параметрів, оскільки саме цей елемент часто стає вузьким місцем варіаційних квантових алгоритмів. Детерміноване формування параметрів на основі структури графа робить обчислювальний процес більш відтворюваним, а відсутність ітераційного зворотного зв’язку з квантовою частиною потенційно знижує кількість запусків і спрощує практичне використання алгоритму.

Практична цінність роботи представлена:

– розробкою програмних рішень для розв’язання задач комбінаторної оптимізації на основі квантово-гібридного алгоритму QASPA для оптимізації логістичних маршрутів, балансуванні навантаження в мережевих системах та задачах розподілу ресурсів;

– створенні прикладних програмних модулів для інтеграції з платформами квантових обчислень (зокрема IBM Quantum) для практичної апробації та використання алгоритму на симуляторах і реальних квантових процесорах;

– розробці методичного підходу до перетворення прикладних задач у графові моделі типу Max-Cut та їх розв’язання за допомогою квантово-гібридного алгоритму QASPA, що включає правила побудови квантових схем, визначення параметрів та оцінювання результатів і може бути використаний у системах підтримки прийняття рішень.

Запропоновані модулі можуть застосовуватися для оптимізації логістичних маршрутів, балансування навантаження в мережевих системах, задач розподілу ресурсів і для підготовки прикладних моделей, що редукуються до Max-Cut. Наявність довідок про впровадження у ТОВ «Альянс Діджитал», ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ЦЕНТР ДУАЛЬНОЇ ОСВІТИ» та ТОВ «Н-ІКС ДЕЛІВЕРІ» підтверджує прикладну спрямованість результатів.

Слід позитивно оцінити, що автор розглядає ефективність алгоритму не лише через значення цільової функції, а й через стабільність, відтворюваність і часові характеристики. Для квантово-гібридних алгоритмів такий підхід є принциповим, адже формально якісний розв’язок може втрачати практичну цінність за умов надмірної кількості запусків або нестійкості до параметричних і апаратних обмежень.

Додатково слід відзначити користь запропонованого підходу для подальшого розвитку програмних засобів квантової оптимізації. Оскільки алгоритм має чітко

визначені етапи класичної підготовки, побудови квантової схеми, виконання вимірювань та аналізу результатів, його можна використовувати як основу для модульного розширення, повторних експериментів і порівняльного тестування на різних платформах.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності спеціальності

Дисертаційна робота є завершеним дослідженням, зміст якого відповідає галузі знань 12 «Інформаційні технології» та спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення». Структура роботи є логічною і послідовною. У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і завдання, розкрито об'єкт, предмет, методи дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану квантових технологій для розв'язання задачі Max-Cut, розгляду класичних, квантових і квантово-гібридних підходів, а також виявленню їхніх обмежень. У другому розділі розроблено методи та моделі алгоритму QASPA. Особливу увагу приділено перетворенню графа у матрицю кутів, використанню фіксованого кута $\pi/4$ для незважених графів, формуванню квантової схеми та визначенню достатньої кількості квантових запусків. Запропонована архітектура обчислень є цілісною, оскільки узгоджує класичну підготовку даних, виконання квантової схеми та подальший класичний аналіз результатів вимірювань. Третій розділ містить опис програмної реалізації та експериментальних досліджень. Автор показав роботу алгоритму на тестових графах, здійснив порівняння з QAOA, дослідив залежність якості розв'язків від типу та розмірності графів, а також продемонстрував запуск на апаратній платформі IBM Quantum. Таке поєднання симуляційного й апаратного експерименту є важливим для перевірки алгоритмів квантово-гібридного класу.

Позитивним є те, що в роботі розглянуто не лише окремий приклад виконання алгоритму, а й серію тестів для графів різних типів. Завдяки цьому результати не зводяться до демонстраційного випадку, а дають уявлення про поведінку алгоритму за зміни топології та розміру графа. Окреме порівняння часових характеристик із повним перебором і QAOA посилює прикладне спрямування дослідження. Змістовно вагомим є також апаратний фрагмент дослідження. На графі з 5 вершинами та 8 ребрами показано збіг оптимального значення розрізу на симуляторі і на процесорі IBM Marrakesh архітектури Heron R2. Така демонстрація підтверджує працездатність реалізації поза ідеалізованим симуляційним середовищем.

Обсяг роботи є достатнім (167 сторінок основного тексту) та відповідає чинним вимогам, містить достатню кількість ілюстративного матеріалу, що підсилює розуміння всіх прийнятих рішень та отриманих результатів, 5 додатків та список використаних джерел. Завершеність дослідження підтверджується тим, що кожне з поставлених завдань відображено у відповідних структурних частинах роботи. Аналіз предметної області переходить у формалізацію алгоритму,

формалізація підтримується програмною реалізацією, а реалізація перевіряється на експериментальних даних. Така логіка відповідає вимогам до дисертаційних досліджень прикладного технічного спрямування.

Мова, стиль викладення та академічна доброчесність

Матеріал дисертації викладено українською мовою, з дотриманням науково-технічного стилю. Подання результатів є послідовним, а використання формул, схем, графіків і експериментальних даних сприяє розкриттю змісту дослідження. Оформлення матеріалів загалом забезпечує читабельність роботи. Ілюстративний матеріал використовується за потреби. Це полегшує сприйняття результатів як фахівцями з програмної інженерії, так і дослідниками квантових обчислень. Ознак порушення академічної доброчесності за наданими матеріалами не встановлено. У роботі зазначено особистий внесок здобувача, наведено посилання на використані джерела, визначено внесок автора у публікаціях, що опубліковано у співавторстві. Окремо відзначено, що технології штучного інтелекту не використовувалися для написання тексту дисертації або формулювання її наукових результатів.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Результати дисертації відображено в 11 наукових публікаціях, зокрема 1 статтю представлено у матеріалах міжнародної конференції з індексацією у Scopus, 4 статті опубліковано у фахових наукових виданнях України категорії «Б», а 6 праць оприлюднено у матеріалах наукових конференцій. Доповіді здобувача на міжнародних і всеукраїнських заходах засвідчують належну апробацію основних положень дисертації.

Публікаційна активність здобувача охоплює як інструментальні питання квантового програмування, так і безпосереднє застосування квантово-гібридних алгоритмів до задач комбінаторної оптимізації. Це дає підстави вважати, що основні результати не є ізольованими фрагментами, а становлять послідовний науковий доробок за темою дисертації.

Апробація результатів на наукових конференціях є достатньою для підтвердження відкритості дослідження до фахового обговорення. Водночас наявність публікації, індексованої у Scopus, засвідчує представлення частини результатів у ширшому міжнародному науковому просторі, що є важливим для тематики, пов'язаної з квантовими обчисленнями.

Зауваження та питання дискусійного характеру

1. Експериментальний вибір кута $\pi/4$ обґрунтовано для повних, циклічних та Erdős-Rényi графів, проте бажано ширше пояснити, чи збережеться така перевага для зважених графів і реальних мережевих структур.

2. У роботі зазначено, що IBM Eagle виявився менш придатним через труднощі транспіляції, тоді як Heron R1/R2 краще узгоджуються з потребами QASPA. Для повнішої апаратної оцінки варто навести кількість двокубітних гейтів, SWAP-операцій і фактичну глибину схеми.

3. Порівняння з QAOA є показовим, але експериментальна база могла б бути посилена зіставленням із warm-start QAOA, глибшими варіантами QAOA, квантовим відпалом та сучасними класичними метаевристиками.

4. Формулювання наукової новизни, зокрема п. 2-4, на мою думку є не зовсім коректними, а саме: не чітко визначено відмінність від відомих аналогів і отриманий ефект, а також вказано кількісні параметри (п.1), які як правило, вказують в практичній цінності роботи. Це в певній мірі ускладнює порівняння отриманих результатів з відомими підходами.

5. У тексті трапляються окремі редакційні неточності та технічні огріхи.

Зазначені зауваження не мають принципового характеру і не зменшують наукової новизни та практичного значення дисертаційної роботи. Загалом дисертація демонструє здатність здобувача самостійно формулювати наукову проблему, обирати адекватний інструментарій для її розв'язання та доводити запропоновані рішення до рівня експериментальної перевірки. Представлені результати мають перспективу подальшого розвитку, зокрема в частині масштабування, апаратної адаптації та розширення класів графових задач.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота Сапожника Дмитра Олеговича на тему «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів» виконана на належному науковому рівні, є самостійним і завершеним дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати у сфері квантово-гібридних алгоритмів та інженерії програмного забезпечення, що є важливими для галузі інформаційних технологій.

За актуальністю, науковою новизною, достовірністю результатів, практичною значущістю і повнотою апробації дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами). Її автор, Сапожник Дмитро Олегович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних інформаційних технологій,
проректор з наукових досліджень та трансферу технологій
Національного університету «Київський авіаційний інститут»

Сергій ГНАТЮК

«11» червня 2026 року