



ГНАТЕНКО

Христина Павлівна — член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука Львівського національного університету імені Івана Франка

КВАНТОВЕ ПРОГРАМУВАННЯ: НОВІ МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ЗАДАЧ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

**Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 25 лютого 2026 року**

У доповіді наведено результати наукових досліджень, проведених на кафедрі теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука Львівського національного університету імені Івана Франка і спрямованих на розв'язання проблем квантової інформації, побудову квантових алгоритмів для вирішення фундаментальних та прикладних завдань.

Вельмишановні члени Президії!

Вельмишановні присутні!

Для мене велика честь виступати сьогодні перед такою поважною аудиторією. Я розповім про квантові обчислення загалом, про те, для чого було створено квантові комп'ютери і чому сьогодні про них усі говорять, торкнуся особливостей квантового програмування, ознайомлю вас з тим, як ми на кафедрі теоретичної фізики імені професора Івана Вакарчука Львівського національного університету імені Івана Франка використовуємо квантові обчислення для розв'язання фундаментальних задач, як бачимо перспективи застосування квантових технологій для вирішення прикладних завдань. Також поінформую вас про важливий напрям нашої роботи — підготовку фахівців з квантової інформації та квантового програмування і формування в Україні освітньо-наукового середовища, яке поєднує як уже відомих учених у сфері квантових технологій, так і школярів, які цікавляться квантовими обчисленнями.

Минулого року світова спільнота відсвяткувала 100-річчя квантової теорії, яку розробляли такі відомі вчені, як Макс Планк, Альберт Ейнштейн, Вернер Гейзенберг, Нільс Бор, Ервін Шредінгер, Поль Дірак. Мабуть, одним із найбільш яскравих і актуальних практичних результатів розвитку цієї теорії на сьо-

годні є квантовий комп'ютер — обчислювальний пристрій, функціонування якого ґрунтується на принципах квантової механіки.

Головною передумовою створення квантового комп'ютера було нестримне бажання людства постійно поліпшувати технології. Стрімкий розвиток класичної обчислювальної техніки, спрямований на зменшення розмірів пристроїв з одночасним зростанням їхніх обчислювальних можливостей, досяг межі, за якою вже почали проявлятися квантові ефекти. І ось тут ми підійшли до роздоріжжя в подальшому поступі технологій: або продовжувати рухатися тим самим шляхом, зосередившись на боротьбі з небажаними квантовими ефектами, або спробувати використати їх в обчисленнях і створити щось принципово нове. Саме цей другий варіант розвитку подій і привів до появи квантових процесорів.

На сьогодні квантові комп'ютери вже існують, використовуючи для свого функціонування особливості світу мікромасштабів — масштабів, у мільйони разів менших за метр. Це світ атомів, молекул, їх ансамблів. Серед властивостей квантових систем можна виокремити три основні, які неможливо реалізувати в класичному процесорі, а саме: 1) суперпозиція квантових станів; 2) квантова заплутаність; 3) квантове вимірювання, яке має ймовірнісний характер.

Як же працює квантовий комп'ютер? Класичний комп'ютер оперує класичними бітами. Це одиниця інформації, яка в традиційних обчислювальних пристроях набуває значення або «0», або «1». У квантовому комп'ютері ми маємо справу з квантовими бітами, або, як їх ще називають, кубітами. Кубіт також має два стани — «0» і «1», але на відміну від класичного біта, він може перебувати в цих станах одночасно. Це і є суперпозиція квантових станів, яка описується функцією:

$$|\psi_1\rangle = C_1|0\rangle + C_2|1\rangle,$$

де

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |0\rangle; \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |1\rangle;$$

C_1 і C_2 — комплексні константи, що визнача-

ють імовірності перебування кубіта в стані «0» і в стані «1» відповідно. Зважаючи на ці ймовірності, навіть на одному квантовому біті можна реалізувати безліч квантових станів. Тому й інформацію, яку ми хочемо дослідити, можна записати в цих константах і одночасно обробляти ці дані на квантовому процесорі.

Загалом квантовим бітом може бути будь-яка квантова система з двома квантовими станами або система з багатьма квантовими станами, в якій можна виокремити два квантові рівні. На сьогодні вже існують різні фізичні реалізації кубітів. Найбільш поширеними з них є три групи:

- надпровідникові, або джозефсонівські, кубіти, дія яких ґрунтується на ефекті Джозефсона;
- фотонні кубіти, реалізовані на окремих фотонах через їхню поляризацію, фазу або кількість фотонів;
- спінові кубіти, побудовані на основі спінового стану електронів чи ядер.

Кожна з цих фізичних реалізацій має свої переваги і недоліки. Я працювала на квантових комп'ютерах компанії IBM і компанії Rigetti, квантові процесори яких побудовано на основі надпровідникових кубітів.

Актуальним і дуже цікавим запитанням є: як можна використати особливості квантових процесорів, тобто як реалізувати квантові обчислення? Квантові комп'ютери можуть розв'язувати деякі задачі набагато швидше, ніж навіть найпотужніші класичні комп'ютери. Цю «суперсилу» квантових комп'ютерів називають квантовою перевагою, в основі якої лежать фундаментальні принципи квантової механіки та особливості квантового світу, серед яких суперпозиція квантових станів і квантова заплутаність.

Поясню детальніше. Оперуючи одним кубітом, завдяки суперпозиції станів «0» і «1» ми можемо утворити безліч квантових станів. Для розуміння наведу аналогію з фарбою: змішуючи фарби двох різних кольорів, ми можемо отримати майже нескінченну палітру відтінків. А якщо ми візьмемо два квантові біти, то вони можуть перебувати вже в чотирьох квантових станах:

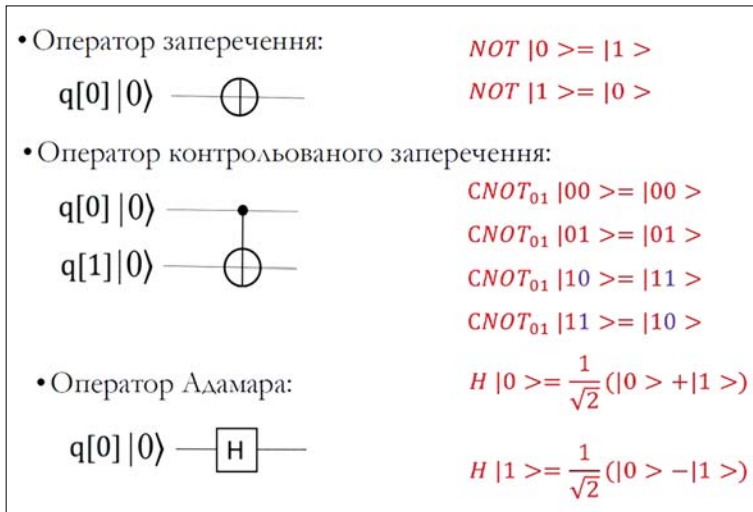


Рис. 1. Приклади операцій над станами кубітів

$|\psi_2\rangle = C_1|00\rangle + C_2|01\rangle + C_3|10\rangle + C_4|11\rangle$, тобто у функції, що описує суперпозицію 2-кубітного стану, є чотири доданки, які одночасно обробляються на квантовому процесорі. Відповідно, для n кубітів маємо суперпозицію 2^n квантових станів:

$$|\psi_n\rangle = C_1|000\dots 0\rangle + C_2|000\dots 1\rangle + \dots + C_n|111\dots 1\rangle.$$

Наприклад, представлений компанією IBM квантовий процесор Condor має 1121 надпровідниковий кубіт, а отже, кількість доданків у суперпозиції становить 2^{1121} . Жоден класичний комп'ютер не в змозі реалізувати такі обчислення. До речі, здатність квантового комп'ютера проводити обчислення паралельно називають квантовим паралелізмом.

Однак і це ще не все. Константи C_1, C_2, \dots, C_n у функції, що описує суперпозицію, є комплексними величинами, а тому ми можемо записувати інформацію як у дійсну їх частину, так і в уявну. Загалом у квантових обчисленнях існують різні цікаві способи кодування інформації, але це, мабуть, предмет окремої розмови.

Як же здійснюють обчислення на квантових комп'ютерах? Звісно, для роботи з квантовим процесором потрібні специфічні технології програмування, засновані на принципах суперпозиції квантових станів і квантової заплутаності, які кардинально відрізняються від класичної булевої логіки. Квантові алгоритми ґрунтуються на матричних операціях, що змі-

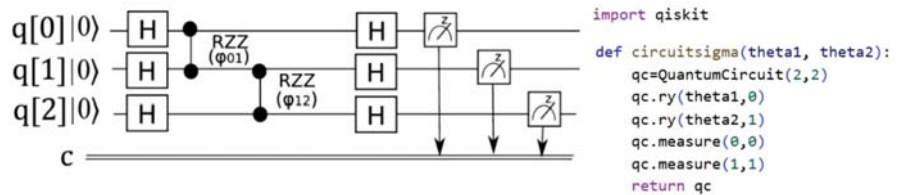
нюють стан кубітів. Завершальним етапом квантового програмування є квантове вимірювання, результат якого має ймовірнісний характер. Тому для того, щоб на виході мати коректну відповідь, у загальному випадку алгоритм потрібно запускати багато разів, щоб накопичити статистику.

На рис. 1 наведено кілька найпростіших квантових протоколів. Перший протокол — оператор заперечення — легко реалізувати за допомогою класичного програмування. Тут оператор NOT переводить стан «0» у стан «1», а стан «1» у стан «0». Двокубітний оператор контрольованого заперечення також можна розглядати як аналог операції IF у класичному програмуванні. Однак є й унікальні оператори, які реалізуються тільки в квантовому програмуванні, зокрема наведений на рис. 1 оператор Адамара. Він переводить базові стани кубіта «0» і «1» у суперпозиції станів «0» і «1». Реалізувати це на класичному процесорі з використанням одного біта неможливо.

Приклади квантових протоколів наведено на рис. 2.

Отже, квантові обчислення містять етапи, відмінні від класичних. Працюючи на квантовому комп'ютері, ми спочатку маємо квантовий процесор у певному стані, найчастіше це стан $|000\dots 0\rangle$. А далі, подібно до того, як музиканти пишуть ноти на нотному стані, ми нани-

Рис. 2. Приклади квантових протоколів



зуємо на квантовому протоколі квантові гейти, тобто діємо певними операціями на квантові стани кубітів, після чого виконуємо квантове вимірювання — втручаємося у квантову систему, щоб отримати, власне, класичне значення вимірюваної величини.

На сьогодні розроблено вже досить багато квантових алгоритмів, серед яких можна відзначити такі:

- алгоритми пошуку;
- оптимізаційні алгоритми;
- алгоритми факторизації;
- алгоритми дослідження властивостей класичних і квантових систем (важливо, що квантові процесори є природним ресурсом для дослідження саме квантових систем);
- квантове машинне навчання.

Тепер перейду безпосередньо до своїх результатів, отриманих разом із моїми учнями та колегами, з дослідження різних властивостей багатокубітних квантових станів.

Як уже зазначалося вище, квантова заплутаність поряд із суперпозицією є важливими ресурсами квантових обчислень. Відповідно, дуже велике значення мають аналітичні дослідження квантової заплутаності для приготування максимально заплутаних квантових станів.

Ми обчислювали різні міри заплутаності з використанням як аналітичних розрахунків, так і квантових обчислень. Зокрема, вивчали квантові графові стани — заплутані багатокубітові стани, які можна описати графами.

Графи (структури, які складаються з вершин і зв'язків між ними) набули широкого практичного застосування в моделюванні різноманітних складних структур. Наприклад, їх часто використовують для опису соціальних

процесів, транспортних, інфраструктурних чи логістичних мереж тощо. Такі класичні об'єкти можна досліджувати за допомогою квантових обчислень. Для цього потрібно придумати представлення класичних графів за допомогою квантових систем та їхніх властивостей. У літературі сьогодні багато уваги приділяють ідеї про квантові графові стани.

Ми знайшли заплутаність еволюційних квантових станів спінових систем, багатокубітних квантових графових станів з довільною структурою, дослідили залежність заплутаності від параметрів багатокубітних квантових станів, характеристик відповідних графів.

Нарис. 3 наведено результати обчислень, проведених ще в 2021 р. на квантовому комп'ютері IBMQ Athens компанії IBM [1]. Це заплутаність квантових графових станів, утворених за допомогою контрольованих операторів зсуву фази. На рисунку хрестиками позначено результати реальних квантових обчислень, а суцільною лінією — результати теоретичних розрахунків. Як можна бачити, результати квантових обчислень добре узгоджуються з аналітичними.

У пізнішій роботі [2] ми дослідили більш складні квантові стани, що відповідають орієнтованим зваженим графам. На рис. 4 хрестиками позначено результати квантових обчислень з використанням квантового симулятора, а суцільна поверхня — це результат аналітичних розрахунків.

Хочу наголосити також на можливому подальшому використанні отриманих нами результатів. Квантові графові стани можна застосовувати, зокрема, в алгоритмах корекції квантових помилок, у квантовому машинному навчанні та квантовій криптографії, що сприятиме подальшому розвитку квантових об-

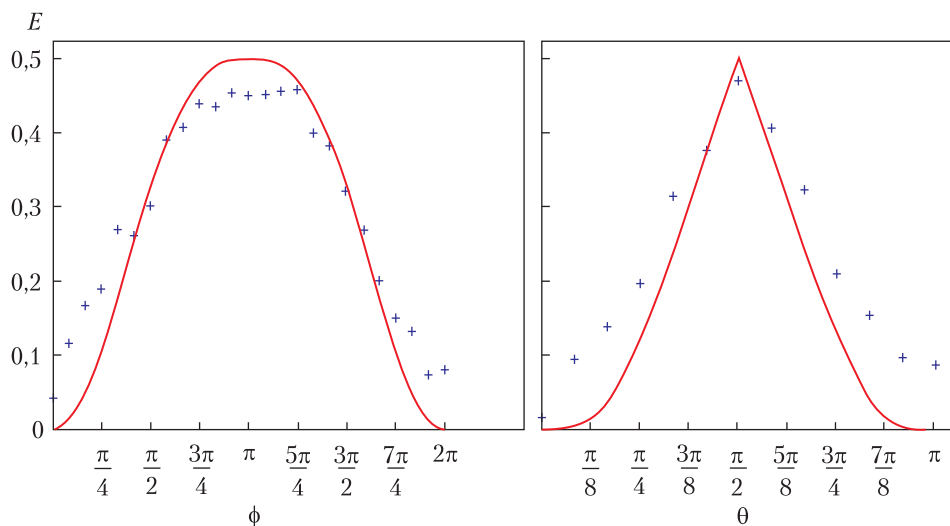


Рис. 3. Порівняння результатів квантових обчислень заплутаності спінових систем (хрестики) і теоретичних результатів (суцільні лінії) для графа $K_{1,3}$ [1]

числень. Важливо також, що саму квантову заплутаність багатокубітних квантових станів ефективніше досліджувати за допомогою квантових обчислень, ніж аналітично. Тобто з розвитком квантових технологій можна досягти квантової переваги в розв'язанні такої задачі.

Ми розробили також квантові алгоритми для дослідження структурних особливостей зважених графів [3]. В основі цих алгоритмів лежить отриманий нами зв'язок властивостей квантових графових станів зі структурними властивостями відповідних графів. Такі алгоритми відкривають можливості для досягнення квантової переваги в розв'язанні задач з визначення добутоків ваг ребер, які утворюють замкнені цикли довжиною 3, 4 у графах.

Проведено аналітичні та квантові обчислення заплутаності квантових станів, що відповідають двочастинним графам [4]. Двочастинний граф $G(U, V, E)$ — це такий тип графа, в якому множину вершин можна розділити на дві окремі групи U і V , що не перетинаються одна з одною, так що кожне ребро з'єднує вершину з множини U з вершиною з множини V . У загальному випадку квантових станів, які відповідають двочастинним графам довільної структури, знайдено міру заплутаності та проаналізовано її залежність від параметрів початкових станів. Встановлено зв'язок заплутаності зі ступенем вузла відповідного графа (рис. 5).

Крім того, розроблено квантові алгоритми для дослідження структурних особливостей двочастинних графів на основі обчислень квантових кореляторів із використанням квантового програмування [4].

Отримані результати важливі для приготування заплутаних квантових станів; розроблення алгоритмів виправлення помилок квантових обчислень; квантового машинного навчання; дослідження властивостей графів із використанням квантових обчислень. Двочастинні графи використовують для розв'язання задач відповідності, розподілу ресурсів, планування завдань тощо.

Ще один цикл наших робіт присвячено розробленню квантового алгоритму для знаходження енергетичних рівнів спінових систем [5, 6]. Знайдено енергетичні рівні спінових систем на основі дослідження часової еволюції середнього значення пробного спіну з використанням квантового програмування на квантових комп'ютерах компанії IBM [5–7]. Показано, що метод є стійким до похибок, які виникають під час квантових обчислень. Це означає, що навіть на наявних на сьогодні квантових процесорах можна отримати коректні результати для енергетичних рівнів. Річ у тім, що основним недоліком сучасних квантових комп'ютерів є висока чутливість кубітів до зовнішніх впливів (вібрацій, електромагнітних

Рис. 4. Результати квантових обчислень заплутаності (хрестики) та аналітичні результати (суцільна поверхня); 3D-гістограма (справа) ілюструє різницю між цими результатами [2]

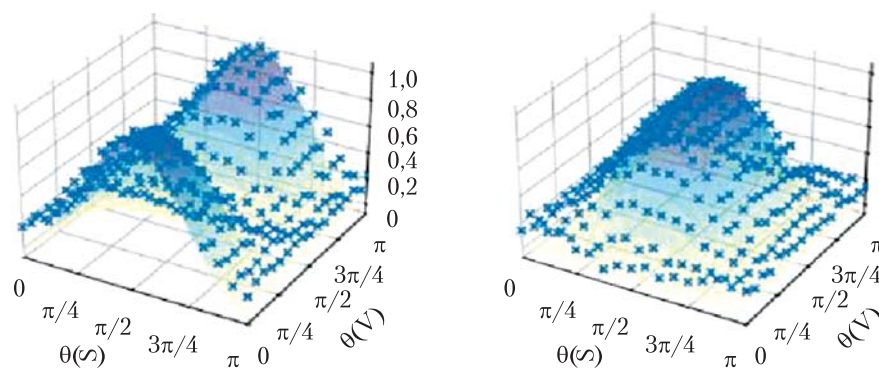
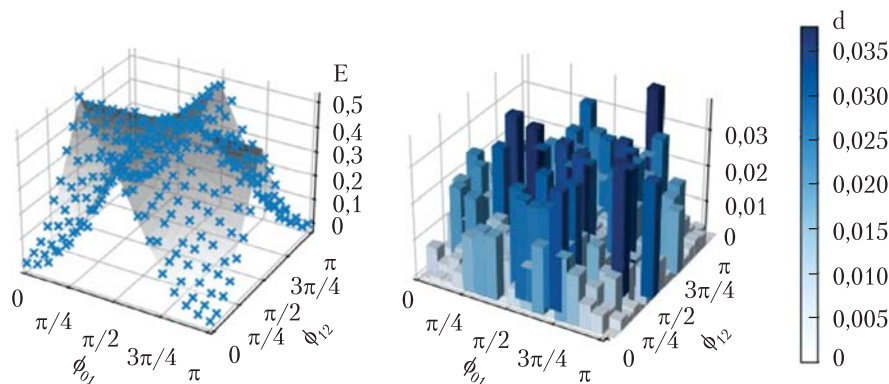


Рис. 5. Результати квантових обчислень міри заплутаності (хрестики) та аналітичні результати (суцільна поверхня) для двочастинного графа-зірки K1,3

полів, температурних коливань), що призводить до втрати квантової інформації, помилок у квантових обчисленнях і не дозволяє повною мірою реалізовувати потужності квантового процесора. Іноді ми отримуємо результати, які виглядають просто як шум. Тому стійкість алгоритму до похибок є дуже важливою.

Прикладне застосування отриманих результатів пов'язане насамперед з подальшим дослідженням спектрів спінових систем із різними типами взаємодій, а також із розв'язанням оптимізаційних задач в економіці, логістиці тощо.

Отже, я розповіла лише про деякі результати, отримані мною разом з учнями та колегами у Львівському національному університеті імені Івана Франка, але в Україні є багато центрів, де проводять дослідження в галузі квантових технологій. У дуже ґрунтовній доповіді з цього питання, яку зробив на засіданні Президії НАН

України 2 липня 2025 р. член-кореспондент НАН України Андрій Семенов [8], наведено перелік установ, де розвиваються квантові дослідження. До них належать:

- Інститут фізики НАН України (відділ квантової та когерентної оптики під керівництвом академіка НАН України Леоніда Яценка та відділ лазерної спектроскопії під керівництвом члена-кореспондента НАН України Анатолія Негрійка);
- Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (група квантової оптики та квантової інформації під керівництвом члена-кореспондента НАН України Андрія Семенова);
- Державна наукова установа «Київський академічний університет» (дослідження під керівництвом академіка НАН України Олександра Кордюка, професора Михайла Білоголовського і доцента Данила Якименка);

- Інститут математики НАН України (відділ функціонального аналізу під керівництвом професора Василя Островського);

- Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (відділ надпровідних та мезоскопічних структур під керівництвом професора Сергія Шевченка);

- Інститут теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» (група під керівництвом члена-кореспондента НАН України Андрія Сотнікова);

- Інститут фізики конденсованих систем імені І.Р. Юхновського НАН України (відділ квантової статистики під керівництвом доктора фізико-математичних наук Олега Держка);

- IT-компанії SoftServe та Haiqu Ukraine.

І на завершення з приємністю скажу кілька слів про підготовку молодих фахівців у галузі квантової інформації та квантового програмування. У 2020 р. у Львівському національному університеті імені Івана Франка ми відкрили бакалаврську і магістерську освітні програми «Квантові комп'ютери та квантове програмування». Причому бакалаврська програма була першою в Україні та однією з перших у Європі. Я є її гарантом, а гарантом магістерської освітньої програми є професор Володимир Ткачук. Крім того, магістерські освітні програми з квантової інформації та квантових обчислень діють у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка та Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна.

Львівський національний університет імені Івана Франка бере участь у виконанні різ-

них міжнародних проектів у галузі квантової інформації, зокрема проекту Європейської комісії Quantum Academy, який об'єднує 73 університети і наукові центри Європи. Основними напрямками діяльності в цьому проекті є читання лекцій, проведення міжнародних заходів, організація стажування для студентів, оновлення освітніх програм. Інший проект, «Багаточастинкові відкриті квантові системи», який виконується за підтримки COST і об'єднує науковців із 19 країн Європи, має на меті розвиток людського потенціалу через навчальні лекції, тренінги та менторство для студентів, аспірантів і молодих учених.

Дуже важливим, на мою думку, напрямом нашої діяльності є навчання учнівської молоді основам квантового програмування. Починаючи з 2023 р. ми проводимо на базі Львівського національного університету імені Івана Франка у співпраці з Львівською обласною Малою академією наук щорічні літні школи «Квантове програмування для школярів», де учні отримують уявлення про квантові технології, дізнаються, чому цей напрям є зараз одним із найбільш актуальних, а також знайомляться з дещо неочікуваними застосуваннями квантової фізики, зокрема з популярним сьогодні у світі експериментальним напрямом — квантовою музикою, яку створюють на основі квантових алгоритмів.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Gnatenko Kh.P., Susulovska N.A. Geometric measure of entanglement of multi-qubit graph states and its detection on a quantum computer. *Europhysics Letters*. 2022. **136**(4): 40003. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/ac419b>
2. Gnatenko Kh.P. Entanglement of multi-qubit states representing directed networks and its detection with quantum computing. *Phys. Lett. A*. 2024. **521**: 129815. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129815>
3. Gnatenko Kh.P. Relation of curvature and torsion of weighted graph states with graph properties and its studies on a quantum computer. *Eur. Phys. J. Plus*. 2025. **140**(2): 241. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-025-06172-9>
4. Gnatenko Kh.P. Studies of properties of bipartite graphs with quantum programming. *Phys. Lett. A*. 2026. **566**: 131191. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2025.131191>
5. Gnatenko Kh.P., Laba H.P., Tkachuk V.M. Energy levels estimation on a quantum computer by evolution of a physical quantity. *Phys. Lett. A*. 2022. **424**: 127843. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127843>
6. Gnatenko Kh.P., Laba H.P., Tkachuk V.M. Detection of energy levels of a spin system on a quantum computer by probe spin evolution. *Eur. Phys. J. Plus*. 2022. **137**: 522. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02753-0>
7. Gnatenko Kh.P., Tkachuk V.M. Observation of spin-1 tunneling on a quantum computer. *Eur. Phys. J. Plus*. 2023. **138**: 346. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-03942-1>
8. Semenov A.O. Quantum technologies in Ukraine: development and application (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, July 2, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (9): 50—56. <https://doi.org/10.15407/visn2025.09.050>
[Семенов А.О. Квантові технології в Україні: розвиток і застосування (стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 2 липня 2025 р.). *Вісник НАН України*. 2025. № 9. С. 50—56.]

Khrystyna P. Gnatenko

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-5872>

QUANTUM PROGRAMMING: NEW POSSIBILITIES FOR SOLVING FUNDAMENTAL PROBLEMS AND PROSPECTS FOR PRACTICAL APPLICATION

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 25, 2026

The report presents the results of scientific research conducted at the Ivan Vakarchuk Department of Theoretical Physics of the Ivan Franko National University of Lviv and aimed at solving problems of quantum information and building quantum algorithms for solving fundamental and applied problems.

Cite this article: Gnatenko K.P. Quantum programming: new possibilities for solving fundamental problems and prospects for practical application (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 25, 2026). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (4): 44—51. <https://doi.org/10.15407/visn2026.04.044>