

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF QUANTUM METHODS
AND MODELS IN COMPUTATIONAL LINGUISTICS

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ КВАНТОВИХ МЕТОДІВ
ТА МОДЕЛЕЙ У КОМП'ЮТЕРНІЙ ЛІНГВІСТИЦІ

Burliciev O.L.¹

Shtanko L.O.²

Vasylenko O.O.³

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-351-4-11>

Вступ. Сучасні економічні процеси дуже тісно пов'язані з лінгвістикою. Зокрема, мова як інструмент комунікації є одним з ключових елементів бізнес-спілкування. Вдала імплементація лінгвістики у економічні процеси підприємства дозволяє:

- застосовувати найефективніші мовні засоби для спілкування з партнерами, клієнтами та співробітниками;
- створювати рекламні кампанії та продукти, що є найбільш сприятливими для споживачів;
- усувати культурні та мовні перешкоди при підписанні та виконанні міжнародних угод;
- правильно розуміти тексти фінансових звітів.

Також все більш актуального значення набуває лінгвістика в процесі глобалізації економіки. Збільшення частки транс-національних корпорацій призводить до певної уніфікації продуктів та послуг, незалежно від країни, що включає в себе і мовну уніфікацію позиціонування бренду тощо.

В сучасній економіці інтеграційні процеси на різних рівнях економіки все більше прискорюються. Ці інтеграційні процеси, особливо на ринку праці, посилились в контексті військової агресії РФ на території України. Мільйони біженців заповнили країни Європейського Союзу

¹ Candidate of Technical Sciences, Ukrainian Institute of Arts and Sciences

² Candidate of Economic Sciences, Ukrainian Institute of Arts and Sciences

³ Postgraduate Student,

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine

і поставили нові непрості виклики – забезпечити робочими місцями сотні тисяч безробітних емігрантів, які до всього іншого ще й мають мовний бар'єр. Окрім задачі інтеграції біженців на ринок труда, перед урядами країн ЄС постало питання формування сприятливого середовища до культурної та соціальної адаптації вимушених переселенців, що допомагає знизити рівень соціальної напруги, що в свою чергу в подальшому сприяє підвищенню продуктивності їх праці, а отже позитивно впливає на економічний ефект в тривалій перспективі. Тому питання пошуку інструментів, засобів, технологій, що дозволяють прискорити або взагалі мінімізувати процес мовної адаптації, набуває все більш актуального значення.

Зі зростанням частки ІТ-технологій в економічних процесах почав динамічно розвиватись напрямок комп'ютерної лінгвістики, що дозволяє суттєво удосконалити їх.

Комп'ютерна лінгвістика – це галузь науки, що досліджує взаємодію між мовою та комп'ютерами. В ній синтезовано знання з лінгвістики, інформатики та статистики. Однією з головних задач комп'ютерної лінгвістики є створення комп'ютерних систем для обробки та розуміння людської мови.

На рис. 1 представлено основні напрямки, що вивчає комп'ютерна лінгвістика.

Як видно з рис. 1, основними напрямками комп'ютерної лінгвістики є не лише системи розпізнання тексту і мовлення, що вже давно представлені на ринку та активно розвиваються, але й розробка нейронних мереж для вивчення мовних структур, інтелектуальних систем, що будуть розуміти мову, що в перспективі може призвести до повної тотальної мовної глобалізації, коли дистанція між людьми, фірмами, компаніями, що використовують різні мови в своїй буденній та корпоративній комунікації, просто зникне.

Враховуючи темпи зростання кількості інформації (рис. 2) та бажання пришвидшити її обробку, одним із перспективних напрямків розвитку цієї галузі є використання принципів квантової фізики, квантових комп'ютерів та алгоритмів, що працюють зі станами квантових систем. Застосування квантових методів у комп'ютерній лінгвістиці дозволить прискорити процеси обробки природньої мови та підвищити їх точність. Це можливо за рахунок кодування текстової інформації за

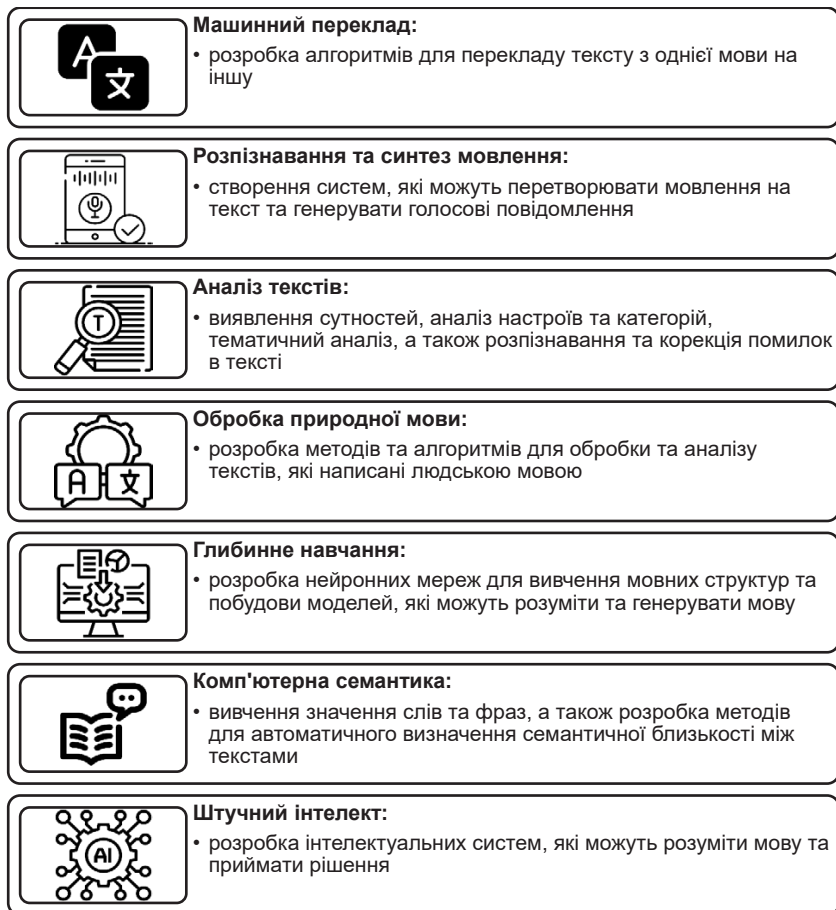


Рис. 1. Основні напрямки комп'ютерної лінгвістики

допомогою квантових бітів, які можуть перебувати в суперпозиції станів 0 та 1, на відміну від класичних комп'ютерів, що базуються на двійковому кодуванні у вигляді бітів, які можуть знаходитись в стані 0 або 1.

В роботі [3] показана надефективність квантових комп'ютерів порівняно з класичними, а також представлені приклади квантових алгоритмів.

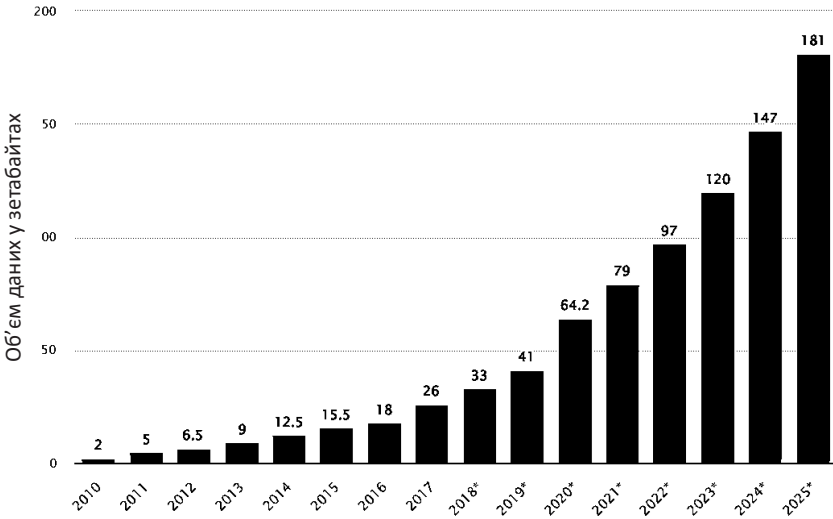


Рис. 2. Темпи зростання кількості інформації у 2010–2020 рр. з прогнозом на 2021–2025 рр.

Джерело: за матеріалами [26]

Робота [13] охоплює обчислювальні моделі, методи та засоби збору, зберігання, індексування та аналізу лінгвістичних даних у контексті перекладу.

В роботі [2] наведено загальний опис 4 квантових методів, зокрема: стиснуте кодування, алгоритм Дойча, квантове перетворення Фур'є, алгоритм Шора.

У статті [10] перераховані класифіковані за типом підходи щодо вирішення завдань комп'ютерної лінгвістики як класичними, так і квантовими методами. Показано переваги квантових обчислень щодо обробки природньої мови з точки зору продуктивності та методології.

В матеріалах [12] представлено концепції, методи та важливі схеми (на базі IBM Quantum Composer), які складають основу квантових обчислень.

В роботі [14] представлено сфери застосування квантових алгоритмів. Наголос зроблено не на технічних деталях їх використання, а на огляді

таких напрямів, як: криптографія, пошук і оптимізація, моделювання квантових систем, а також вирішення великих систем лінійних рівнянь.

Модель природної мови на основі композиційно-розподільчої семантики (DisCoCat) та метод для відображення DisCoCat-діаграм на квантових схемах представлено в роботі [17].

У статті [21] досліджено можливості реалізації квантової обробки природної мови (QNLР) на квантових пристроях проміжного масштабування (NISQ). Розглянуто гібридні класично-квантові підходи, а також бібліотеки, доступні для реалізації QNLР. Визначено, що поєднання значень та мовної структури в єдину модель є більш природним для обробки на квантових пристроях, ніж на класичному обладнанні.

У посібнику [19] представлено налаштування квантових нейронних мереж та створення програм для обробки мови та акустики. Оскільки алгоритми навчання глибоких нейронних мереж (DNN) є дорогими з точки зору обчислювальної потужності, автори зазначають перспективи використання квантового машинного навчання (QML) для підвищення обчислювальної ефективності алгоритмів машинного навчання (ML) у нових областях, в тому числі й комп'ютерній лінгвістиці. Зокрема, гібридні квантово-класичні моделі є стійкими до помилок квантового шуму, а тому дають можливість для різноманітних практичних реалізацій QML на пристроях NISQ.

Оскільки застосування квантових обчислень у комп'ютерній лінгвістиці дуже динамічно розвивається, то на сьогоднішній день відсутній впорядкований аналіз існуючих результатів та наукових досягнень у цій сфері. Тому виникає необхідність у проміжній систематизації знань щодо розроблених квантових моделей та методів для практиків та дослідників, які у подальшому будуть розвивати цей напрям.

Мета дослідження: проаналізувати 9 квантових моделей та методів для вирішення завдань комп'ютерної лінгвістики.

В результаті дослідження будуть проаналізовані наступні квантові методи та моделі:

1. Стиснуте кодування.
2. Алгоритм дойча.
3. Квантове перетворення Фур'є.

4. Алгоритм гровера.
5. Алгоритм шора.
6. Метод оцінки квантової фази.
7. Варіаційний квантовий алгоритм.
8. Моделі квантових нейронних мереж.
9. Моделі квантового машинного навчання.



Рис. 3. Методологія аналізу квантових методів та моделей

Методологія аналізу (рис. 3) полягає у короткому описі суті кожного методу або моделі;

характеристичі їхніх переваг, а також виокремленні переліку задач, які можна вирішити в комп'ютерній лінгвістиці.

Результати дослідження

На початку дослідження необхідно зазначити узагальнені недоліки та обмеження квантових обчислень, оскільки вони є характерними для кожного з проаналізованих квантових алгоритмів та моделей:

1. Чутливість квантових бітів до різних типів помилок, таких як декогеренція та квантовий шум.
2. Складність у забезпеченні точних та надійних результатів, оскільки процес утримання високоякісних квантових бітів (кубітів) з довгим часом збереження квантової інформації є дорогим.
3. Технічна складність у побудові великих квантових обчислювальних систем з великою кількістю кубітів.
4. Обмеженість доступу до квантових пристроїв.
5. Необхідність спеціалізованих знань та навичок у квантовій обчислювальній теорії та програмуванні.

Стиснуте кодування

Алгоритм стиснутого кодування (dense coding) [2, с. 43] використовує один квантовий біт разом з фотонною парою за парадоксом Ейштейна-Подольського-Розена (ЕПР) [7] для передачі двох класичних бітів. Це можливо завдяки формуванню та передачі ЕПР пари раніше, що дозволяє фізично передати лише один кубіт для передачі

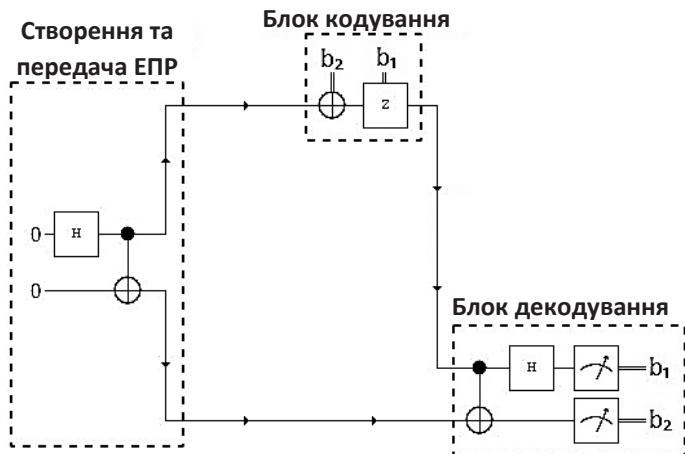


Рис. 4. Квантова схема для алгоритму стиснутого кодування, де: b_1, b_2 – класичні біти; H, Z – кубіти

Джерело: за матеріалами [2, с. 43]

двох бітів інформації. Квантова схема для алгоритму стиснутого кодування показана на рис. 4.

Переваги: дозволяє зекономити ресурси для зберігання інформації.

Основні завдання для вирішення: стиснення великих об'ємів текстових даних.

Алгоритм Дойча

Алгоритм Дойча демонструє перевагу квантових схем над класичними завдяки комбінації квантового паралелізму та інтерференції кубітів. Він здатний швидко та ефективно визначити, чи є функція константною або збалансованою, замість класичного перебору всіх можливих варіантів [2, с. 45; 8].

Роботу алгоритму Дойча можна пояснити, розглянувши типовий експеримент з інтерференцією (рис. 5): частинка, яка поводить себе як хвиля, наприклад фотон, може рухатися від джерела до масиву детекторів, дотримуючись двох або більше шляхів одночасно. Ймовірність спостереження частинки буде зосереджена на тих детекторах, де більшість вхідних хвиль надходить з тією самою фазою.

На рис. 6. показано квантову схему такого алгоритму. Початкове значення вхідного регістра $|0\rangle$, вихідного – $|1\rangle$.

Переваги: прискорює перебір варіантів.

Основні завдання для вирішення: оптимізація вибору за певним критерієм при обробці та генерації тексту.

Квантове перетворення Фур'є

Квантове перетворення Фур'є дозволяє експоненційно швидше розкласти n -бітне ціле число на прості множники, ніж це можна зробити за допомогою класичного алгоритму на звичайному комп'ютері. Числа з однаковою розрядністю за допомогою кла-

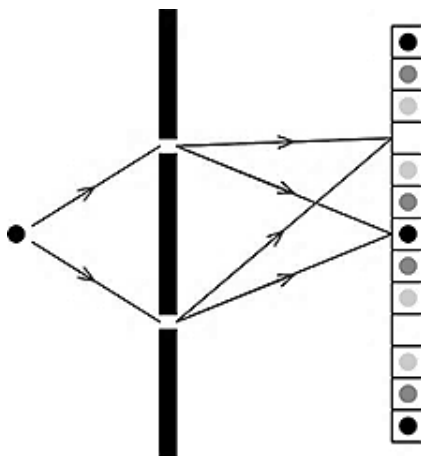


Рис. 5. Типовий експеримент з інтерференцією, що ілюструє роботи алгоритму Дойча

Джерело: за матеріалами [8]

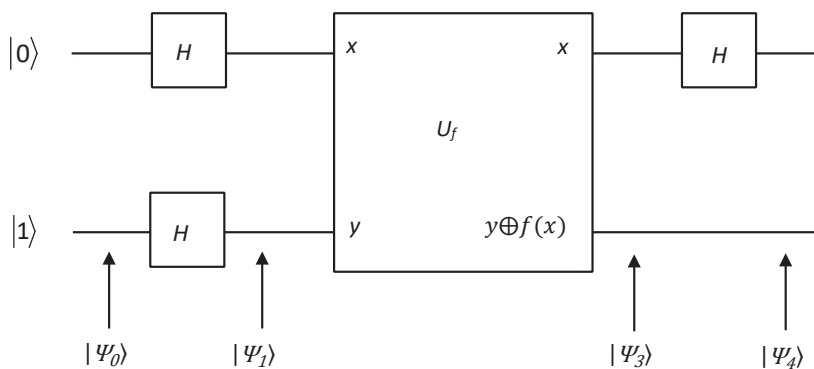


Рис. 6. Квантова схема алгоритма Дойча, де: x, y – вхідні дані; $f(x)$ – функція, що аналізується; Ψ_{1-4} – квантові стани; U_f – оператор квантового перетворення вхідних даних $|x, y\rangle$ у вихідні $y \oplus f(x)$

Джерело: за матеріалами [2, с. 45]

сичного алгоритму швидкого перетворення Фур'є буде виконутися за $s = 2^n n$ кроків (експоненційна складність), а за допомогою квантового алгоритму – $s = n(n + 1)/2$ (поліноміальна складність) [3].

На рис. 7 показана ефективна квантова схема, за допомогою якої можна виконати квантове перетворення Фур'є для п'ятизначного числа.

Переваги: експоненційна швидкодія обробки одиниці інформації.

Основні завдання для вирішення: розбивка текстових одиниць на елементарні складові для аналізу.

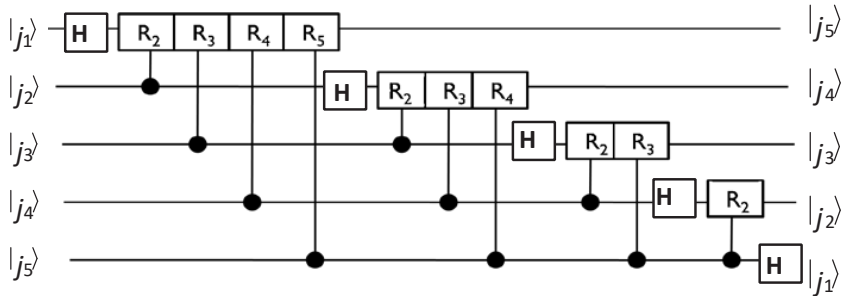


Рис. 7. Квантова схема квантового перетворення Фур'є п'ятизначного числа¹, де: j_{1-5} – двійкове зображення квантового стану п'ятизначного числа; R_{2-5} – оператори керованого повороту

Джерело: за матеріалами [2, с. 49]

Алгоритм Гровера

Алгоритм Гровера дозволяє квадратично пришвидшити неструктуровану задачу пошуку, а також може бути підпрограмою для отримання квадратичного покращення часу виконання для інших алгоритмів. Це явище має назву посилення амплітуди. Важливою особливістю алгоритму є те, що він не використовує внутрішню структуру списку [8]. Ще однією відмінністю алгоритму Гровера є здатність з певною ймовірністю вирішити задачу правильно. Цю ймовірність можна підвищити, повторно застосовуючи алгоритм [4].

На рисунку 8 представлена квантова схема алгоритму Гровера для двох кубітів.

¹ Для отримання остаточного результату слід застосувати операцію обертання порядку вихідних кубітів.

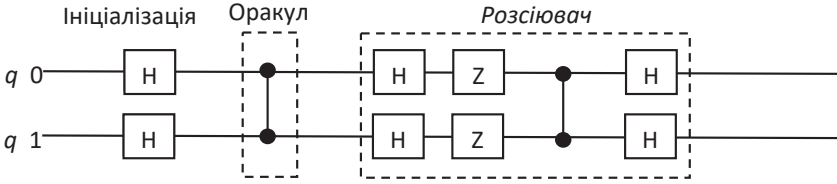


Рис. 8. Квантова схема алгоритму Гровера для двох кубітів, де: q – вхідна величина

Джерело: за матеріалами [10]

Якщо класичний пошук потрібного запису потребує в середньому порядку $N/2$ операцій, де N – загальне число записів, то запропонований Л. Гровером квантовий алгоритм дозволяє виконати цю дію приблизно за \sqrt{N} квантових операцій. Його ефективність базується на перевагах використання сплених станів та квантового паралелізму обробки інформації в таких [1].

Переваги: квадратичне прискорення для пошуку для задач великої розмірності.

Основні завдання для вирішення: пошук даних у неструктурованих задачах.

Алгоритм Шора

Квантовий алгоритм Шора за поліноміальний час дозволяє вирішити проблему факторизації числа, тобто його розкладання на прості множники. При кількості розрядів $n \leq 200$ ця задача за допомогою сучасних суперкомп'ютерів буде вирішуватись більше допустимого осяжного часу [1].

Алгоритм Шора використовує інтерференцію для вимірювання періодичності арифметичних об'єктів так само, як фізики використовують розсіювання електромагнітних хвиль та вимірювання інтерференції для визначення періодичності фізичних об'єктів, таких як кристалічні решітки [24].

Квантова схема для реалізації алгоритму Шора показана на рис. 9.

Переваги: висока швидкодія (поліноміальна складність) виконання операції факторизації вхідних даних.

Основні завдання для вирішення: кодування та розшифрування текстової інформації.

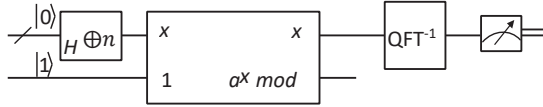


Рис. 9. Квантова схема алгоритму Шора,
де: a – довільне число; N – число, що факторизується;
 QFT^{-1} – інверсне квантове перетворення Фур'є

Джерело: за матеріалами [2, с. 53]

Метод оцінки квантової фази

Цей метод є базовою структурою для побудови інших квантових алгоритмів. Квантовий комп'ютер дозволяє вимірювати лише окремі кубіти, але для вимірювання більш складної величини необхідно провести квантову оцінку фази. Представлений алгоритм формує власний стан ермітового оператора² в одному регістрі та зберігає відповідне власне значення в другому регістрі [15; 5].

Загальна квантова схема для реалізації алгоритму представлена на рис. 10.

Переваги: вимірювання складних квантових величин.

Основні завдання для вирішення: може бути структурною одиницею для нових квантових алгоритмів.

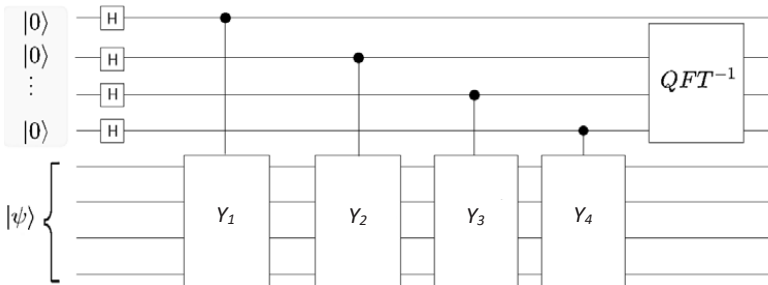


Рис. 10. Загальна квантова схема алгоритму оцінки квантової фази, де: Y_{1-4} – керовані унітарні елементи 1-4

Джерело: за матеріалами [21]

² Пояснення терміну можна знайти за посиланням: https://en.wikipedia.org/wiki/Hermitian_adjoint

Collective monograph

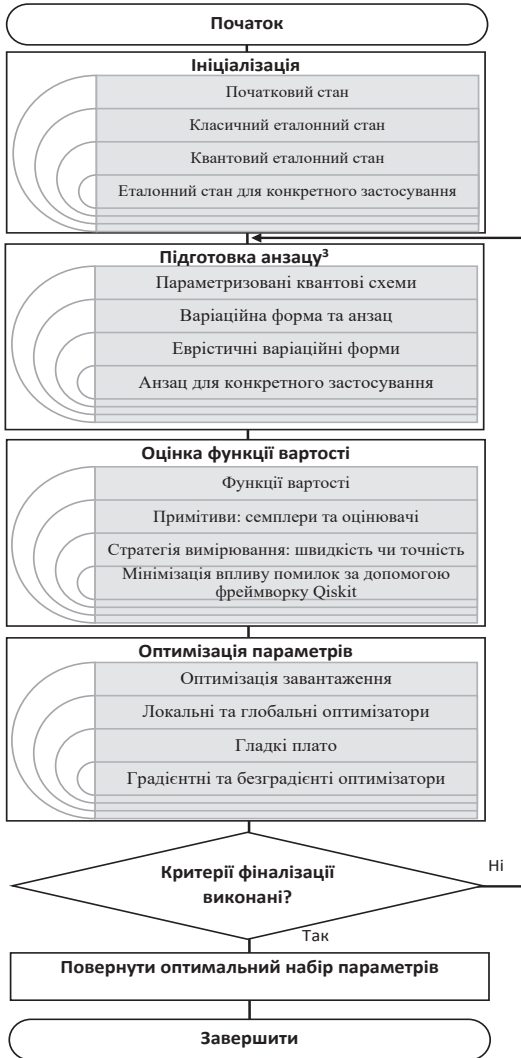


Рис. 11. Схема VQA

Джерело: за матеріалами [27]

³ Анзац – це конкретна комбінація еталонного стану та варіаційної форми.

Варіаційний квантовий алгоритм (VQA)

Варіаційний квантовий алгоритм є поєднанням квантово-класичного алгоритму оптимізації, в якому цільова функція оцінюється за допомогою квантового обчислення, а її параметри оновлюються на основі класичних методів оптимізації. Алгоритми цього класу переважно застосовуються в квантових комп'ютерах NISQ, тому що вони добре масштабуються з кількістю доступних кубітів та можуть функціонувати без високої відмовостійкості [27].

Схема варіаційного квантового алгоритму представлена на рис. 11.

Переваги: висока швидкодія прийняття оптимального рішення за певним критерієм.

Основні завдання для вирішення: оптимізація параметрів тексту при обробці чи генерації, оптимізація результатів при машинному навчанні.

Моделі квантових нейронних мереж



Рис. 12. Узагальнена схема квантової нейронної мережі

Джерело: за матеріалами [19]

В моделях квантових нейронних мереж (QNN) поєднані класичні нейронні мережі та параметризовані квантові схеми.

QNN є квантовими алгоритмами, які можна навчити варіаційним способом за допомогою класичних оптимізаторів. Ці схеми містять карту функцій (з вхідними параметрами) та анзац (з ваговими коефіцієнтами, що можна навчити) [18].

На рисунку 12 представлена узагальнена структура QNN, що містить блоки завантаження та обробки даних.

Переваги: квантова швидкодія при роботі з великим масивом вхідних даних.

Основні завдання для вирішення: моделювання лінгвістичних структур (семантичні зв'язки, синтаксичні структури та інше), розпізнавання та генерація мови, аналіз текстових конструкцій.

Квантове машинне навчання

Поєднання квантових обчислень та машинного навчання (рис.12) можливе за допомогою 4 підходів, а саме [19]: за характером даних – класичні С чи квантовими Q та за характером алгоритмів обробки – класичний С чи квантовий Q. комп'ютері. як показано на рис. 13.

До категорії алгоритмів QC відносять дві базові групи [16]:

- потребують квантової пам'яті з довільним доступом (qram);
- не потребують qram.

У квантовому машинному навчанні використовують параметризовані квантові схеми (рис. 14) для кодування даних (параметри визначаються кодованим даними), а також побудови квантових моделей (параметри визначаються процесом оптимізації).

Переваги: квантова швидкодія, великий обсяг вибірки даних та простору для роботи моделі.

Основні завдання для вирішення: навчання моделі для обробки, аналізу та генерації текстових даних.

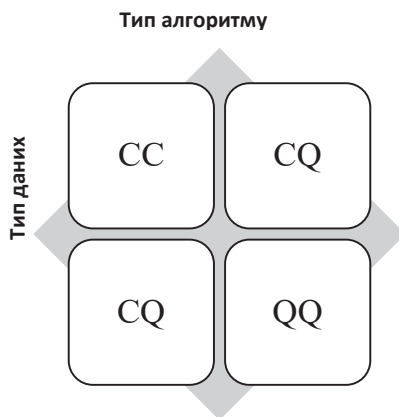


Рис. 13. Поєднання квантових обчислень та ML

Джерело: за матеріалами [16]

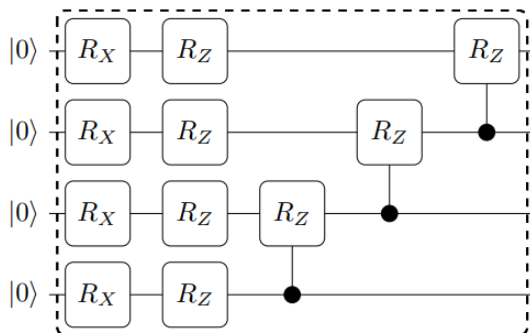


Рис. 14. Приклад параметризованої схеми для QML, де: R_x , R_z – кубіти параметризації

Джерело: за матеріалами [24]

Висновки.

Таким чином, у проведеному дослідженні було проаналізовано 9 квантових методів та моделей, що можуть бути застосовані для вирішення задач комп'ютерної лінгвістики за напрямками зазначеними на рис. 1.

Зведені результати проведеного аналізу представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Зведені результати проведеного аналізу

№ з/п	Назва методу	Основні завдання для вирішення	Переваги	Недоліки
1	Стиснуте кодування	стиснення великих об'ємів текстових даних	економія ресурсів для зберігання інформації	1. Чутливість квантових бітів до різних типів помилок, таких як декогеренція та квантовий шум.
2	Алгоритм Дойча	оптимізація вибору при обробці та генерації тексту.	прискорення перебору варіантів	2. Складність у забезпеченні точних та надійних результатів, оскільки процес утримування

Collective monograph

(Закінчення таблиці 1)

№ з/п	Назва методу	Основні завдання для вирішення	Переваги	Недоліки
3	Квантове перетворення Фур'є	розбивка текстових одиниць на елементарні складові для аналізу	експоненційна швидкодія обробки одиниці інформації	високоякісних квантових бітів (кубітів) з довгим часом збереження квантової інформації є дорогим. 3. Технічна складність у побудові великих квантових обчислювальних систем з великою кількістю кубітів. 4. Обмеженість доступу до квантових пристроїв. Необхідність спеціалізованих знань та навичок у квантовій обчислювальній теорії та програмуванні
4	Алгоритм Гровера	пошук даних у неструктурованих задачах	квадратичне прискорення при пошуку інформації	
5	Алгоритм Шора	кодування та розшифрування текстової інформації	поліноміальна швидкодія при факторизації вхідних даних	
6	Метод оцінки квантової фази	структурна одиниця для нових квантових алгоритмів	вимірювання складних квантових величин	
7	Варіаційний квантовий алгоритм	оптимізація параметрів при роботі з текстом, оптимізація результатів при машинному навчанні	висока швидкодія прийняття оптимального рішення за певним критерієм	
8	Моделі квантових нейронних мереж	моделювання лінгвістичних структур, розпізнавання та генерація мови, аналіз текстових конструкцій	квантова швидкодія при роботі з великим масивом вхідних даних	
9	Моделі квантового машинного навчання	навчання моделі для обробки, аналізу та генерації текстових даних	квантова швидкодія, великий обсяг вибірки даних та простору для роботи моделі	

Список використаних джерел:

1. Войтович І., Корсунський В. Перспективи квантових обчислень з використанням надпровідності. *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 23–56.
2. Карлаш Г. Квантові інформаційні системи. Навчальний посібник для спеціальності «Прикладна фізика та наноматеріали»: навч. посіб. Київ: ф-т радіофізики, електроніки та комп'ютер. систем Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка, 2018. 77 с.
3. Крохмальський Т. Квантові комп'ютери: основи й алгоритми (короткий огляд). *Журнал фізичних досліджень*. 2004. Т. 8. № 1. С. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.08.1> (дата звернення: 22.05.2023).
4. Павлишенко Б. Аналіз семантичних образів у масивах текстових об'єктів за допомогою квантових обчислень. *Математичні машини і системи*. 2013. № 1. С. 34–43.
5. Bacon D. Quantum Phase Estimation and Arbitrary Size Quantum Fourier Transforms. 2006. *CSE 599d – Quantum Computing, University of Washington*. URL: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse599d/06wi/lecturenotes10.pdf> (дата звернення: 22.05.2023).
6. Braham B. Variational quantum algorithms. *QUTiP Community*. URL: <https://qutip-qip.readthedocs.io/en/latest/qip-vqa.html> (дата звернення: 22.05.2023).
7. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?. *Physical review*. 1935. Vol. 47, no. 10. P. 777–780. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrev.47.777> (дата звернення: 01.06.2023).
8. Deutsch-Jozsa algorithm. Learn quantum computing: a field guide. *IBM Quantum*. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/ixq/guide/deutsch-jozsa-algorithm> (дата звернення: 22.05.2023).
9. Grover L.K. A fast quantum mechanical algorithm for database search. *The twenty-eighth annual ACM symposium*, Philadelphia, Pennsylvania, United States, 22–24 May 1996. New York, USA, 1996. P. 212–219. DOI: <https://doi.org/10.1145/237814.237866> (дата звернення: 22.05.2023).
10. Grover's algorithm. Learn quantum computing: a field guide. *IBM Quantum*. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/ixq/guide/grovers-algorithm> (дата звернення: 22.05.2023).
11. Guarasci R., De Pietro G., Esposito M. Quantum natural language processing: challenges and opportunities. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12. No. 11. P. 5651. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12115651> (дата звернення: 22.05.2023).
12. Learn quantum computing: a field guide. *IBM Quantum*. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/ixq/guide> (дата звернення: 22.05.2023).
13. Luz S. Computational linguistics and natural language processing. 2022. *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.07026> (дата звернення: 22.05.2023).
14. Montanaro A. Quantum algorithms: an overview. *Npj quantum information*. 2016. Vol. 2. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23> (дата звернення: 22.05.2023).

15. Pezzè L., Smerzi A. Quantum phase estimation algorithm with gaussian spin states. *PRX quantum*. 2021. Vol. 2. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1103/prxquantum.2.040301> (дата звернення: 22.05.2023).

16. Quantum Machine Learning. *Qiskit Textbook*. URL: <https://learn.qiskit.org/course/machine-learning/introduction> (дата звернення: 22.05.2023).

17. Quantum natural language processing on near-term quantum computers / K. Meichanetzidis et al. *Electronic proceedings in theoretical computer science*. 2021. Vol. 340. P. 213–229. DOI: <https://doi.org/10.4204/EPTCS.340.11> (дата звернення: 22.05.2023).

18. Quantum neural networks: concepts, applications, and challenges / Y. Kwak et al. *2021 twelfth international conference on ubiquitous and future networks (ICUFN)*, Jeju Island, 17-20 August 2021. P. 413–416. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICUFN49451.2021.9528698> (дата звернення: 22.05.2023).

19. Quantum Neural Networks. *Qiskit Machine Learning*. URL: https://github.com/Qiskit/qiskit-machine-learning/blob/stable/0.6/docs/tutorials/01_neural_networks.ipynb (дата звернення: 22.05.2023).

20. Quantum neural networks for speech and natural language processing / P.-Y. Chen et al. *IJCAI 2021: International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal, 19-26 August 2021. 2021. URL: <https://research.ibm.com/publications/quantum-neural-networks-for-speech-and-natural-language-processing> (дата звернення: 22.05.2023).

21. Quantum phase estimation. Learn quantum computing: a field guide. *IBM Quantum*. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/iqx/guide/quantum-phase-estimation> (дата звернення: 22.05.2023).

22. Rai A. A review article on quantum natural language processing. *International journal for research in applied science and engineering technology*. 2022. Vol. 10. No. 1. P. 1588–1594. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40103> (дата звернення: 22.05.2023).

23. Shor P.W. Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM journal on computing*. 1997. Vol. 26. No. 5. P. 1484–1509. DOI: <https://doi.org/10.1137/s0097539795293172> (дата звернення: 22.05.2023).

24. Shor's algorithm. Learn quantum computing: a field guide. *IBM Quantum*. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/iqx/guide/shors-algorithm> (дата звернення: 22.05.2023).

25. Sim S., Johnson P. D., Aspuru-Guzik A. Expressibility and Entangling Capability of Parameterized Quantum Circuits for Hybrid Quantum-Classical Algorithms. *Advanced Quantum Technologies*. 2019. Vol. 2. No. 12. P. 1900070. DOI: <https://doi.org/10.1002/qute.201900070> (дата звернення: 01.06.2023).

26. Taylor P. Amount of data created, consumed, and stored 2010-2020, with forecasts to 2025. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/> (дата звернення: 22.05.2023).

27. Variational algorithms. *Qiskit Textbook*. URL: <https://learn.qiskit.org/course/algorithm-design/variational> (дата звернення: 22.05.2023).