

УДК 004.272.3:004.85

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.1>

Олег БОНДАРЧУК

магістр, Інженер Azure DevOps,
Stealthmail Ukraine LLC, iperaser@gmail.com
ORCID: 0009-0003-9626-1124

Сергій ЗИБІН

доктор технічних наук, професор кафедри безпеки інформаційних технологій,
Національний авіаційний університет, zysv@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2670-2823

Світлана ВАСИЛЮК-ЗАЙЦЕВА

магістр, старший викладач кафедри комп'ютерних наук,
Національний університет біоресурсів і природокористування України, svetlanafvasylyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0875-462X

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРІВ
У РОЗВ'ЯЗАННІ СКЛАДНИХ ЗАВДАНЬ**

Анотація. У статті з'ясовано, що квантові обчислення є одним із найважливіших досягнень сучасної науки, яке відкриває нові можливості для розв'язання завдань, недоступних для класичних обчислювальних систем. Актуальність дослідження зумовлена швидким розвитком квантових технологій, які мають потенціал для революційних змін у таких сферах, як фінанси, хімія, матеріалознавство та криптографія. Виявлено, що використання квантових комп'ютерів значно підвищує ефективність процесів оптимізації, аналізу великих обсягів даних і моделювання складних систем, що є критично важливим у сучасних умовах швидкого збільшення обсягів інформації.

Метою статті є дослідження ефективності квантових обчислень у розв'язанні складних завдань, аналіз основних проблем їх впровадження та розробка рекомендацій для інтеграції цих технологій у високопродуктивні обчислювальні інфраструктури.

Методологія. У статті проаналізовано ключові принципи квантових обчислень, такі як суперпозиція, квантова запутаність та інтерференція, а також виконано оцінювання потенціалу квантових алгоритмів Шора та Гровера. Здійснено порівняльний аналіз теоретичних і практичних аспектів впровадження квантових комп'ютерів у різних галузях, таких як фінансова сфера, хімія, матеріалознавство і криптографія. Використано підхід системного аналізу для виявлення проблем і потенціалу впровадження квантових обчислювальних технологій.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в комплексному аналізі прикладних аспектів використання квантових обчислень, виявленні основних технічних і інфраструктурних проблем їх впровадження та розробці рекомендацій щодо інтеграції квантових технологій у сучасні обчислювальні системи. Визначено перспективи використання квантових алгоритмів у нових галузях, таких як медична діагностика, прогнозування кліматичних змін і створення інтелектуальних систем управління.

Висновок. У результаті дослідження доведено, що квантові обчислення мають потенціал для значного підвищення ефективності розв'язання складних завдань, але їх широкомасштабне впровадження обмежено технічними та інфраструктурними викликами. Запропоновано рекомендації, які передбачають удосконалення апаратного забезпечення, розробку нових алгоритмів корекції помилок, створення стандартів для інтеграції квантових і класичних систем, а також розвиток хмарних сервісів для забезпечення доступності квантових обчислень. Окреслено перспективи подальших досліджень, які охоплюють розширення сфер застосування квантових технологій і підготовку фахівців, здатних працювати з цими інноваційними системами.

Ключові слова: обчислювальні технології, оптимізація процесів, квантові алгоритми, високопродуктивні системи, технічні інновації.

Oleg BONDARCHUK, Serhii ZYBIN, Svitlana VASYLYUK-ZAITSEVA. EFFECTIVENESS OF QUANTUM COMPUTERS IN SOLVING COMPLEX PROBLEMS

Abstract. The study establishes that quantum computing represents a significant advancement in modern science, providing new opportunities to solve problems that are unattainable for classical computing systems. The relevance of this research stems from the rapid development of quantum technologies, which hold the potential to revolutionize fields such as finance, chemistry, materials science, and cryptography. It has been revealed that quantum computers significantly enhance the efficiency of optimization processes, large-scale data analysis, and complex system modeling, which is critically important in the current era of rapidly growing information volumes.

The purpose of the article is to study the effectiveness of quantum computing in solving complex problems, analyze the main problems of its implementation, and develop recommendations for integrating these technologies into high-performance computing infrastructures.

Methodology. The study analyzes the key principles of quantum computing, including superposition, quantum entanglement, and interference, while assessing the potential of quantum algorithms such as Shor's and Grover's. A comparative analysis

of theoretical and practical aspects of quantum computer implementation across various fields, such as finance, chemistry, materials science, and cryptography, has been conducted. A systematic analytical approach has been employed to identify challenges and potential applications of quantum computing technologies.

Scientific Novelty. The scientific novelty lies in the comprehensive analysis of the applied aspects of quantum computing, the identification of major technical and infrastructural challenges in its implementation, and the development of recommendations for integrating quantum technologies into modern computing systems. Prospects for the use of quantum algorithms in emerging areas such as medical diagnostics, climate change forecasting, and intelligent management systems have also been identified.

Conclusion. The study concludes that quantum computing has the potential to significantly improve the efficiency of solving complex problems, however its large-scale implementation is constrained by technical and infrastructural challenges. Recommendations include improving hardware, developing new error-correction algorithms, creating standards for integrating quantum and classical systems, and advancing cloud-based services to make quantum computing more accessible. Prospects for further research include expanding the scope of quantum technologies and preparing specialists capable of working with these innovative systems.

Key words: computational technologies, process optimization, quantum algorithms, high-performance systems, technical innovations.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Квантові комп'ютери є одним із найважливіших досягнень сучасної науки, які відкривають нові можливості для розв'язання завдань, недоступних для традиційних обчислювальних систем. Основна проблема полягає у високій складності та обмеженій ефективності класичних алгоритмів при розв'язанні завдань, що вимагають обчислення великих обсягів даних, оптимізації процесів або моделювання систем із численними змінними. Квантові комп'ютери, завдяки використанню принципів суперпозиції та запутаності, пропонують радикально нові підходи до обробки інформації, дозволяючи виконувати розрахунки значно швидше, ніж традиційні комп'ютери. Проблема впровадження цих технологій пов'язана не лише з технічними обмеженнями, такими як висока чутливість до помилок і потреба в унікальній інфраструктурі, але й зі складністю адаптації квантових алгоритмів до реальних завдань.

Наукова значущість дослідження квантових комп'ютерів полягає в їхньому потенціалі для розв'язання таких завдань, як факторизація чисел, оптимізація ресурсів у складних системах, моделювання хімічних процесів та аналіз великих даних, що має важливе значення для розвитку штучного інтелекту, матеріалознавства та фінансових технологій. Практичне значення полягає у створенні передумов для впровадження квантових обчислень у сфері високопродуктивних обчислювальних систем, що сприятиме збільшенню ефективності інноваційних процесів, покращенню управління складними системами та розробці нових технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність квантових комп'ютерів у розв'язанні складних завдань досліджується з різних аспектів, включаючи їхній теоретичний потенціал, практичне застосування та виклики, що виникають у процесі інтеграції цієї технології.

Так, природу квантових обчислень досліджували Я. Кулешник та О. Сорокач. Автори розкривають базові принципи надпозиції й квантової запутаності, що лежать в основі роботи кубітів. Ці явища дозволяють значно прискорити обчислювальні процеси порівняно з класичними алгоритмами, особливо в завданнях, що вимагають опрацювання великих масивів даних [8].

У дослідженні В. Корольова та О. Ходзінського акцентується на практичних аспектах використання алгоритмів Grover's і Shor's для розв'язання завдань комбінаторної оптимізації. Результати, отримані науковцями, свідчать про потенціал квантових алгоритмів у таких сферах, як фінансове прогнозування та аналіз великих обсягів даних [7].

Проблематика безпеки даних і вплив квантових комп'ютерів на криптографію є темою дослідження Ю. Горбенка та Р. Ганзі. У своїй роботі вчені аналізують, як квантові комп'ютери здатні зламувати традиційні системи шифрування, такі як RSA, водночас вказуючи на можливості впровадження постквантових алгоритмів для підвищення безпеки інформації [2]. На додаток до цього, Є. Каптьол та І. Горбенко зосереджуються на особливостях програмування криптографічних завдань на квантових комп'ютерах, підкреслюючи перспективи використання алгоритму QKD для забезпечення безпечної передачі даних [6].

Крім того, аналіз впливу квантових комп'ютерів на безпеку механізмів інкапсуляції ключів, розглянутий у праці Є. Каптьола, демонструє приклади застосування квантових обчислень для вдосконалення національних стандартів шифрування, таких як ДСТУ 8961:2019 «Скеля». У дослідженні підкреслюється важливість розвитку квантових механізмів для адаптації наявних криптографічних методів до нових загроз [5]. Тим часом Д. Ватолкін та Ю. Гусева звертають увагу на можливості квантових обчислень у прогнозуванні кліматичних змін і моделюванні природних процесів, демонструючи практичне застосування квантових моделей для розв'язання глобальних екологічних проблем [1].

У контексті порівняння обчислювальних моделей робота В. Задіраки, А. Терещенка та І. Швидченко вивчають переваги квантової арифметики в завданнях високоточної оптимізації. Дослідження показує, що квантові системи значно перевершують традиційні методи в розв'язанні складних обчислювальних завдань [2]. W. Ming додає до цього аналізу глобальну перспективу, розглядаючи використання квантових комп'ютерів для розв'язання проблем управління ресурсами та моделювання великих систем [17].

Практичне застосування алгоритмів квантової оптимізації, таких як QAOA, висвітлює N. Njere. Автор детально аналізує ефективність цих алгоритмів для покращення роботи транспортних і логістичних систем, водночас звертаючи увагу на виклики, пов'язані з нестабільністю квантових систем [18].

S. Hussain та співавтори в емпіричному дослідженні демонструють, як квантові обчислення застосовуються в таких галузях, як енергетика, логістика та медицина. Автори підкреслюють необхідність розв'язання технічних проблем, зокрема стабілізації кубітів, для ширшого впровадження технології [16].

Сучасні тренди в тестуванні програмного забезпечення, включаючи адаптацію квантових систем, досліджуються в праці І. Нунко. Авторка підкреслює, що оптимізація процесів тестування є ключовим викликом для інтеграції квантових обчислень у реальні бізнес-середовища [15].

На освітній аспект використання квантових технологій звертають увагу О. Трифонова та М. Садовий. Науковці підкреслюють важливість впровадження симуляторів квантових комп'ютерів у навчальні програми, що дозволяє готувати фахівців для роботи з новітніми технологіями [12].

Трансформаційний вплив квантових обчислень на наукові дослідження аналізується такими дослідниками, як S. Gill та R. Вууа. Автори описують, як квантові алгоритми змінюють підходи до моделювання складних систем, зокрема в хімії та фінансах [13].

В. Нестеров зосереджується на використанні квантових алгоритмів у бізнес-аналітиці. Дослідження вченого демонструє, як ця технологія дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень, аналізуючи великі обсяги даних та прогножуючи ринкові тенденції [9].

Цікавим також є дослідження С. Зибіна, присвячене оптимізації структур і трафіків передачі інформації в захищених корпоративних мережах [4]. Автор демонструє потенціал квантових обчислень у покращенні криптографічного захисту та управлінні інформаційними потоками, зокрема для підвищення кібербезпеки корпоративних середовищ. Це підкреслює практичну цінність квантових технологій у розв'язанні завдань оптимізації у сфері інформаційної безпеки.

Аналіз наукових праць свідчить про багатогранність застосування квантових комп'ютерів у різних галузях, охоплюючи як теоретичні дослідження, так і практичні реалізації. Ці роботи переконливо підтверджують високий потенціал квантових обчислень у розв'язанні актуальних проблем сьогодення та подоланні викликів майбутнього.

Попри значні досягнення в дослідженні квантових обчислень, залишаються нерозв'язаними кілька важливих аспектів. Насамперед недостатньо вивчено практичну реалізацію ключових принципів квантових обчислень, таких як суперпозиція, квантова запутаність та інтерференція, що обмежує їхню адаптацію до складних обчислювальних завдань. Теоретичні моделі потребують удосконалення для врахування умов реального використання.

Потенціал квантових алгоритмів, зокрема Шора і Гровера, також залишається не повністю розкритим у прикладних завданнях. Основні обмеження полягають у технічних викликах, таких як стабільність апаратного забезпечення та адаптація алгоритмів до різних галузевих сценаріїв. Емпіричний аналіз їхньої ефективності в реальних умовах потребує подальшого розвитку.

Технічні й інфраструктурні виклики, зокрема проблеми корекції помилок, чутливості кубітів до зовнішніх впливів та відсутність уніфікованих стандартів інтеграції з класичними обчисленнями, залишаються бар'єрами для широкого впровадження квантових комп'ютерів. Це ускладнює їхню інтеграцію в сучасні високопродуктивні системи. Недостатньо досліджені й прикладні аспекти використання квантових технологій у фінансовій сфері, хімії, матеріалознавстві та криптографії, що обмежує їх ефективне впровадження у практичну діяльність. Такі прогалини впливають на швидкість розвитку технологій та їх адаптацію до нових викликів.

У статті запропоновано розв'язання зазначених проблем через детальний аналіз теоретичних основ, оцінювання алгоритмів, вивчення технічних викликів і розробку рекомендацій. Використання сучасних методів дослідження та розширення емпіричної бази сприятиме подоланню цих прогалин і вдосконаленню квантових обчислювальних систем.

Мета статті – дослідити ефективність використання квантових комп'ютерів для розв'язання складних обчислювальних завдань, визначити основні переваги квантових алгоритмів та оцінити їхню роль у розвитку високопродуктивних систем і технічних інновацій.

Завдання статті:

1. Проаналізувати теоретичні основи квантових обчислень, їхні ключові принципи та оцінити потенціал квантових алгоритмів для розв'язання складних завдань.

2. Вивчити технічні виклики впровадження квантових комп'ютерів та їхні прикладні аспекти в різних галузях.

3. Розробити рекомендації щодо розвитку квантових обчислювальних систем і їхньої інтеграції у високопродуктивні інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Квантові обчислення є новою технологією, яка базується на законах квантової механіки й пропонує революційні можливості для обробки інформації. На відміну від класичних комп'ютерів, які використовують біти для представлення інформації як 0 або 1, квантові комп'ютери працюють із кубітами, що можуть перебувати в станах 0, 1 або їхній суперпозиції одночасно. Завдяки цьому квантові комп'ютери здатні виконувати експоненціально більшу кількість операцій одночасно [11]. Основні принципи, такі як суперпозиція, квантова запутаність та інтерференція, створюють умови для високої ефективності квантових алгоритмів. Вони дозволяють розв'язувати завдання, які потребують значних обчислювальних ресурсів, включаючи факторизацію, моделювання складних молекул і оптимізацію систем (табл. 1).

Таблиця 1

Ключові принципи квантових обчислень

Принцип	Опис	Приклади практичного застосування
Суперпозиція	Кубіт може одночасно перебувати в станах 0 і 1, що дає змогу паралельно обробляти дані.	Використовується у квантовій криптографії для створення стійких до зламу ключів.
Квантова запутаність	Кубіти взаємопов'язані незалежно від відстані, що забезпечує синхронізацію обчислень.	Застосовується в телекомунікаціях для квантового розподілу ключів.
Інтерференція	Квантові хвилі складаються таким чином, щоб підсилувати правильні відповіді й зменшувати неправильні.	Оптимізує алгоритми пошуку у великих базах даних, наприклад, у медичній діагностиці.

Джерело: сформовано авторами на підставі [11, 18]

Сучасна практика демонструє широкий спектр можливостей для використання квантових обчислень у різних сферах. Наприклад, суперпозиція активно використовується у квантових алгоритмах для швидкої обробки великих обсягів інформації у фінансових технологіях, таких як аналіз ризиків і побудова прогнозів. Квантова запутаність уже довела свою ефективність у забезпеченні безпечного зв'язку в телекомунікаційних мережах. В умовах сучасних кіберзагроз ця технологія стає вирішальним фактором для захисту інформації. Інтерференція, своєю чергою, ефективно працює в медичній галузі, наприклад, для прискорення аналізу геномів і пошуку мутацій, що дозволяє вдосконалити персоналізовану медицину. У реальних умовах квантові обчислення ще знаходяться на ранній стадії розвитку, однак низка провідних компаній, таких як IBM, Google та D-Wave, уже створили прототипи квантових комп'ютерів, які здатні розв'язувати спеціалізовані завдання з високою точністю [14].

Квантові алгоритми є основою ефективності квантових обчислень, оскільки вони дозволяють розв'язувати завдання, які є складними або навіть неможливими для класичних алгоритмів [8]. Серед найбільш відомих квантових алгоритмів виокремлюються алгоритми Шора та Гровера, які демонструють значний потенціал у різних прикладних сферах. Алгоритм Шора призначений для факторизації цілих чисел і є революційним у контексті криптографії, оскільки він може зламати широко використовувані системи шифрування, що базуються на складності факторизації великих чисел. Алгоритм Гровера, своєю чергою, ефективно розв'язує завдання в пошуку елементів у невпорядкованих базах даних, забезпечуючи квадратичне прискорення порівняно з класичними методами (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняльна характеристика квантових алгоритмів Шора й Гровера та їх практичне застосування

Алгоритм	Призначення	Переваги	Приклади застосування
Алгоритм Шора	Факторизація цілих чисел на прості множники.	Експоненціальне скорочення часу обчислень порівняно з класичними алгоритмами.	Розшифровка RSA-кодів, моделювання складних хімічних молекул.
Алгоритм Гровера	Пошук у невпорядкованих базах даних.	Квадратичне прискорення порівняно з класичними методами пошуку.	Пошук потрібних даних у великих базах, оптимізація логістичних процесів.

Джерело: сформовано авторами на підставі [6]

На практиці алгоритми Шора та Гровера демонструють унікальні переваги в розв'язанні завдань, які раніше вважалися нерозв'язними за допомогою класичних обчислювальних систем. Алгоритм Шора, завдяки своїй здатності факторизувати великі числа, є каталізатором для перегляду глобальних стандартів криптографії. Його ефективність підкреслює важливість розробки квантово-стійких рішень, які могли б забезпечити безпеку сучасних систем передачі даних. Це створює нові наукові виклики, зокрема в напрямі пошуку альтернативних методів шифрування, таких як використання еліптичних кривих або гомоморфного шифрування. Крім того, алгоритм Шора відкриває можливості для фундаментальних досліджень у теорії чисел, що може вплинути на розвиток нових напрямів у математиці та комп'ютерних науках.

Алгоритм Гровера, своєю чергою, демонструє потенціал не лише в прискоренні пошуку в базах даних, а й у застосуванні до завдань оптимізації в мультидисциплінарних контекстах [18]. Його ефективність базується на зменшенні кількості ітерацій, необхідних для знаходження рішення, що робить його особливо корисним у завданнях із великою кількістю можливих комбінацій. Це створює нові перспективи для розробки квантових гібридних систем, які поєднують класичні й квантові обчислення, що дозволяє використовувати сильні сторони обох підходів для розв'язання складних проблем.

Загалом обидва алгоритми формують базу для майбутніх розробок у сфері квантових обчислень і сприяють поширенню їх у нових галузях, таких як моделювання складних систем, розробка інноваційних матеріалів або навіть прогнозування природних катаклізмів. Важливість цих алгоритмів виходить за межі їхніх практичних застосувань, оскільки вони стимулюють інтерес до квантової науки, сприяючи залученню інвестицій та міждисциплінарній співпраці на глобальному рівні. У цьому контексті розвиток відповідних досліджень є не лише технічним викликом, а й стратегічним напрямом для підготовки до нової епохи квантових технологій.

Квантові обчислення, завдяки своїм унікальним можливостям, відкривають нові перспективи для інновацій у фінансовій сфері, хімії, матеріалознавстві та криптографії. Їх інтеграція в практичну діяльність відображає сучасні глобальні тренди [13]. У фінансовому секторі квантові алгоритми, такі як алгоритм Гровера, дозволяють значно прискорити аналіз великих баз даних для виявлення аномалій та прогнозування ризиків. Наприклад, у світі вже тестуються квантові технології для виявлення шахрайських транзакцій у реальному часі. Провідні інвестиційні компанії, такі як BlackRock, розглядають можливості використання квантових обчислень для створення адаптивних портфелів, що враховують динаміку ринків у режимі реального часу. В Україні такі технології могли б застосовуватися для автоматизації процесів у системі податкового адміністрування, зокрема для виявлення фінансових злочинів або оптимізації державних витрат.

У хімії квантові обчислення вже змінюють підхід до дослідження складних молекулярних структур. Наприклад, IBM за допомогою свого квантового процесора моделює поведінку молекул, що може значно прискорити розробку нових ліків. У сучасних умовах це дає можливість не лише створювати препарати для лікування рідкісних захворювань, але й прогнозувати їхню взаємодію на клітинному рівні з мінімальними витратами. В Україні така технологія може знайти застосування у фармацевтичних стартапах, які спеціалізуються на розробці препаратів для лікування посттравматичних синдромів або інших медичних потреб, актуальних у воєнний час.

У матеріалознавстві квантові обчислення відкривають нові шляхи для створення надміцних матеріалів і надпровідників [10]. Наприклад, дослідження з використанням квантових комп'ютерів дозволили виявити нові структури для створення акумуляторів із тривалим терміном служби, що має вирішальне значення для розвитку електромобільної індустрії. В Україні такі технології могли б стати основою для розвитку оборонної промисловості, зокрема створення енергетично ефективних матеріалів для військової техніки або захисного обладнання.

У сфері криптографії квантові обчислення не лише створюють виклик для традиційних методів шифрування, але й пропонують нові рішення [2]. Квантовий розподіл ключів вже використовується для захисту урядових і фінансових комунікацій у Китаї та США, гарантуючи абсолютну безпеку даних. Для України, яка стикається з масштабними кіберзагрозами, інтеграція квантової криптографії могла б стати ключовим елементом національної безпеки, забезпечуючи захист критичних державних баз даних та енергетичних систем [1]. У поєднанні з інноваційними підходами до розробки квантово-стійких алгоритмів Україна може закласти фундамент для посилення кіберзахисту та участі в глобальній інноваційній екосистемі.

Впровадження квантових комп'ютерів у практичну діяльність стикається з низкою технічних та інфраструктурних викликів, які обмежують їх використання в реальних умовах. Однією з основних технічних проблем є висока чутливість кубітів до зовнішніх факторів. Кубіти, які є основою квантових обчислень, потребують надзвичайно стабільного середовища для функціонування [8]. Навіть незначні температурні

коливання, електромагнітні поля або шум можуть викликати їхню нестабільність, що призводить до обчислювальних помилок. Це вимагає створення складних кріогенних систем, які забезпечують роботу кубітів у надпровідному стані, що є технічно складним і фінансово витратним процесом.

Іншою суттєвою проблемою є квантові помилки, які виникають через нестабільність кубітів і квантовий шум. Наявні методи корекції таких помилок потребують значної кількості додаткових кубітів для збереження точності обчислень [17]. Це суттєво збільшує вимоги до апаратного забезпечення квантових комп'ютерів, що уповільнює їхній розвиток і комерціалізацію. Розробка нових методів корекції помилок, які потребують менше ресурсів, залишається одним із найважливіших напрямів досліджень.

Інфраструктурні виклики також створюють значні бар'єри для широкомасштабного впровадження квантових комп'ютерів. Їхня експлуатація вимагає спеціалізованих лабораторій із суворими умовами для збереження стабільності кубітів. Крім того, обслуговування таких систем потребує висококваліфікованих фахівців, кількість яких залишається обмеженою. Важливим питанням є також інтеграція квантових комп'ютерів у традиційні інформаційні системи. Відсутність уніфікованих стандартів і протоколів взаємодії між квантовими та класичними обчисленнями ускладнює їхнє спільне використання в реальних умовах.

Ще однією суттєвою проблемою є висока вартість квантових комп'ютерів. Процес розроблення, виробництва та технічного обслуговування таких систем вимагає суттєвих фінансових вкладень, що робить доступ до цих технологій привілеєм переважно провідних компаній та науково-дослідних установ. Це створює ситуацію, коли потенціал квантових обчислень залишається недоступним для широкого кола користувачів.

В Україні ці виклики мають свої особливості. По-перше, дефіцит висококваліфікованих спеціалістів у сфері квантових технологій є серйозною проблемою, яка обмежує можливості для розроблення та впровадження цих систем. По-друге, обмежені фінансові ресурси стримують створення необхідної інфраструктури для підтримки квантових обчислень. Крім того, інтеграція квантових комп'ютерів у державні інформаційні системи стикається з проблемою адаптації наявного програмного забезпечення та відсутністю квантово-стійких рішень у сфері кібербезпеки. Розв'язання цих проблем потребує активної державної підтримки, міжнародної співпраці та розвитку освітніх програм, орієнтованих на підготовку спеціалістів у сфері квантових технологій. Враховуючи потенціал квантових комп'ютерів для покращення інформаційної безпеки та ефективності управління державними ресурсами, їх впровадження в Україні може стати важливим елементом національної інноваційної політики.

Подальший розвиток квантових обчислювальних систем вимагає комплексного підходу, який охоплює технічні, інфраструктурні та науково-освітні аспекти. Одним із ключових напрямів є вдосконалення апаратного забезпечення квантових комп'ютерів, зокрема розробка стабільніших і менш чутливих до зовнішніх факторів кубітів. Це можливо завдяки розробці інноваційних підходів у сфері матеріалознавства, спрямованих на створення нових концепцій, зокрема топологічних кубітів. Паралельно з цим необхідно розвивати алгоритмічні рішення, що оптимізують використання доступних ресурсів і підвищують ефективність обчислень. Наприклад, створення алгоритмів із покращеною корекцією помилок здатне зменшити апаратні вимоги та зробити квантові системи більш доступними.

Інтеграція квантових технологій у високопродуктивні обчислювальні інфраструктури потребує створення стандартів для взаємодії між квантовими та класичними системами. Уніфіковані протоколи забезпечать плавну інтеграцію квантових обчислень у наявні обчислювальні платформи, дозволяючи використовувати переваги обох підходів. Важливим аспектом є розширення доступу до квантових обчислень через хмарні сервіси, що дозволить дослідникам і компаніям користуватися потужностями квантових комп'ютерів без необхідності володіти дорогим обладнанням. Такий підхід уже демонструє успіх завдяки ініціативам провідних компаній, таких як IBM і Google [16], які пропонують доступ до квантових платформ для тестування та розробки нових додатків.

Серед пріоритетів залишається розвиток квантово-стійких систем безпеки, оскільки впровадження квантових обчислень суттєво змінює ландшафт кіберзагроз. Це передбачає розроблення криптографічних рішень, стійких до атак, які можуть бути здійснені за допомогою квантових алгоритмів. Державна підтримка відіграє важливу роль у забезпеченні фінансування досліджень, створенні спеціалізованих лабораторій і навчальних програм, орієнтованих на підготовку кадрів у цій галузі. Освітні ініціативи мають бути спрямовані на формування нового покоління фахівців, здатних працювати з квантовими технологіями та інтегрувати їх у сучасні обчислювальні системи.

Особливе значення має міждисциплінарна співпраця між дослідниками, інженерами та представниками бізнесу. Це сприятиме швидкому переходу від лабораторних експериментів до комерційних застосувань квантових технологій, зокрема в галузях фінансів, охорони здоров'я та матеріалознавства. У довгостроковій перспективі необхідно створювати міжнародні партнерства для обміну досвідом та доступу до передових досліджень, що прискорить глобальне впровадження квантових обчислень у різні сфери.

Висновки. Дослідження, яке було виконано авторами, дозволило дійти висновків, згідно з якими квантові технології мають революційний потенціал для обчислювальних систем, особливо в галузі оптимізації процесів, аналізу даних і моделювання складних систем. Основними перевагами квантових обчислень є експоненціальне скорочення часу виконання завдань і можливість обробки великих обсягів інформації, що робить їх незамінними у фінансовій галузі, хімії, матеріалознавстві та криптографії.

Серед основних проблем впровадження квантових обчислювальних систем можна виокремити високу чутливість кубітів до зовнішніх впливів, потребу в складній кріогенній інфраструктурі, недостатню стійкість до квантових помилок та обмежену доступність через високу вартість технологій. Крім того, відсутність стандартів для інтеграції квантових обчислень із традиційними системами ускладнює їх практичне використання.

Для розв'язання зазначених проблем рекомендується зосередити зусилля на розробці стабільніших кубітів і нових алгоритмів корекції помилок, що зменшить вимоги до апаратного забезпечення. Важливим напрямом є створення уніфікованих протоколів взаємодії між класичними та квантовими системами, що забезпечить плавну інтеграцію цих технологій у наявні обчислювальні платформи. Необхідно також інвестувати в розвиток хмарних квантових сервісів, які зроблять технологію доступнішою для дослідників і бізнесу.

Перспективи подальших досліджень передбачають вивчення нових сфер застосування квантових обчислень, таких як медична діагностика, прогнозування кліматичних змін і розробка інтелектуальних систем керування. У контексті України варто акцентувати на підготовці фахівців у цій галузі, створенні дослідницької інфраструктури та інтеграції квантових технологій у державні системи управління. Це сприятиме не лише покращенню економічної ефективності, але й підвищенню рівня національної безпеки через впровадження квантово-стійких криптографічних рішень.

Список використаних джерел:

1. Ватолкін Д. П., Гусева Ю. І. Використання квантових обчислень у наукових дослідженнях. *Історія розвитку науки, техніки та освіти: збірник праць XXII Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції, за темою високі технології та сучасні виклики* (м. Київ, 18 квітня 2024 р.). Київ, 2024. С. 158–163. URL: <https://histproc.kpi.ua/article/view/304530> (дата звернення: 16.11.2024).
2. Горбенко Ю. І., Ганзя Р. С. Аналіз шляхів розвитку криптографії після появи квантових комп'ютерів. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Комп'ютерні системи та мережі*. 2014. Вип. 806. С. 40–48. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/pov/6624/8-40-48.pdf> (дата звернення: 16.11.2024).
3. Задірака В., Терещенко А., Швидченко І. Багатозрядна арифметика у послідовній, паралельній та квантовій моделях обчислень. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2023. Вип. 36. С. 87–91. URL: <http://www.fmmit.lviv.ua/index.php/fmmit/article/view/282> (date of access: 16.11.2024).
4. Зибін С. Оптимізація розробки структур і графіків передачі інформації в захищених корпоративних мережах. Кількісна оптимізація. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2020. № 7 (Том 3). С. 103–114. DOI: 10.28925/2663-4023.2020.7.103114
5. Каптьол Є. Аналіз впливу квантових комп'ютерів на безпеку механізмів інкапсуляції ключів на прикладі ДСТУ 8961: 2019 «Скеля». *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2023. № 36. С. 106–110. URL: <http://www.fmmit.lviv.ua/index.php/fmmit/article/view/286> (дата звернення: 16.11.2024).
6. Каптьол Є. Ю., Горбенко І. Д. Аналіз можливостей та особливостей програмування завдань криптології на квантовому комп'ютері. *Radiotekhnika*. 2020. Вип. 202. С. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2020.3.202.03> (дата звернення: 16.11.2024).
7. Корольов В. Ю., Ходзінський О. М. Розв'язування завдань комбінаторної оптимізації на квантових комп'ютерах. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2020. № 2. С. 5–13. URL: <https://icyb180.org.ua/wp-content/uploads/2020/07/rozvzyazuvannya-zadach-kombinatornoyi-optimizatsiyi-na-kvantovih-komp-yuterah.pdf> (дата звернення: 16.11.2024).
8. Кулешник Я. Ф., Сорокач О. В. Квантові комп'ютери та кубіти. *Інформаційні технології в освіті та практиці: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції* (Львів, 17 грудня 2021 р.). Львів: ЛьвДУВС, 2021. С. 43–45. URL: https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/4309/1/17_12_2021.pdf#page=43 (дата звернення: 16.11.2024).
9. Нестеров В. Дослідження впливу аналітики великих даних на ефективність бізнесу в цифрову епоху. *Інформаційні технології та суспільство*. 2024. Вип. 1 (12). С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.1.10>
10. Ткачук А. Особливості розгляду питання «квантові комп'ютери» під час вивчення основ елементарної бази сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2021. Вип. 198. С. 181–184. DOI: <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2021-1-198-181-184>
11. Трифонова О. М., Садовий М. І. Сучасні інноваційні технології та методика професійного навчання квантових комп'ютерів. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2023. Вип. 209. С. 373–379. DOI: <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2022-1-209-373-379>
12. Трифонова О. М., Садовий М. І. Сучасні інноваційні технології та методика професійного навчання квантових комп'ютерів. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2023. Вип. 209. С. 373–379. DOI: <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2022-1-209-373-379>

13. Gill S. S., Buyya R. Transforming Research with Quantum Computing. *Journal of Economy and Technology*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949948824000295?via%3Dihub> (date of access: 16.11.2024).
14. Hassija V., Chamola V., Gupta V., Jain S., Guizani M. Present landscape of quantum computing. *IET Quantum Communication*. 2020. Vol. 1. № 2. P. 42–48. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-qtc.2020.0027>
15. Hunko I. Software Testing in 2023: New Trends and Challenges. *Herald of Kyiv Institute of Business and Technology*. 2023. Vol. 49. № 1–2. P. 25–36. DOI: <https://doi.org/10.37203/kibit.2023.49.03>
16. Hussain S., Neupane Y., Wang W. L., Ibrahim N., Khan S. U. R., Kareem A. Empirical Investigation of Quantum Computing on Solving Complex Problems. In: Kruchten P., Gregory P. (eds) *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming – Workshops. XP XP 2022 2023. Lecture Notes in Business Information Processing*. Vol. 489. Springer, Cham, 2024. P. 150–163. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48550-3_22
17. Ming W. S. The Role of Quantum Computing in Solving Complex Global Problems. *Hong Kong International Journal of Research Studies*. 2023. Vol. 1. № 1. P. 18–25. URL: <https://octopuspublication.com/index.php/hkijrs/article/view/4> (date of access: 16.11.2024).
18. Njeri N. Quantum Computing Algorithms for Solving Complex Optimization Problems. *Journal of Advanced Technology and Systems*. 2023. Vol. 1. № 1. P. 24–34. URL: <https://forthworthjournals.org/journals/index.php/JATS/article/view/13> (date of access: 16.11.2024).