

КИРИЛОВ ІВАН

Інститут програмних систем Національної академії наук України

<https://orcid.org/0009-0006-9756-5391>e-mail: [ivan.kyrylov.science@gmail.com](mailto:ivan.kyrylov.science@gmail.com)

ШЕВЧЕНКО ВІКТОР

Інститут програмних систем Національної академії наук України

<https://orcid.org/0000-0002-9457-7454>e-mail: [gii2014@ukr.net](mailto:gii2014@ukr.net)

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ГЛИБИНИ КВАНТОВОЇ СХЕМИ

У цій роботі розглядаються методи оптимізації глибини квантових схем, включаючи теоретичні методи, алгоритмічні інновації та практичні застосування. Нещодавні досягнення демонструють суттєві покращення в оптимізації глибини схеми, проте питання масштабованості залишається невирішеним. Ключові дослідження, такі як вдосконалений точний синтез схем Clifford+T, показали багатообіцяючі результати у зменшенні кількості T-вентилів, що підвищує обчислювальну ефективність. Однак практична реалізація цих методів у реальних зашумлених середовищах ще не була повністю оцінена.

Подальші дослідження розробили автоматизовані методи оптимізації для великих квантових схем з неперервними параметрами, значно мінімізуючи кількість вентилів при збереженні структурної цілісності. Незважаючи на ці досягнення, залишаються проблеми з оцінкою продуктивності цих оптимізованих схем на реальному квантовому обладнанні та їх інтеграцією в різні квантові алгоритми. Проблема маршрутизації кубітів також представляє значні перешкоди, особливо в системах з обмеженням зв'язком, що вимагає ефективних методологій для оптимізації розміщення і переміщення кубітів.

Комплексний підхід повного стеку, що включає оптимізацію апаратного, програмного забезпечення та компілятора, надає цінну інформацію для порівняння архітектур та стратегій проектування. Цей підхід підкреслює важливість завадостійкої компіляції та необхідність оптимізації під мікроархітектуру для покращення успішності програм на сучасних квантових пристроях.

Ця стаття підкреслює потребу в масштабованих, апаратно-діагностичних методах оптимізації та широкій експериментальній перевірці. Інтеграція графових нейронних мереж для оптимізації квантових схем є перспективним напрямком майбутніх досліджень. Аналіз показує, що, незважаючи на значний прогрес, невирішені питання, такі як обчислювальна складність, обмежена експериментальна перевірка і різноманітність квантових алгоритмів, вимагають постійних досліджень для повної реалізації потенціалу квантових обчислень.

Отже, оптимізація глибини квантових схем є багатогранною проблемою, що вимагає безперервних досліджень і розробок. Інтеграція теоретичних досягнень з практичними реалізаціями має вирішальне значення для подолання поточних обмежень і розкриття повного потенціалу квантових обчислень. Постійні зусилля в цій галузі будуть життєво важливими для досягнення масштабованих і ефективних квантових обчислень.

Ключові слова: квантові обчислення, оптимізація квантових схем, компіляція квантових схем, синтез вентилів.

KYRYLOV IVAN, SHEVCHENKO VICTOR

Institute of Software Systems National Academy of Sciences of Ukraine

## ANALYSIS OF METHODS FOR OPTIMIZING THE DEPTH OF A QUANTUM CIRCUIT

This work reviews methods for optimizing quantum circuit depth, encompassing theoretical techniques, algorithmic innovations, and practical applications. Recent advancements demonstrate substantial improvements in circuit depth optimization, yet the issue of scalability remains unresolved. Key research contributions, such as the advanced exact synthesis of Clifford+T circuits, have shown promising results in reducing the number of T-gates, thus enhancing computational efficiency. However, the practical implementation of these methods in real-world noisy environments has yet to be fully evaluated.

Further studies have developed automated optimization techniques for large quantum circuits with continuous parameters, significantly minimizing gate counts while maintaining structural integrity. Despite these advancements, challenges persist in assessing the performance of these optimized circuits on actual quantum hardware and integrating them into various quantum algorithms. The qubit routing problem also presents significant hurdles, particularly in systems with limited communication, necessitating effective methodologies to optimize qubit placement and movement.

A comprehensive full-stack approach, incorporating hardware, software, and compiler optimizations, has provided valuable insights into architectural comparisons and design strategies. This approach highlights the importance of noise-aware compilation and the need for microarchitecture-specific optimizations to improve program success rates on current quantum devices.

This paper underscores the need for scalable, hardware-agnostic optimization methods and extensive experimental validation. Integrating graph neural networks for quantum circuit optimization presents a promising future research direction. The analysis concludes that while significant progress has been made, unresolved issues such as computational complexity, limited experimental validation, and the diversity of quantum algorithms necessitate ongoing research to fully realize the potential of quantum computing.

In conclusion, optimizing the depth of quantum circuits is a multifaceted problem requiring continuous research and development. The integration of theoretical advancements with practical implementations is crucial for overcoming current limitations and unlocking the full potential of quantum computing. Continued efforts in this area will be vital for achieving scalable and efficient quantum computations.

Keywords: quantum computing, quantum circuit optimization, gate synthesis.

### Постановка проблеми

Квантові обчислення з'явилися як трансформаційна технологія, що обіцяє вирішувати певні обчислювальні проблеми експоненціально швидше, ніж класичні комп'ютери. В основі квантових обчислень

лежать квантові схеми, які використовують кубіти та квантові вентиля для виконання складних обчислень. Одним з найважливіших питань практичної реалізації квантових алгоритмів є оптимізація глибини квантової схеми, яка визначається як кількість послідовних квантових операцій, необхідних для завершення обчислень.

Глибина квантової схеми безпосередньо впливає на її продуктивність та ефективність. Неглибокі схеми бажані, оскільки вони менш схильні до квантової декогеренції та шуму, які можуть значно погіршити точність обчислень. Тому оптимізація глибини квантових схем має вирішальне значення для реалізації повного потенціалу квантових обчислень.

Квантові обчислення здатні зробити революцію в різних галузях – від криптографії до матеріалознавства – завдяки виконанню обчислень, недосяжних для класичних комп'ютерів. Однак практичній реалізації квантових алгоритмів перешкоджають обмеження сучасного квантового обладнання, зокрема проблема підтримки квантової когерентності протягом тривалих обчислювальних періодів. Оптимізація глибини квантових схем – зменшення кількості послідовних операцій – має важливе значення для підвищення продуктивності квантових обчислень. У цій роботі розглянуті сучасні методи оптимізації глибини квантових схем, включаючи теоретичні підходи, алгоритмічні інновації та практичні застосування, а також розроблені пропозиції щодо можливих шляхів покращення глибини квантової схеми.

**Мета дослідження** пошук та обґрунтування нових шляхів покращення якості роботи методів зменшення глибини квантової схеми.

### Огляд відомих методів та рішень

В роботі [1] представлено значний прогрес у точному синтезі квантових схем. Це має вирішальне значення для розробки ефективних квантових алгоритмів, особливо тих, що покладаються на набір вентилів Clifford+T, який відомий своїми відмовостійкими властивостями. Автори обговорюють нові методи оптимізації цих схем, зменшення кількості T-вентилів та підвищення загальної обчислювальної ефективності.

Синтез квантових схем з використанням набору Clifford+T передбачає декомпозицію заданої унітарної операції на послідовність цих вентилів, що є важливим для реалізації квантових алгоритмів на квантовому обладнанні з корекцією помилок. Такий підхід значно зменшує кількість необхідних вентилів порівняно з традиційними методами.

Невирішені проблеми:

- Масштабованість методів синтезу. Автори демонструють покращення для малих та середніх схем, але залишається незрозумілим, як ці методи працюють при застосуванні до великомасштабних квантових схем.

- Практична реалізація та кількість помилок. Стаття зосереджена на теоретичних оптимізаціях, однак не розглядає, як ці схеми поведуться в реальних умовах, де шум і частота помилок можуть суттєво впливати на продуктивність.

- Інтеграція з існуючими квантовими алгоритмами. Інтеграція оптимізованих схем Clifford+T з існуючими квантовими алгоритмами також залишається відкритим питанням. Хоча автори наводять приклади оптимізації схем, та вони не обговорюють детально, як ці оптимізовані схеми можуть бути легко інтегровані в більші квантові алгоритми, особливо ті, що використовуються в практичних додатках, таких як квантова криптографія або квантова симуляція.

Причини невирішених питань:

1) Обчислювальна складність та обмеженість ресурсів. Проблема масштабованості передусім пов'язана з обчислювальною складністю та ресурсними обмеженнями. Точний синтез схем Clifford+T є складним завданням, і сучасні алгоритми будуть не ефективними для роботи з великими схемами. Автори визнають, що необхідні подальші дослідження для розробки більш ефективних алгоритмів, які можуть масштабуватися зі збільшенням розміру квантових схем.

2) Питання практичної реалізації та похибки залишаються нерозв'язаними через брак експериментальних даних. Теоретичний характер роботи передбачає для перевірки запропонованих методів необхідність реального тестування на квантовому обладнанні. Автори припускають, що майбутня робота повинна бути зосереджена на експериментальній перевірці для розуміння практичних наслідків їх оптимізацій.

Дане дослідження робить значний внесок у сферу квантових обчислень, представляючи передові методи оптимізації схем. Однак залишаються ряд питань, що вимагають розв'язання, зокрема, щодо масштабованості цих методів, їх практичної реалізації та інтеграції з існуючими квантовими алгоритмами. Ці проблеми зберігають свою актуальність через обчислювальну складність, відсутність експериментальної перевірки та складність інтеграції оптимізованих схем. Їх розв'язання матиме ключове значення для подальшого розвитку квантових обчислень.

Стаття [2] досліджує методи оптимізації вентилів, які зменшують кількість T-зв'язків, що є важливою метрикою для відмовостійких квантових схем. Стаття присвячена розробці автоматизованих методів оптимізації великих квантових схем, зокрема, з неперервними параметрами. Запропоновані алгоритми значно зменшують кількість вентилів при збереженні структурної цілісності вихідних схем. Методи пропонують покращену швидкість оптимізації та кращу масштабованість порівняно з попередніми підходами.

Автори використовують набір швидких алгоритмів для роботи з неперервними параметрами вентилів та оптимізації великомасштабних квантових схем. Алгоритми спрямовані на мінімізацію кількості вентилів і

збереження базової структури схем, заради забезпечення їх практичності для реального квантового обладнання.

Проблеми даного підходу:

- реальна продуктивність на квантовому обладнанні. Одним з таких питань є те, як ці оптимізовані схеми працюють на реальному квантовому обладнанні. Хоч алгоритми демонструють теоретичні покращення, але їх практичний вплив на зашумлені квантові пристрої ще вимагає оцінки.

- інтеграція з різними квантовими алгоритмами. Другим невирішеним питанням, що потребує уваги є інтеграція цих методів оптимізації з широким спектром квантових алгоритмів. У статті основна увага приділяється загальним схемам, залишаючи питання про застосовність та ефективність цих методів для різних конкретних квантових алгоритмів.

Причини невирішених проблем:

1) Експериментальна перевірка. Відсутність широкої експериментальної перевірки на реальних квантових пристроях є основною причиною того, що ці питання залишаються відкритими. Теоретичні оптимізації потребують практичного тестування, щоб врахувати недосконалість обладнання та шуми, які можуть впливати на продуктивність.

2) Складність і варіативність квантових алгоритмів. Різноманітність і складність квантових алгоритмів створює проблеми для універсальних методів оптимізації. Кожен алгоритм може мати унікальні вимоги та обмеження, що ускладнює розробку універсального рішення. Автори визнають, що необхідні подальші дослідження для оптимізації та адаптації до конкретних алгоритмів і апаратних конфігурацій.

Дослідження демонструє, що нові методи оптимізації можуть суттєво зменшити кількість вентилів за менший час, долаючи розрив між поточними можливостями квантового обладнання та обчислювальними потребами квантових алгоритмів, які, як очікується, перевершать класичні комп'ютери.

У статті [3] досліджено проблеми та рішення для маршрутизації кубітів у квантових схемах, зокрема, на пристроях з обмеженим зв'язком. Автори представляють нову методологію, яка є архітектурно-діагностичною, тобто може застосовуватися до різних платформ квантових обчислень. Ця методологія реалізована за допомогою компілятора TKET [4], розробленого Cambridge Quantum Computing. Емпіричні результати показують, що цей підхід ефективно зменшує глибину та кількість двокубітових вентилів, які є критичними показниками для продуктивності квантових схем. Автори представляють підхід, який відображає абстрактні квантові схеми на фізичних квантових пристроях з обмеженнями на зв'язок. Методика фокусується на оптимізації розміщення та переміщення кубітів, щоб мінімізувати кількість додаткових операцій, таких як SWAP-вентелі. Методологія перевірена за допомогою емпіричних тестів, які показали її ефективність у підвищенні продуктивності квантових схем на апаратному забезпеченні з обмеженими можливостями зв'язку.

Є група невирішених проблем:

- Масштабованість і продуктивність на більших схемах. Одне з невирішених питань полягає в тому, наскільки добре ця методологія масштабується до все більших і складніших квантових схем. Стаття показує результати на середніх тестах, та продуктивність на значно більших схемах, які є важливими для практичних квантових обчислень.

- Реальна реалізація та управління шумом. Ще однією невирішеною проблемою є практична реалізація цих оптимізованих схем на реальному квантовому обладнанні. Квантові пристрої схильні до шуму і помилок, і в статті не розглянуто, як запропонований метод маршрутизації справляється з цими практичними проблемами, особливо зі збільшенням розміру і складності схеми.

Причини:

1) Обчислювальна складність. Проблема масштабованості виникає через властиву обчислювальну складність оптимізації великих квантових схем. Автори зазначають, що хоча їхня методологія демонструє покращення, необхідні подальші дослідження для розробки алгоритмів, які можуть ефективно впоратися з зростаючою складністю схем по експоненті.

2) Обмеженість експериментальних даних. Відсутність широкої експериментальної перевірки на сучасному квантовому обладнанні є основною причиною того, що практична реалізація та управління шумом залишаються невирішеними. Теоретичні моделі часто не враховують всіх нюансів реального обладнання, включаючи декогеренцію і помилки вентелів, які можуть суттєво вплинути на продуктивність оптимізованих схем.

Проведене дослідження пропонує значний прогрес в області компіляції квантових схем, надаючи надійне рішення проблеми маршрутизації кубітів. Запропонований метод не тільки зменшує глибину вентилів та їх кількість, але й зберігає структурну цілісність оригінальних схем, що робить його практичним інструментом для реальних застосувань квантових обчислень.

У статті [5] обговорюється комплексне дослідження квантових обчислювальних систем з використанням комплексного підходу, який включає оптимізацію апаратного, програмного забезпечення та компілятора. Дослідження оцінює різні архітектури та технології квантових обчислень, зосереджуючись на зашумлених квантових системах середнього масштабу (NISQ). Автори використовують власний інструментарій TrIQ для проведення вимірювань реальних систем на прототипах від IBM, Rigetti та Університету Меріленда, демонструючи значне покращення показників успішності програм завдяки використанню детального розуміння мікроархітектури.

Автори застосували аналіз повного стеку та керовані бенчмарки, досліджуючи взаємодію між

апаратним та програмним рівнями. Вони зосередилися на виборі набору вентилів, топології зв'язку та оптимізації компілятора. Проведено вимірювання реальних систем, щоб зрозуміти вплив різних архітектурних рішень на продуктивність та надійність.

Відкриті питання:

- Масштабованість методів оптимізації. Важливим невирішеним питанням є те, як запропоновані методи оптимізації масштабуються зі збільшенням розміру та складності квантових схем. Хоча дослідження показує покращення для сучасних пристроях NISQ, масштабованість цих методів для майбутніх масштабних квантових систем залишається невизначеною.

- Вплив апаратно-специфічних характеристик на оптимізацію. Як вони впливають на ефективність запропонованих оптимізацій. Дослідження зосереджене на прототипах конкретних виробників, і незрозуміло, наскільки успішно ці оптимізації працюють на інших платформах квантових обчислень зі специфічною реалізацією та шумовими характеристиками.

Причини:

1) Обчислювальна складність і ресурсні обмеження. Проблема масштабованості залишається невирішеною через властиву обчислювальну складність, пов'язану з оптимізацією великих квантових схем. Автори визнають, що хоча їхні методи є багатообіцяючими, необхідні подальші дослідження для розробки алгоритмів, які можуть ефективно впоратися з експоненціально зростаючою складністю квантових схем.

2) Обмежена різноманітність експериментальних даних. Вплив апаратних характеристик на оптимізацію залишається ключовими тому, що експериментальні дані дослідження обмежені конкретними прототипами квантових обчислень. Для повного розуміння того, як ці оптимізації працюють на різних платформах, потрібні більш широкі та різноманітні експериментальні дані. Автори припускають, що в майбутній роботі слід вивчити ширший спектр квантових пристроїв, щоб перевірити і вдосконалити методи їхньої оптимізації.

Дослідження надає цінну інформацію щодо проектування та оптимізації систем квантових обчислень. Висновки свідчать про те, що використання особливостей мікроархітектури в компіляторі може суттєво покращити показники успішності квантових програм. Дослідження підкреслює важливість компіляції з урахуванням шумів та пропонує рекомендації щодо оптимізації нативних та програмно вентилів для різних квантових технологій.

У статті [6] представлено новий підхід до підвищення ефективності квантових схем з використанням фреймворку машинного навчання AlphaTensor. Цей метод спрямований на зменшення глибини квантових схем, шляхом використання методів навчання з підкріпленням. Автори детально описують архітектуру AlphaTensor, процес навчання та значні покращення в оптимізації квантових схем порівняно з традиційними методами.

Відкриті питання:

- Масштабованість AlphaTensor до більших квантових схем. Стаття демонструє ефективність AlphaTensor на відносно невеликих квантових схемах, але вона не надає вичерпних даних або аналізу його роботи з більшими і складними схемами. Така масштабованість має вирішальне значення для реальних застосувань квантових обчислень.

- Узагальнення на різні квантові алгоритми. Дослідження фокусується на конкретних типах квантових схем і алгоритмів. Залишається незрозумілим, наскільки добре AlphaTensor узагальнюється на ширший спектр квантових алгоритмів, особливо тих, що мають принципово інші структури та вимоги.

- Порівняльні показники продуктивності. Хоча в статті показано, що AlphaTensor перевершує традиційні методи оптимізації, використані бенчмарки обмежені.

- Ресурсні потреби для навчання.

Причини:

1) Масштабованість AlphaTensor до більших квантових схем. Складність квантових схем зростає експоненціально з кількістю кубітів, що ускладнює тестування та валідацію методів оптимізації на дуже великих схемах в рамках одного дослідження.

2) Узагальнення на різні квантові алгоритми. Різні квантові алгоритми мають унікальні характеристики, і створення універсального методу оптимізації є складним завданням. Це вимагає широкого тестування та адаптації моделі до різних контекстів.

3) Порівняльні показники продуктивності. Розробка комплексних тестів вимагає співпраці та консенсусу в спільноті квантових обчислень, що може зайняти багато часу та бути логістично складним завданням.

4) Потреба в ресурсах для навчання. Точна кількісна оцінка вимагає довготривалих експериментів та доступу до різноманітних обчислювальних середовищ.

### Порівняння методів

Методи оптимізації квантових схем відрізняються за своїми підходами до ефективності та вартості. Niemann та ін. [1] розширюють методи точного синтезу для схем Clifford+T, зосереджуючись на зменшенні кількості T-вентилів, що знижує витрати на відмовостійкі квантові обчислення. Nam та ін. [2] застосовують автоматизовану оптимізацію за допомогою градієнтних методів, щоб значно зменшити кількість вентилів і глибину схеми, хоча цей процес є обчислювально складним. Cowtan та ін. [3] вирішують проблему

маршрутизації кубітів, підвищуючи ефективність за рахунок мінімізації витрат на вентиля SWAP, що зменшує час і частоту помилок. Murali та ін. [5] надають практичні поради щодо оптимізації квантових схем на реальному обладнанні, зосереджуючись на економічно ефективних стратегіях для поточних архітектур. Нарешті, AlphaTensor [6] використовує машинне навчання для автоматизації проектування схем, досягаючи значної оптимізації, незважаючи на високі початкові обчислювальні витрати. Кожен метод має свої переваги, що робить їх придатними для різних потреб оптимізації квантових обчислень.

Результати аналізу розглянутих методів [1–3, 5, 6] узагальнимо в таблицю 1 за такими критеріями :

$x_1$  - зменшення глибини та кількості T вентилів - наскільки ефективно зменшується кількість та глибина T-вентелів у квантовій схемі;

$x_2$  - зменшення кількості вентилів та глибини - здатність методу мінімізувати загальну кількість вентилів та глибину схеми;

$x_3$  - ефективність маршрутизації кубітів - наскільки добре метод справляється з розміщенням і переміщенням кубітів, особливо в обладнанні з обмеженими можливостями підключення;

$x_4$  - адаптивність до апаратного забезпечення - гнучкість і продуктивність методу при застосуванні до різних архітектур квантових обчислень і апаратного забезпечення;

$x_5$  - загальна здатність до оптимізації - показник ефективності в оптимізації квантових схем за кількома критеріями.

Оскільки в роботах [1–3, 5, 6] використовуються різні тести (бенчмарки) на різних архітектурах, то для оцінки якісної ефективності кожного методу введемо власну шкалу оцінювання за рівнями:

1) Низький (30 балів). Метод має мінімальний вплив. Він може бути менш ефективним або менш придатним для оптимізації вказаного конкретного аспекту квантових схем.

2) Середній (60 балів). Метод показує достатній рівень ефективності за даним критерієм. Він працює адекватно, але може бути не найкращим з доступних варіантів.

3) Високий (90 балів). Метод має високу ефективність за цим критерієм. Це один з найкращих варіантів для оптимізації вказаного аспекту квантових схем.

Таблиця 1

## Порівняльний аналіз методів

Методи	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Результуюча оцінка методу при рівній / різній важливості методів
Вагові коефіцієнти критеріїв при рівній важливості методів	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Вагові коефіцієнти критеріїв при різній важливості методів	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	
Extended Exact Synthesis of Clifford+T Circuits [1]	90	60	30	60	60	60/54
Automated Optimization of Large Quantum Circuits [2]	60	90	30	90	90	72/69
On the Qubit Routing Problem [3]	30	30	90	60	60	54/60
Exploring a Fully Functional Quantum Computer [5]	30	60	60	90	60	60/66
Optimizing Quantum Circuits using AlphaTensor [6]	60	90	60	90	90	78/78
Запропонований метод на основі графових нейронних мереж	70	80	90	90	90	84/86

Також для кожного із  $n$  критеріїв  $x_i$  в роботі був введений коефіцієнт  $\beta_i$ , який визначає важливість критерію у порівнянні з іншими. Всі значення вагових коефіцієнтів були нормовані таким чином, що виконувалася умова

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 1.$$

Якщо первинно вагові коефіцієнти  $\beta'_i$  не були нормовані, то нормування було виконано таким чином

$$\beta_i = \frac{\beta'_i}{\sum_{i=1}^n \beta'_i}.$$

Значення загальної скалярної оцінки  $I_j$  кожного з методів знаходили шляхом адитивного згортання окремих критеріїв за ваговими коефіцієнтами

$$I_j = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i.$$

Кожен з розглянутих методів пропонує унікальні переваги і стосується різних аспектів оптимізації квантових схем. Для додатків, орієнтованих на відмовостійкі квантові обчислення, робота [1] забезпечує чудове зменшення глибини та кількості T-переходів. Для великих квантових схем фреймворк автоматизованої оптимізації пропонує значне зменшення кількості вентилів та глибини. Метод [3] має вирішальне значення для оптимізації розміщення та маршрутизації кубітів на пристроях NISQ. Для всебічного розуміння архітектури робота над повнофункціональними квантовими комп'ютерами відкриває цінні перспективи. Нарешті, оптимізація [6] на основі машинного навчання є багатообіцяючою для просунутих автоматичних оптимізацій.

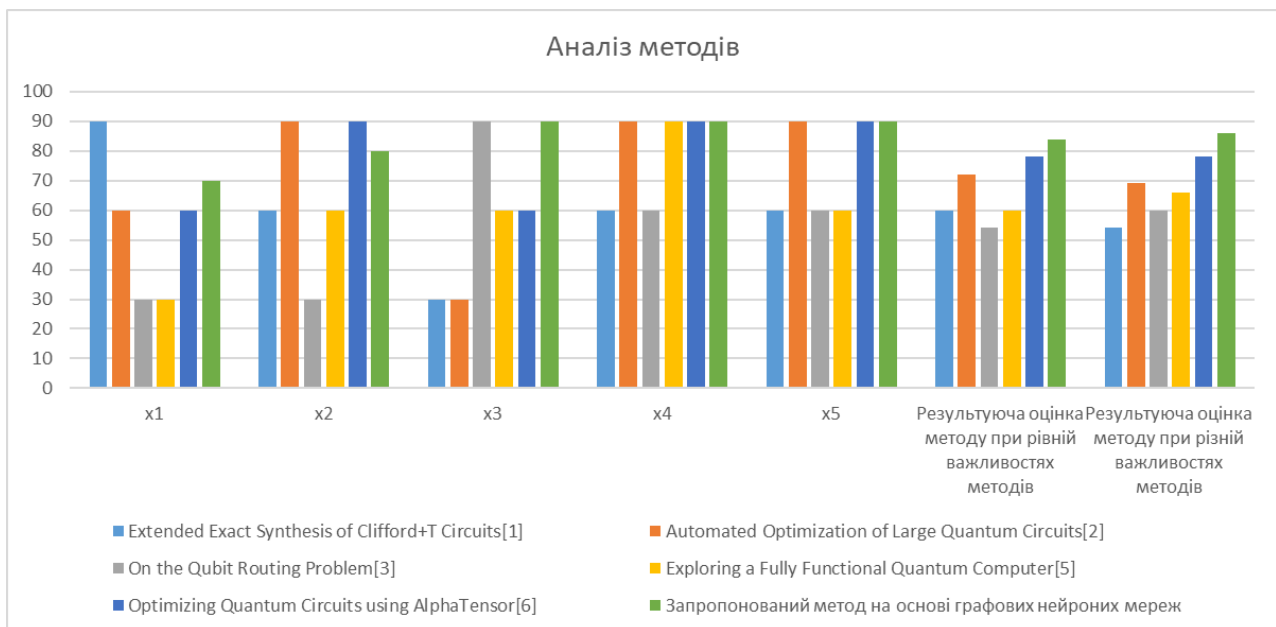


Рис. 1. Графічне представлення табл. 1

Автори провели аналіз сучасних досліджень в сфері оптимізації квантових схем за критерієм мінімальної глибини. Як зазначено в табл. 1, високий потенціал мають методи машинного навчання [6]. Виходячи з цього, автори пропонують використати нейронні мережі та формулюють гіпотезу «Методи нейронних мереж є ефективними для зменшення глибини квантової схеми». При побудові гіпотези автори використовували дослідження із сусідніх сфер, такі як графові нейронні мережі [7, 8]. Автори вважають, що графові нейронні мережі мають перспективи для покращення результатів розглянутих методів. Бо методи графових нейронних мереж фокусуються на адаптивність при зміні вершин графу та ефективному пошуку. Виходячи з цього автори пропонують оцінку «84/86» для запропонованого методу. Використання графових нейронних мереж для зменшення глибини квантової схеми є перспективним напрямком досліджень.

### Висновки

У цій роботі проаналізовано сучасні дослідження та запропоновано новий метод для оптимізації квантової схеми на основі графових нейронних мереж. Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на вирішення питань, таких як масштабованість, експериментальна перевірка, інтеграція алгоритмів та оптимізація ресурсів за допомогою графових нейронних мереж для подальшого зменшення глибини схем і підвищення продуктивності.

---

**References**

1. Philipp Niemann, Robert Wille, Rolf Drechsler Advanced exact synthesis of Clifford+T circuits. *Quantum information processing*. 2020. Vol. 19, no. 9. P. 317. <https://doi.org/10.1007/s11128-020-02816-0>.
2. Yunseong Nam [et al.] Automated optimization of large quantum circuits with continuous parameters. *Npj quantum information*. 2018. Vol. 4, no. 1. P. 23. <https://doi.org/10.1038/s41534-018-0072-4>.
3. Alexander Cowtan [et al.] On the qubit routing problem. *ArXiv preprint*: 1902.08091. 2019.
4. Tket. Accelerating Quantum Computing | Quantinuum. <https://www.quantinuum.com/developers/tket> (date of access: 23.07.2024)
5. Prakash Murali [et al.] Full-stack, real-system quantum computer studies: architectural comparisons and design insights. *Proceedings of the 46th international symposium on computer architecture*. [S. l.], 2019. P. 527–540.
6. Francisco Jr Ruiz [et al.] Quantum circuit optimization with AlphaTensor. *ArXiv preprint*: 2402.14396. 2024.
7. Scarselli F. [et al.] The graph neural network model. *IEEE transactions on neural networks*. 2009. Vol. 20, no. 1. P. 61–80. <https://doi.org/10.1109/TNN.2008.2005605>.
8. Yujia Li [et al.] Gated graph sequence neural networks. *ArXiv preprint*: 1511.05493. 2015.