

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

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента,
доцента кафедри інженерії програмного забезпечення
ЛОБАНЧИКОВОЇ Надії Миколаївни
на дисертацію 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. Розвиток інформаційних технологій призводить до потреб розробки та удосконалення моделей, методів та алгоритмів прикладного спрямування. Вагоме місце в наукових дослідженнях займають дослідження, що пов'язані з квантовими технологіями та їх застосуванням у прикладних областях. Задача максимального розрізу графа (Max-Cut) посідає важливе місце серед проблем комбінаторної оптимізації. Ефективне розв'язання цієї задачі впливає на широкий спектр прикладних сфер, зокрема в аналізі складних мереж і кластеризації даних, оптимізації потокових систем та проектування інфраструктур. Однак зі зростанням розмірів графів та ускладненням їх структури класичні методи дедалі частіше демонструють недостатню продуктивність, що вимагає знайдення нових моделей, методів та алгоритмів оптимізації цієї задачі. У таких умовах особливої значущості набувають квантові та квантово-гібридні алгоритми, здатні розширити можливості оптимізаційних процедур за рахунок використання квантових обчислень. Тому розробка нових методів та алгоритмів для розв'язання задачі максимального розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів відкриває перспективи підвищення ефективності та точності обчислень, що й визначає актуальність проведеного дослідження.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Дисертація має логічну структуру, у якій послідовно розкрито теоретичні передумови дослідження, формалізовано задачу максимального розрізу, розроблено методи та моделі квантово-гібридного алгоритму QASPA, а також здійснено програмну реалізацію й експериментальну перевірку отриманих результатів. Обґрунтованість отриманих наукових положень та результатів забезпечується використанням комплексу теоретичних, алгоритмічних, програмно-технічних та експериментальних методів, зокрема математичного моделювання, методів теорії алгоритмів, моделювання квантових обчислень, порівняльного й статистичного аналізу.

Достовірність отриманих результатів підтверджується експериментальними дослідженнями на квантових симуляторах і реальному

апаратному забезпеченні IBM Quantum, а також порівнянням алгоритму QASPA з QAOA та методом повного перебору за критеріями якості розв'язку, стабільності, масштабованості та часу виконання. Це підсилює переконливість висновків щодо стабільності запропонованої параметризації. Тому вважаю, що представлені наукові положення та висновки у дисертації належним рівнем обґрунтовані та достовірні.

Автором проведено детальний аналіз сучасного стану квантових технологій для задачі максимального розрізу графа, розроблено алгоритм QASPA, запропоновано метод графо-залежної параметризації квантової схеми, метод масштабування кількості квантових запусків і створено програмні рішення з використанням платформи Qiskit. Окремо позитивно слід оцінити демонстрацію запуску на процесорі IBM архітектури Heron R2, що дозволило зіставити симуляційні результати з виконанням на реальному квантовому пристрої. Тому вважаю, що поставлені у дисертації завдання вирішено у повному обсязі.

Ступінь наукової новизни результатів дисертаційного дослідження.

У дисертації автором отримано низку нових наукових результатів, серед яких особливо слід відзначити:

1. 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;

2. 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 O_y ;

3. метод масштабування кількості квантових запусків на основі афінно-експоненційної апроксимації, який дає змогу визначати статистично достатню кількість вимірювань при зростанні розмірності задачі;

4. удосконалений метод побудови квантових схем із використанням шару гейтів Адамара та тригейтового блоку CX-RY-CX, орієнтований на адаптацію алгоритму до обмежень сучасних квантових процесорів.

Отримані результати є науково обґрунтованими, мають теоретичну цінність і практичне значення, оскільки спрямовані на підвищення ефективності розв'язання задачі максимального розрізу графа в умовах сучасних обмежень квантових обчислювальних систем.

Повнота опублікування основних положень дисертації.

Основні результати дисертації достатньо повно висвітлені в наукових публікаціях автора. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 11 наукових праць, з яких 4 статті – у фахових наукових виданнях України категорії «Б», 1 стаття – у матеріалах міжнародної конференції, що індексується у базі даних Scopus, та 6 публікацій – у матеріалах наукових конференцій.

Кількість та рівень апробації результатів відповідають вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Теоретичне та практичне значення отриманих результатів і рекомендацій про їх використання.

Теоретичне значення дисертації полягає у розвитку методів квантово-гібридної оптимізації для задачі максимального розрізу графа. Запропоновані автором підходи розширюють наукові уявлення про побудову одноітераційних квантово-гібридних алгоритмів, які не потребують багатоітераційної класичної оптимізації параметрів і враховують структурні властивості графа під час формування квантової схеми.

Практична значущість дисертації полягає у розробці 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 сучасними платформами квантових обчислень та підтвердженню впровадженні результатів дослідження у діяльність підприємств.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації логістичних маршрутів, балансування навантаження в мережевих системах, задач розподілу ресурсів і в системах підтримки прийняття рішень, а їх практичне впровадження підтверджується відповідними довідками у ТОВ «Альянс Діджитал», ТОВ «УКРАЇНСЬКИЙ ЦЕНТР ДУАЛЬНОЇ ОСВІТИ» та ТОВ «Н-ІКС ДЕЛІВЕРІ».

Оцінка структури дисертації.

Дисертація має логічну та послідовну структуру, що відповідає меті, завданням і предмету дослідження. Вона складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 234 сторінки, з яких 167 сторінок основного тексту. Дисертація містить 2 таблиці, 63 рисунки, список використаних джерел із 136 найменувань та 5 додатків. Обсяг дисертації є достатнім та відповідає чинним вимогам.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження задачі максимального розрізу графа як однієї з фундаментальних NP-складних задач комбінаторної оптимізації. Визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію результатів, публікації автора та впровадження отриманих наукових результатів. Також окреслено методологічну основу дослідження та структуру дисертації.

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану розвитку квантових технологій та перспектив їх застосування для задач комбінаторної оптимізації. Розглянуто класичні методи розв'язання задачі Max-Cut, зокрема точні, апроксимаційні та евристичні алгоритми, а також їх переваги й обмеження. Значну увагу приділено квантовим і квантово-гібридним підходам, включаючи алгоритми QAOA та інші сучасні методи. За результатами аналізу

обґрунтовано необхідність розроблення нового квантово-гібридного алгоритму для ефективнішого розв'язання задачі максимального розрізу.

У другому розділі запропоновано математичні моделі та методи побудови нового квантово-гібридного алгоритму QASPA для розв'язання задачі Max-Cut. Розроблено підхід до детермінованої графо-залежної параметризації квантової схеми, що дозволяє уникнути складних процедур класичної оптимізації параметрів. Також запропоновано метод генерації кутів квантових операторів і метод масштабування кількості запусків алгоритму для підвищення достовірності результатів. Окремо представлено метод побудови квантової схеми, адаптований до особливостей задачі максимального розрізу та сучасних NISQ-пристроїв.

Третій розділ містить опис програмної реалізації алгоритму QASPA із використанням платформи Qiskit та інструментів IBM Quantum. Проведено серію експериментів як на квантових симуляторах, так і на реальному квантовому обладнанні, що дозволило перевірити працездатність запропонованого підходу в практичних умовах. Виконано тестування алгоритму на графах різної структури та розмірності, а також проведено порівняльний аналіз із алгоритмом QAOA та методом повного перебору. Отримані результати підтвердили ефективність, стабільність і перспективність запропонованого квантово-гібридного підходу для задач комбінаторної оптимізації.

Така структура дисертації забезпечує коректний перехід від постановки наукового завдання до перевірки отриманих результатів.

Мова та стиль викладення результатів.

Мова та стиль викладення матеріалу дисертації відповідають вимогам, що висуваються до наукових праць такого рівня. Дисертація написана українською мовою з використанням сучасної науково-технічної термінології у галузі квантових обчислень, інженерії програмного забезпечення та напряму комбінаторної оптимізації. Матеріал викладено логічно, послідовно та аргументовано, із чітким дотриманням причинно-наслідкових зв'язків між поставленим науковим завданням, запропонованими методами та отриманими результатами. Текст характеризується достатнім рівнем наукової обґрунтованості, коректним використанням спеціалізованих термінів, математичного апарату та англomовних технічних понять, які супроводжуються відповідними поясненнями. Оформлення дисертації, структура розділів, таблиць, рисунків і додатків загалом відповідають встановленим вимогам до дисертацій.

Відсутність порушень академічної доброчесності.

Аналіз змісту дисертації, характеру викладення матеріалу, наукових результатів, наведених посилань на джерела інформації та публікації автора дає підстави стверджувати, що дисертація виконана самостійно та відповідає принципам академічної доброчесності. У дисертації належним чином наведено посилання на використані літературні джерела, коректно відображено результати досліджень інших авторів, а запозичення наукових положень, ідей та результатів супроводжуються відповідними бібліографічними посиланнями.

Представлені у дисертації наукові результати, висновки та положення, що виносяться на захист, є результатом особистої наукової роботи здобувача. Ознак академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації результатів досліджень або інших порушень академічної доброчесності під час ознайомлення з дисертацією не виявлено.

Таким чином, дисертація Дмитра Олеговича Сапожника відповідає вимогам академічної доброчесності, встановленим законодавством України та нормативними документами у сфері вищої освіти і наукової діяльності.

Недоліки та зауваження до дисертації.

Незважаючи на позитивне враження від дисертації слід висловити ряд зауважень:

1. У третьому розділі дисертації наведено результати експериментальних досліджень запропонованого алгоритму QASPA на квантових симуляторах та реальних квантових пристроях IBM Quantum. Водночас тестування виконано переважно на графах порівняно невеликої розмірності, що обумовлено сучасними апаратними обмеженнями квантових комп'ютерів. Доцільно було б навести більш детальний аналіз очікуваної обчислювальної ефективності запропонованого підходу для задач більшої розмірності та оцінити перспективи його масштабування після появи квантових пристроїв із більшою кількістю кубітів.

2. Автором здійснено порівняння розробленого алгоритму із низкою класичних та квантово-гібридних підходів до розв'язання задачі максимального розрізу. Разом з тим у дисертації недостатньо уваги приділено порівнянню із сучасними метаевристичними алгоритмами, зокрема генетичними алгоритмами, алгоритмами табу-пошуку (Tabu Search) та сучасними варіантами симульованого відпалу (Simulated annealing), які широко використовуються для розв'язання NP-складних задач комбінаторної оптимізації. Таке порівняння дозволило б більш повно оцінити практичні переваги запропонованого підходу.

3. Одним із ключових елементів запропонованого алгоритму є метод детермінованої генерації параметрів квантової схеми на основі характеристик графа. Проте у дисертації недостатньо детально досліджено вплив окремих структурних характеристик графів (щільності, ступеневого розподілу, наявності кластерної структури тощо) на якість сформованих параметрів та кінцевий результат оптимізації. Проведення такого аналізу дозволило б глибше обґрунтувати універсальність запропонованого методу параметризації.

4. Наявні окремі незначні огріхи редакційного та стилістичного характеру, зокрема варіативність написання окремих англійських технічних термінів.

Зазначені зауваження та рекомендації не применшують наукової новизни, теоретичного і практичного значення дисертації Сапожника Дмитра Олеговича, а лише окреслюють напрями її можливого подальшого розвитку.

Висновок про дисертацію.

Дисертація Сапожника Дмитра Олеговича є завершеним самостійним науковим дослідженням, виконаним на належному науковому рівні, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання розробки методів і алгоритмів квантово-гібридного розв'язання задачі максимального розрізу графа. Отримані

результати характеризуються науковою новизною, достатнім рівнем обґрунтованості та достовірності, мають теоретичне і практичне значення, а також пройшли належну апробацію у наукових публікаціях і практичному впровадженні.

Враховуючи актуальність теми, наукову новизну, достовірність отриманих результатів, повноту їх опублікування, практичну значущість та відповідність змісту дисертації спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», дисертація Сапожника Дмитра Олеговича на тему «Методи та алгоритми для розв'язання задачі максимального розрізу за допомогою квантово-гібридних алгоритмів» відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, зокрема «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого 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:

Доцент кафедри інженерії
програмного забезпечення
Державного університету
«Житомирська політехніка»,
кандидат технічних наук, доцент

«10» червня 2026 року

Надія Лобанчикова

Надія ЛОБАНЧИКОВА

Підпис *Надія Лобанчикова*
Засвідчую:
Учений секретар
Житомирська політехніка

Олена Ващенко

