

Exploring the quantum frontier in school informatics: a pedagogical journey

Liudmyla V. Lehka¹[0000–0001–5768–5475],
Svitlana V. Shokaliuk¹[0000–0003–3774–1729], and
Serhiy O. Semerikov^{1,2,3}[0000–0003–0789–0272]

¹ Kryvyi Rih State Pedagogical University,
54 Gagarin Ave., Kryvyi Rih, 50086, Ukraine
{legkalv, semerikov}@gmail.com, shokalyuk@kdpu.edu.ua
<https://kdpu.edu.ua/personal/svshokaliuk.html>, <https://kdpu.edu.ua/semerikov>

² Kryvyi Rih National University,
11 Vitalii Matusevych Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

³ Institute for Digitalisation of Education of the NAES of Ukraine,
9 M. Berlynskoho Str., Kyiv, 04060, Ukraine

Abstract. This study delves into the theoretical examination, creation, and experimental testing of diverse instructional approaches aimed at introducing lyceum students to the fundamental principles of quantum informatics. Our research encompasses the following accomplishments: 1) A comprehensive analysis of relevant literature on the teaching of quantum informatics, both within Ukraine and internationally; 2) Theoretical grounding and development of the structure and content of competencies in the fundamentals of quantum informatics for lyceum students, incorporating insights from expert surveys and the European competence framework in quantum technologies; 3) Development of a robust structural and functional model for cultivating competencies in the fundamentals of quantum informatics; 4) Proposal of a methodological framework for teaching the fundamentals of quantum informatics to lyceum students through an optional course; and 5) Experimental validation of the efficacy of the developed methodology in enhancing students' competency in the fundamentals of quantum informatics. Furthermore, we outline future scientific investigations pertaining to the quantum transformation of informatics education in schools.

Keywords: informatics education · general secondary education · lyceum student pedagogy · quantum technologies · quantum informatics · competencies in quantum informatics fundamentals · quantum transformation of school informatics education

1 Вступ

Зміни, що відбувались у методиці навчання інформатики в школі, були зумовлені розвитком інформаційних технологій та змінами у суспільстві як наслідок їх впливу. Останнє призвело до того, що шкільна інформатика разом із іноземною мовою стала наскрізною на всіх рівнях шкільної освіти –

від початкової школи до профільного навчання у ліцеї. Засоби інформатики є інтегратором для усіх шкільних предметів, а її методи – основою інтеграції природничих наук, математики та технологій. Це створює хибне уявлення про обслуговуючу, підпорядковану та другорядну роль інформатики у системі шкільної освіти. Позбутися його допоможе фундаменталізація змісту навчання інформатики, зокрема – через квантову трансформацію базових знань про інформаційні процеси й системи, апаратне та програмне забезпечення, мережі, алгоритми і програми.

Квантова трансформація шкільної інформатичної освіти – це процес інтеграції концепцій квантових обчислень і квантової інформатики у навчальні програми з інформатики та методик її навчання.

Традиційно шкільна інформатична освіта зосереджена на класичних принципах обчислень, алгоритмах, мовах програмування та інформаційних технологіях. Проте з розвитком квантових технологій зростає визнання необхідності ознайомлення учнів з основами квантових обчислень та їх потенційним впливом на різні сфери, тому ключовою метою квантової трансформації є надання учням знань та умінь з основ квантової інформатики.

Ще одна важлива мета квантової трансформації – підготувати учнів до майбутнього, де квантові обчислення та квантові технології відіграватимуть дедалі важливішу роль. Оскільки квантові обчислення набувають все більшого поширення, зростатиме попит на кваліфікованих працівників, які зможуть розробляти та впроваджувати квантові алгоритми, налагоджувати та використовувати квантове обладнання тощо. Формуючи в учнів компетентності з основ квантової інформатики, ми можемо допомогти їм опанувати професії майбутнього, що лише виникають.

Нарешті, квантова трансформація також може сприяти розвитку більш творчого та інноваційного підходу до вирішення проблем. Квантові обчислення – це принципово інший спосіб мислення про обчислення, і він може допомогти учням розробити нові способи вирішення проблем. Це може бути корисним у всіх сферах життя, а не лише в інформатиці.

Квантова трансформація шкільної інформатичної освіти є складним, але важливими завданням, вирішення якого може революціонізувати шкільну інформатику та методик її навчання.

За даними аналітичного звіту Національного інституту стратегічних досліджень, Україна перебуває на узбіччі розвитку проривних технологій, зокрема квантових, що пов'язане, по-перше, із недостатнім держбюджетним фінансуванням наукових досліджень у цілому, по-друге, із суттєвою невідповідністю професійно-кваліфікаційної робочої сили потребам ринку. При цьому європейські сайти з пошуку роботи містять сотні вакансій за запитом “інженер з квантового програмного забезпечення” та “квантовий програміст”.

Аналіз досвіду навчання інформатики в Україні та джерел із проблеми дослідження надали можливість виокремити протиріччя:

- між значущістю опанування квантової інформатики для підвищення конкурентоспроможності та успішної самореалізації випускників у ліцеїв

- на ринку праці (зокрема, у сфері інформаційних технологій) та відсутністю відповідних навчальних матеріалів українською мовою;
- між доцільністю набуття досвіду практичної діяльності із квантовими комп'ютерами та утрудненістю безпосереднього доступу до них;
- між необхідністю формування в учнів ліцеїв компетентностей з основ квантової інформатики та нерозробленістю відповідної методики.

Необхідність розв'язання вказаних протиріч обумовили визначення мети дослідження і формулювання його гіпотези. *Мета дослідження* полягала у теоретичному обґрунтуванні, розробці та експериментальній перевірці методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв. Доведенню (або спростуванню) підлягало *припущення* про те, що формування в учнів ліцеїв компетентностей із основ квантової інформатики на високому рівні можливе за умови зміни окремих компонентів методичної системи навчання інформатики: змісту та засобів навчання.

2 Теоретичні засади навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

2.1 Квантова інформатика як перспективний напрям розвитку інформаційних технологій

У серпні 2020 року консалтингова компанія Gartner опублікувала чергову версію своєї кривої розвитку (Hype Cycle) передових технологій, що суттєво вплинуть на суспільство та бізнес упродовж наступних п'яти-десяти років. На основі розгляду 1700 провідних технологій К. Панетта (Kasey Panetta) виокремлює 5 нових тенденцій їх розвитку:

- Composite architectures (“складені/композиційні архітектури”);
- Algorithmic trust (“алгоритмічна довіра”);
- Beyond silicon (“окрім кремнію”);
- Formative AI (“формуючий штучний інтелект”);
- Digital me (“цифровий Я”).

В описі тенденції Beyond silicon наголошується про те, що закон Мура вичерпав себе, адже створити транзистор розміром менше 1 нм практично неможливо. При виробництві мають місце складнощі технічного характеру і тому є сенс розвивати некремнієві технології – транзистори на основі вуглецю і квантове обладнання, зокрема квантові комп'ютери [25].

У той час, коли розвиток класичних комп'ютерів не припиняється (процесори стали багатоядерними, з'явилися співпроцесори для вирішення задач опрацювання фото, кодування відео тощо), темпи розвитку квантових технологій набирають обертів, а квантові комп'ютери є реальністю [12, 32]. Поява та розвиток квантового обладнання, зокрема квантових комп'ютерів, призвели до виокремлення нової галузі інформатики – квантової інформатики [19].

Слід розуміти, що квантові комп'ютери ні в якому разі не усунуть класичні, однак стануть незамінними для певного типу задач – моделювання складних хімічних реакцій для розробки ліків та речовин із наперед заданими властивостями, моделювання фізичних квантових систем, недоступних для звичайних обчислень, квантові обчислення складних математичних задач, квантовий зв'язок на великі відстані тощо. Розв'язання згаданих задач базується на вже відомих квантових алгоритмах – алгоритмах визначення збалансованості функції (алгоритми Дойча-Йожи та Бернштейна-Вазірані), алгоритми визначення тотожності функцій (алгоритм Саймона), алгоритмах гармонійного аналізу (квантове перетворення Фур'є), алгоритмах криптоаналізу (алгоритми Гровера та Шора), квантової телепортації та нових (поки що експериментальних) алгоритмах.

У багатьох державах світу розвиток квантових технологій підтримується законодавчо і фінансується урядом.

Так, у США штучний інтелект і квантові технології зазначені як два стратегічно важливих напрями для економічного зростання та національної безпеки держави. У 2018 році уряд США ухвалив закон про Національну квантову ініціативу (National Quantum Initiative), мета якого забезпечити збереження позицій світового лідера в галузі квантової інформатики та її технологічних застосуваннях. Сума фінансування діяльності у межах Національної квантової ініціативи на перші п'ять років становить 1,2 млрд. доларів [2]. Окремі комерційні дослідження здійснюється за фінансування компаній IBM, Microsoft, Google, Intel та ін.

У Китаї, в 2016 році урядом ухвалив Національний план науково-технічних інновацій до 2030 року [1], а у 2017 році розпочато будівництво Національної лабораторії квантової інформатики з початковим фінансуванням 7 млрд. юанів [8]. Китайський технічний гігант Alibaba здійснює значні інвестиції у власні квантові ініціативи, зокрема запуск сервісу емуляторів квантових обчислень через хмарну платформу [6].

У країнах Євросоюзу з жовтня 2018 року розпочато проектну програму “Quantum Flagship” (з мінімальним терміном дії 10 років та очікуваним бюджетом у 1 млрд. євро [28]) на підтримку фундаментальних квантових досліджень. Окрім того, для захисту від кіберзагроз у червні 2019 року 24 європейські держави взяли участь у підписанні декларації задля дослідження, розвитку та розгортання квантової комунікаційної інфраструктури [9].

Актуальною стає потреба у фахівцях з квантових технологій. Нестача квантово грамотних фахівців [24] гальмує розвиток галузі. Так, віцепрезидент D-Wave Дж. Хілтон (Jeremy Hilton) стверджує, що потрібно збільшувати кількість квантово грамотних працівників, інвестувати у навчання підлітків, щоб виявляти здібних молодих людей, розвивати їх у квантових технологіях і створювати кадровий резерв перспективних працівників, що володіють знаннями у квантовій галузі [14].

2.2 Досвід навчання квантової інформатики та популяризації квантових технологій в Україні та світі

В Україні всі освітні програми з квантової інформатики започатковані лише в університетах у межах спеціальності 104 – Фізика та астрономія [15, 26, 33], у той час як у світі підготовка відповідних фахівців відбувається за різними спеціальностями [27].

Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій, започаткована 2021 року, передбачає навчання квантової інформатики, починаючи з початкової школи. Таке навчання має базуватися на концептуальному та інтуїтивному розумінні ключових сутностей квантової інформатики.

На сьогодні, для учнів закладів загальної середньої освіти, як в Україні, так і за її межами, пропонуються насамперед програми неформальної освіти з окремих питань квантових технологій – онлайн-школи, майстер-класи, літні табори для підлітків тощо.

Одеський Рішельєвський ліцей у рамках власного проекту “Науковий лекторій” спільно з Одеським національним університетом імені І. І. Мечнікова пропонує цикл лекцій “Нанoeлектроніка: наука і сучасність”, що зокрема включає лекції про квантові ефекти [31], та “Квантова механіка” [30].

У підручнику з інформатики для 5-го класу при вивченні теми “Інформаційні процеси та системи” оглядово знайомлять учнів з квантовим комп’ютером як технологією майбутнього, вказуючи на стрімкий розвиток квантової галузі на найближче десятиліття, використання квантових комп’ютерів для розв’язку певних видів математичних задач, акцентуючи увагу на застосуванні квантових комп’ютерів разом зі звичайними комп’ютерами [16, с. 28-29].

З серпня 2020 року, офіс науково-технічної політики Білого дому, Національний науковий фонд, а також понад 12 провідних галузевих та академічних лідерів США, запустили інноваційний проєкт National Q-12 Education Partnership, за яким упродовж наступного десятиліття буде здійснюватися співпраця представників промисловості й науковців-викладачів для забезпечення масштабного навчання квантовим технологіям, починаючи від надання інструментів у класі для практичного досвіду, розробки освітніх матеріалів і закінчуючи підтримкою учнів на шляху до професійної кар’єри у квантовій галузі, готуючи кадровий потенціал нового покоління [23]. Провідні IT-компанії – IBM, Microsoft, D-Wave, Google та інші – пропонують спільні з університетами навчальні курси, а також навчальні ресурси для неформальної освіти, що базуються на застосуванні хмарного доступу до квантових симуляторів та квантових комп’ютерів, засобів для складання та виконання квантових схем і програм, мовнозалежних та мовнонезалежних середовищ розробки тощо [5, 11, 22].

Різноманітні навчальні ресурси з квантових технологій для учнів середньої та вищої шкільної освіти, а також усіх зацікавлених, пропонуються на порталі спільноти QTEdu [4], створеного для розвитку навчальної екосистеми на підтримку проєкту QFlagship. З метою популяризації, інформування та навчання з питань квантових технологій до структурованої колекції ресурсів

включені освітні програми, гіперпосилання на зовнішні ресурси, квантові ігри, симулятори, відеоресурси тощо, переважно англійською, німецькою та польською мовами (україномовні та російськомовні ресурси на момент звернення відсутні).

Досвід вітчизняної та світової практик популяризації квантових технологій серед учнів старшого шкільного віку є переконливим свідченням можливості засвоєння основ квантових технологій, за умови методичного адаптування навчальних матеріалів під сприймаючу аудиторію.

2.3 Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Ключова ідея компетентнісного підходу полягає в наданні усім зацікавленим особам діагностичного інструментарію для вимірювання рівня підготовленості особи до виконання певної діяльності.

Опрацювання попередніх результатів світових проєктів з відбору та визначення переліку компетентностей у квантових технологіях – професійні змагання від WorldSkills International [34], семінар “Key Concepts for Future Quantum Information Science Learners” [3], Competence Framework for Quantum Technologies (рис. 1) – надав можливість визначити *компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв* як динамічні комбінації знань, умінь, навичок, способів мислення, поглядів, інших особистих якостей у сфері квантових технологій, що визначають здатність особи успішно провадити подальшу професійну та/або навчальну діяльність із використанням таких технологій.

Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв включають у себе 8 груп компетентностей:

- 1) фізичні основи квантових технологій (основні поняття квантової фізики, динаміка кубітів);
- 2) математичні основи квантової інформатики (основи лінійної алгебри, математика основ квантової фізики, основи статистики квантових вимірювань);
- 3) забезпечувальні технології (оптичні технології, лабораторні технології, експериментальне керування);
- 4) апаратне забезпечення квантових комп’ютерів та датчиків (пристрої на основі спіна, нейтральні атоми та іони, нові види кубітів, обладнання для ініціалізації, маніпуляції та зчитування кубітів, використання апаратних платформ для квантових обчислень);
- 5) квантові обчислення та моделювання (квантові вентиля, квантові мови, засоби та платформи програмування, базові квантові алгоритми, квантова корекція помилок, елементи квантового моделювання);
- 6) квантові датчики та метрологія (атомні годинники, галузі застосування квантових датчиків);
- 7) квантова комунікація (квантова криптографія, квантові мережі, інфраструктура та обладнання квантового зв’язку);

- 8) практичні навички та загальні компетенції (основи класичного програмування, застосування квантових технологій, загальні навички/компетенції).

Ураховуючи, що квантові інформаційні технології є міждисциплінарною галуззю знань, відповідні компетентності не можуть бути визначені як частина цифрових компетентностей.



Рис. 1. Загальна структура рамки компетентностей у галузі квантових технологій (Competence Framework for Quantum Technologies, [10]).

3 Методичні засади навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

3.1 Спеціальні апаратно-програмні засоби навчання основ квантової інформатики

Для вибору спеціальних апаратно-програмних засобів навчання квантової інформатики учнів ліцеїв були проаналізовані сервіси від компаній Microsoft, QuTech, Amazon та IBM [18, 20, 21].

Найбільшу кількість критеріїв задовольняє платформа IBM Quantum, що й була обрана основним інструментальним засобом для опанування основ квантової інформатики за програмою курсу.

Наразі саме IBM надає найбільші можливості безкоштовного використання квантових комп'ютерів та симуляторів через два сервіси – IBM Quantum Composer та IBM Quantum Lab.

Перший сервіс – IBM Quantum Composer – найпростіший інструмент для роботи з квантовими алгоритмами у вигляді квантових схем.

Другий сервіс – IBM Quantum Lab – надає можливість реалізації квантових алгоритмів мовою програмування Python з використанням бібліотеки Qiskit.

3.2 Педагогічна доцільність та зміст навчання основ квантової інформатики у закладах загальної середньої освіти

Модель освітнього процесу (навчання) в межах однієї навчальної одиниці, що відображає упорядкованість (поелементну в часі й просторі, відповідно до цілей навчання й виховання й з урахуванням обраної педагогічної технології) діяльності учнів (тих, хто навчається) стосовно змісту навчання та елементів навчального середовища з певної навчальної одиниці називають нормативною методикою навчання [7, с. 310].

Реальна методика навчання, спираючись на нормативну, відрізняється від неї. Саме у реальній методиці навчання враховуються характеристики наявного навчального середовища та віддзеркалюється творчий аспект діяльності учасників освітнього процесу (наприклад, специфіка навчального середовища конкретного закладу освіти, майстерність вчителя, додаткові змістові елементи, що він використовує на уроках), інакше кажучи – віддзеркалюється специфіка дидактичних умов протікання освітнього процесу.

Нормативна методика навчання певної навчальної одиниці (у нашому випадку – основ квантової інформатики як однойменного предмету, факультативу, інтегрованого курсу тощо) може бути представлена у вигляді структурно-функціональної моделі - моделі, що графічно відображає функціональні особливості структурних елементів певного процесу (у нашому випадку – формування компетентностей з основ квантової інформатики).

У розробленій структурно-функціональній моделі формування компетентностей з основ квантової інформатики [17, с. 82] виокремлені 4 основні

(системотвірні) блоки - цільовий, змістовий, технологічний та результативний (рис. 2), а також 3 допоміжні блоки, що забезпечують взаємозв'язок основних блоків моделі: загальнодидактичні принципи навчання квантової інформатики, апаратно-програмні засоби навчання квантової інформатики та методологічні підходи (компетентнісний, системний, інтеграційний, особистісно-діяльнісний).

Зупинимося докладніше на розгляді цільового та змістового блоків моделі.

Цільовий блок моделі містить компоненти (фактори), що визначають педагогічну доцільність навчальної одиниці в освітньому процесі (локальному чи глобальному). Факторами педагогічної доцільності упровадження основ квантової інформатики в освітній процес закладів загальної середньої освіти є:

- стрімкий розвиток квантових технологій;
- потреба суспільства у кваліфікованих фахівцях квантової галузі;
- квантова комп'ютеризація (Наявність квантових комп'ютерів й іншого квантового обладнання);
- вільний хмарний доступ до квантових комп'ютерів;
- світовий досвід “квантової трансформації” інформатичної освітньої галузі у ЗЗСО;
- допрофесійна підготовка з квантової інформатики.

Для обґрунтування доцільності введення основ квантової інформатики в освітні програми закладів загальної середньої освіти, вивчення стану обізнаності педагогічних працівників у галузі квантових технологій та готовності викладати факультативний курс (або курс за вибором) учням ліцеїв нами була вивчена думка (проведене опитування) вчителів інформатики закладів загальної середньої освіти [17, с. 83-102]. В опитуванні взяли участь 26 вчителів інформатики, які одночасно викладають хімію, трудове навчання та технології, математику.

100% респондентів підтримали твердження, що середня освіта повинна надавати актуальні знання та враховувати при вивченні дисципліни сучасні досягнення галузі. Всі учасники опитування вказали, що використовують хмарні технології при викладанні свого предмета (65,4% – завжди, 34,6% – лише під час дистанційного навчання).

96,2% респондентів погоджуються із тим, що навчальний матеріал (зокрема, з квантової інформатики) необхідно адаптовувати відповідно віку учнів.

96,2% респондентів вказали, що із задоволенням сприймають введення нових розділів, тем до навчальної програми дисципліни, особливо за наявності достатньої та якісної методичної підтримки.

Відповіді респондентів свідчать, що 88,5% хотіли б особисто пройти курс “Основи квантової інформатики”, а 38,5% з них зазначили, що зустрічали багато публікацій з даної теми і зацікавилися.

61,6% респондентів ствердно відповіли на питання “Чи запропонували б Ви курс "Основи квантової інформатики" для здобувачів освіти у своєму

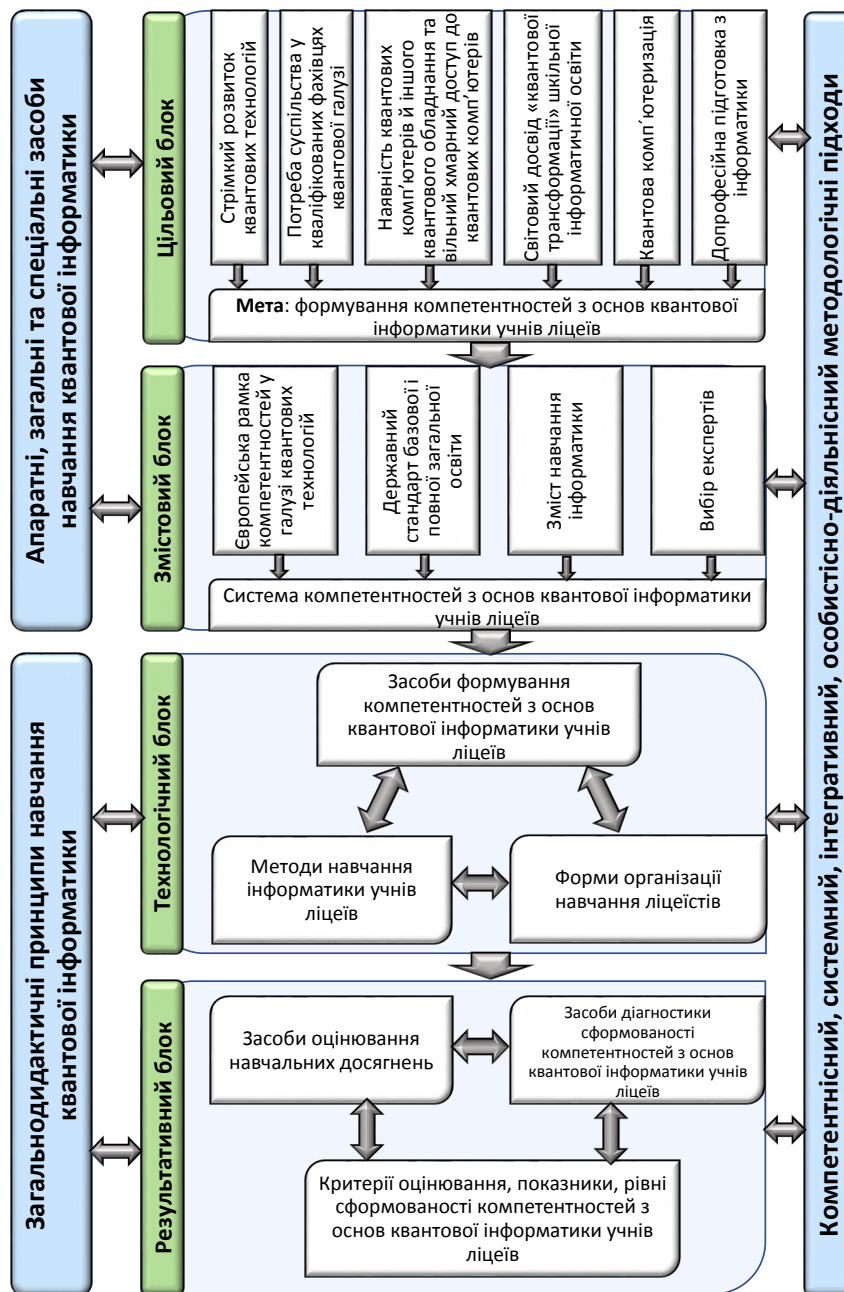


Рис. 2. Структурно-функціональна модель формування компетентностей з основ квантової інформатики.

закладі?”. 23,1% відмовилися, бо, на їх думку, цей курс не відповідатиме профілю закладу освіти, де вони працюють. Лише 3,8% дали відповідь “ні”.

Проведене опитування свідчить про те, що вчителі слідкують за новими тенденціями в галузі й готові викладати здобувачам освіти у своєму закладі сучасні й актуальні курси. Щодо впровадження основ квантової інформатики для учнів ліцеїв, то опитані вчителі виказали свою підтримку такого впровадження за наявності відповідного курсу для вчителів та методичної підтримки.

Змістовий блок моделі формування компетентностей з основ квантової інформатики як відповідної нормативної методики навчання відображає основні напрями змісту формування компетентностей з основ квантової інформатики:

- Європейська рамка компетентностей у галузі квантових технологій (див. п. 2.3);
- Державні освітні стандарти;
- зміст навчання інформатики;
- експертний вибір.

Аналіз розвитку методичних систем навчання інформатики (з 1985 року і донині, з виокремленням чотирьох етапів) показав, що зміст навчання шкільної інформатики розширювався від алгоритмізації й програмування через опанування інформаційних та інформаційно-комунікаційних технологій до інформатики як основи STEM-інтеграції (математично-природничих наук та інженерії) [17].

З метою уточнення змісту та рекомендацій щодо навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв, виявлення значущості складових Європейської рамки компетентностей у галузі квантових технологій було проведено опитування серед зацікавлених у галузі квантових технологій. В опитуванні взяли участь 36 респондентів, частина з яких суміщають декілька посад – наприклад, викладача ЗВО та співробітника НДІ чи викладача ЗВО й учителя ЗЗСО.

Більшість питань анкети передбачали оцінювання доцільності включення до змісту навчання різних знань та умінь з основ квантової інформатики за шкалою від “зовсім неважливо” (–1) до “дуже важливо” (+3) через “утруднююсь відповісти” (0) та “мало важливо” (+1).

Аналіз результатів опитування (з урахуванням рівня компетентності учасника експертного опитування – “маю початкові уявлення” (1), “обізнаний з окремими складовими” (2), “глибоко обізнаний з окремими складовими” (3), “експерт” (4)) надав можливість уточнити і зміст навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв, і систему відповідних компетентностей (до якої увійшли перш за все ті складові (знання й уміння), розрахункові параметри яких перевищували обране порогове значення).

До першої групи компетентностей “Компетентності з фізичних основ квантових технологій” (рис. 3) увійшли:

- знання основних понять квантової фізики;

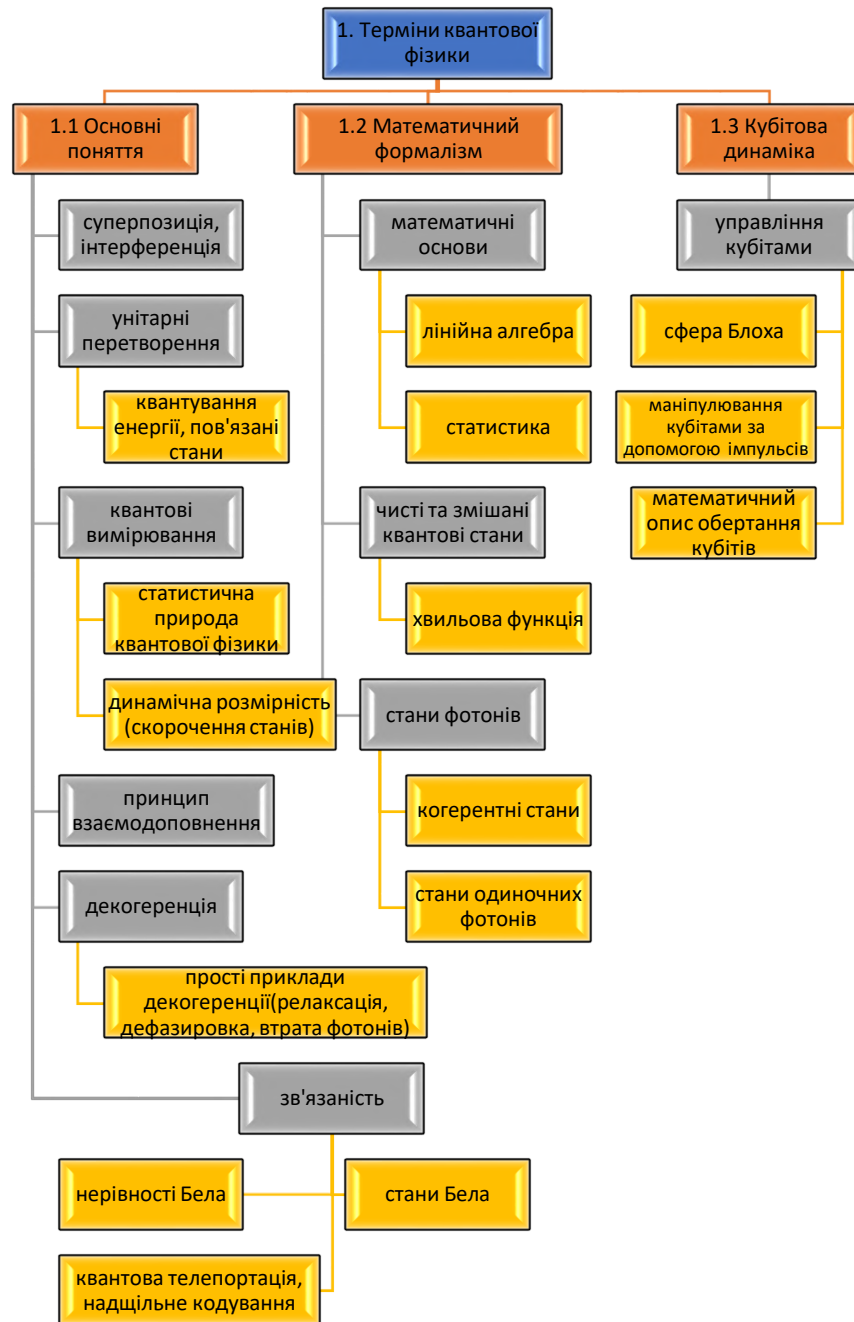


Рис. 3. Фізичні та математичні основи квантових технологій.

- уміння визначати, чи знаходяться кубіти у пов’язаних (заплутаних) станах;
- уміння подавати кубіт на сфері Блоха.

До другої групи компетентностей “Компетентності з математичних основ квантової інформатики” (рис. 3) увійшли:

- знання основ теорії комплексних чисел;
- знання основ лінійної алгебри;
- знання математичних основ квантової фізики;
- знання статистичної природи квантових вимірювань;
- уміння подавати вектори (матриці-стовпці, матриці-рядки) у бра-кет нотації;
- уміння оперувати із стандартними базисами;
- уміння подавати вектор у обраному базисі;
- уміння наводити приклади унітарних матриць та виконувати дії з ними.

До третьої групи компетентностей “Компетентності із забезпечувальних технологій” (рис. 4) увійшли:

- знання оптичних технологій;
- знання лабораторних технологій;
- знання експериментального управління;
- уміння розрізняти джерела фотонів.

До четвертої групи компетентностей “Компетентності з апаратного забезпечення квантових комп’ютерів та датчиків” (рис. 5) увійшли:

- знання будови пристроїв на основі спіну (зокрема, напівпровідникових квантових точок);
- знання апаратних платформ для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням;
- уміння описувати типові структури квантових комп’ютерів, пояснювати загальні принципи їх роботи;
- уміння виконувати налаштування віддаленого доступу до квантових комп’ютерів;
- уміння виконувати квантові програми на квантових комп’ютерах.

До п’ятої групи компетентностей “Компетентності з квантових обчислень та моделювання” (рис. 6) увійшли:

- знання квантових вентилів (одно-, дво- та багатокубітних);
- знання мов квантового програмування, засобів розробки квантового програмного забезпечення та платформ (зокрема, графічних);
- знання базових квантових алгоритмів (Шора, Гровера, квантової оптимізації, оцінки квантової фази, квантової лінійної алгебри, квантового блукання та інших);
- уміння записувати квантові вентиля за допомогою унітарних матриць;

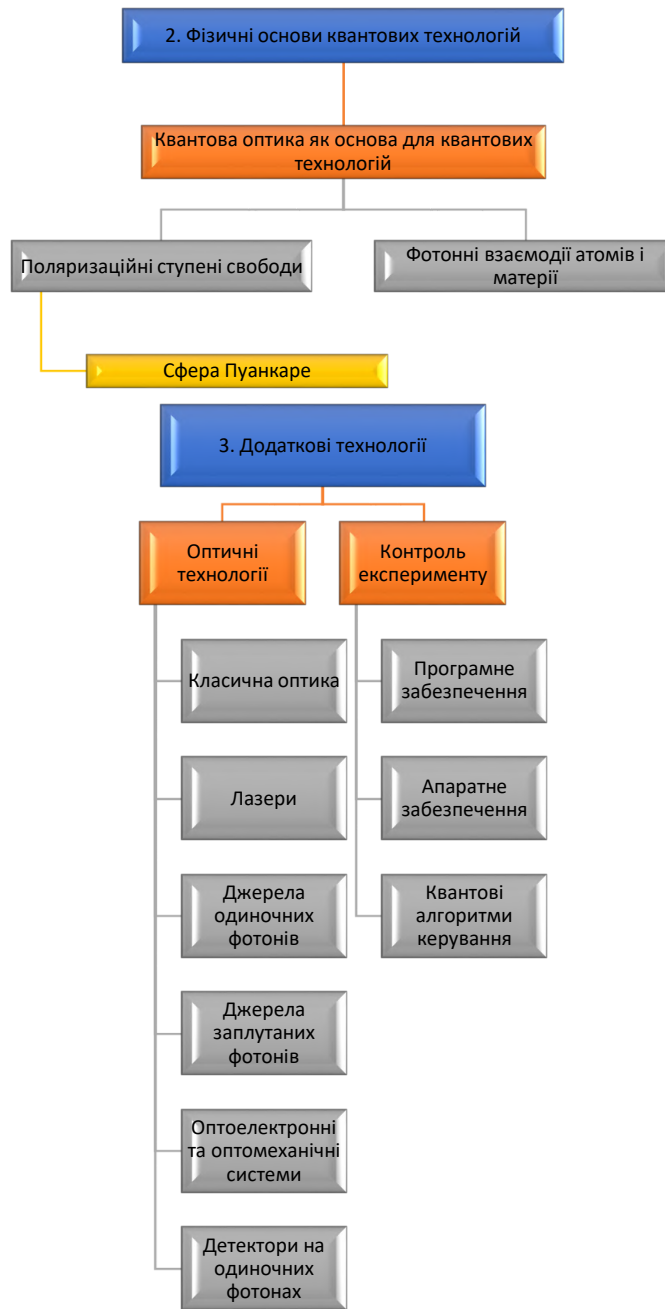


Рис. 4. Забезпечувальні технології.

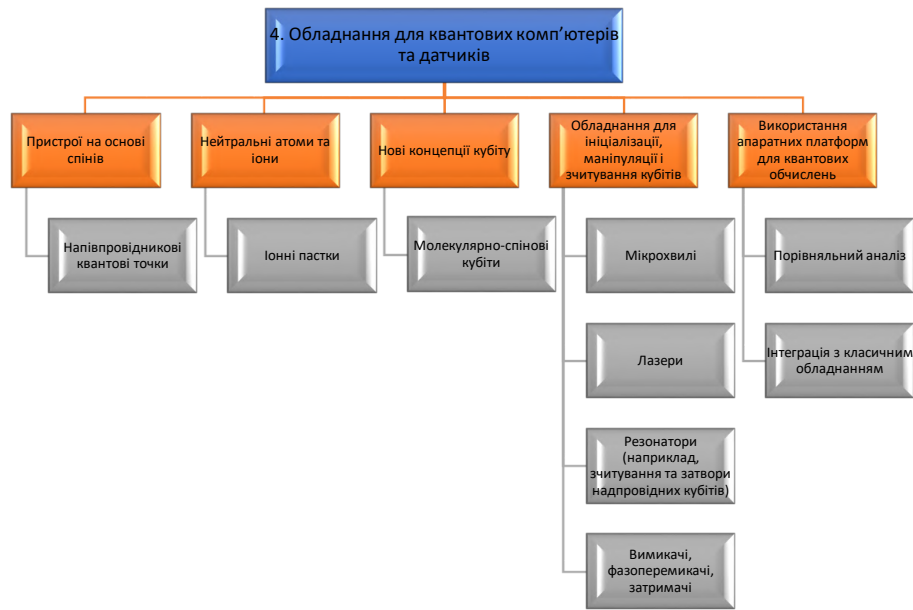


Рис. 5. Апаратне забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків.

- уміння розрізняти та застосовувати однокубітні вентиля (перетворення Паулі, вентиль Адамара, фазові зсуви);
- уміння виконувати операції за допомогою багатокубітних вентилів (CNOT, вентиля Тоффолі та Фредкіна);
- уміння застосовувати квантові вентиля для запису квантових алгоритмів;
- здатність послуговуватись мовами та засобами квантового програмування;
- уміння реалізовувати квантові алгоритми (Шора, Гровера та ін.);
- уміння працювати із квантовими симуляторами.

До шостої групи компетентностей “Компетентності з квантових датчиків та метрології” (рис. 7) увійшли:

- знання галузей застосування квантових датчиків;
- уміння наводити приклади застосування квантових датчиків у різних галузях.

До сьомої групи компетентностей “Компетентності з квантової комунікації” (рис. 8) увійшли:

- знання квантової криптографії (квантового розподілу ключа, безпечної автентифікації, цифрових підписів, галузей застосування);
- знання про квантові мережі (квантовий Інтернет, сенсорні та годинникові мережі);

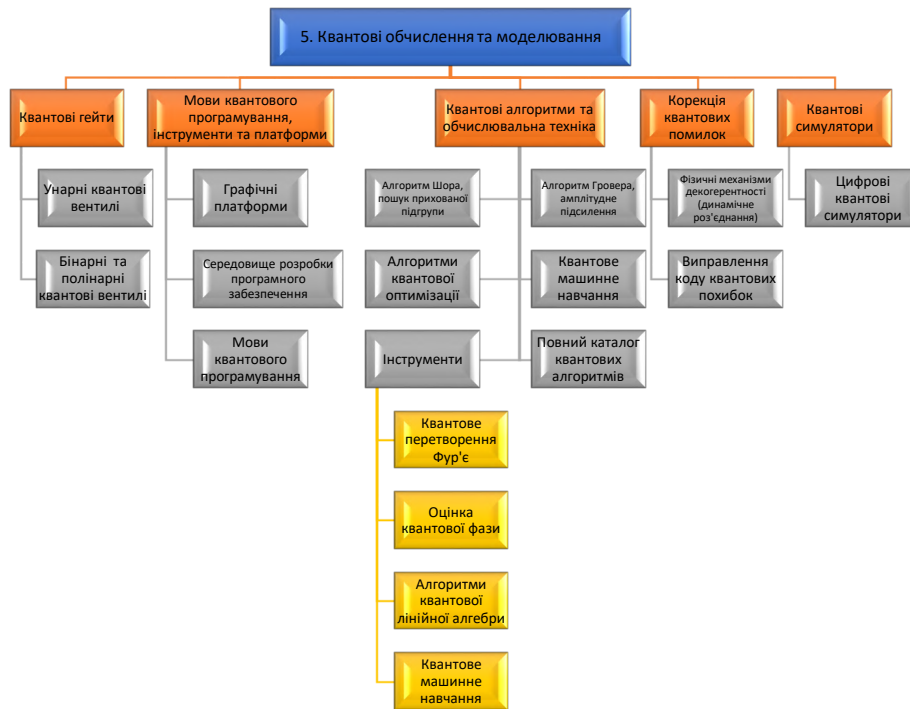


Рис. 6. Квантові обчислення та моделювання.

- знання інфраструктури та обладнання квантового зв'язку (волоконно-оптичні системи, бездротовий зв'язок, супутникові системи; квантові генератори випадкових чисел; квантова пам'ять, інтерфейси, комутатори; повторювачі, кінцеві вузли);
- уміння описувати принципи роботи та будову обладнання квантових мереж;
- уміння наводити приклади застосування квантової криптографії у різних галузях.

До восьмої групи компетентностей “Практичні навички та загальні компетенції” (рис. 9) увійшли:

- знання основ класичного (неквантового) програмування: мов програмування, алгоритмів, класів складності, криптографії;
- знання галузей застосування квантових технологій;
- уміння реалізовувати базові класичні алгоритми (зокрема, криптографічні) мовами програмування;
- уміння наводити приклади використання квантових алгоритмів для досягнення квантової переваги.

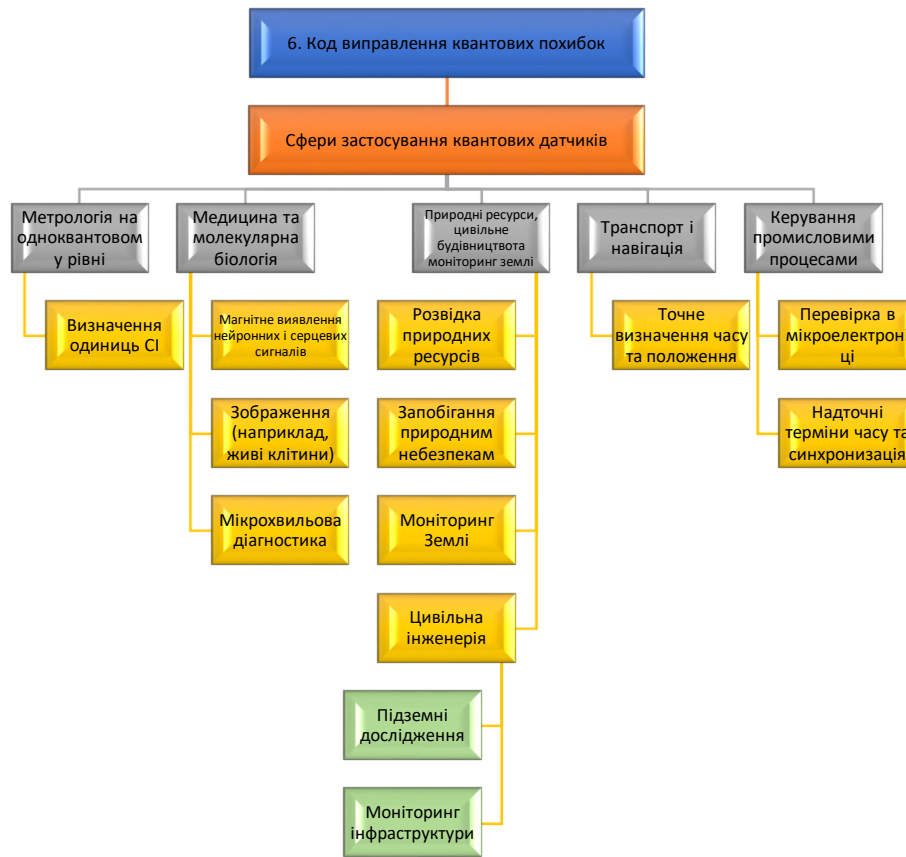


Рис. 7. Квантові датчики та метрологія.

3.3 Елементи методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

Експериментальну реалізацію побудованої структурно-функціональної моделі формування компетентностей з основ квантової інформатики здійснено в межах однойменного факультативного курсу - “Основи квантової інформатики”, орієнтованого на учнів 10 (11) класів. Зміст курсу представлений трьома предметними змістовими лініями – “Фізичні та математичні основи квантової інформатики”, “Квантові обчислення, алгоритмізація та програмування” та “Квантові телекомунікаційні технології”.

У межах змістової лінії “Фізичні та математичні основи квантової інформатики” розкриваються фундаментальні фізичні і математичні аспекти функціонування квантового обладнання, демонструється фізична реалізація явищ мікросвіту, описаних математично.

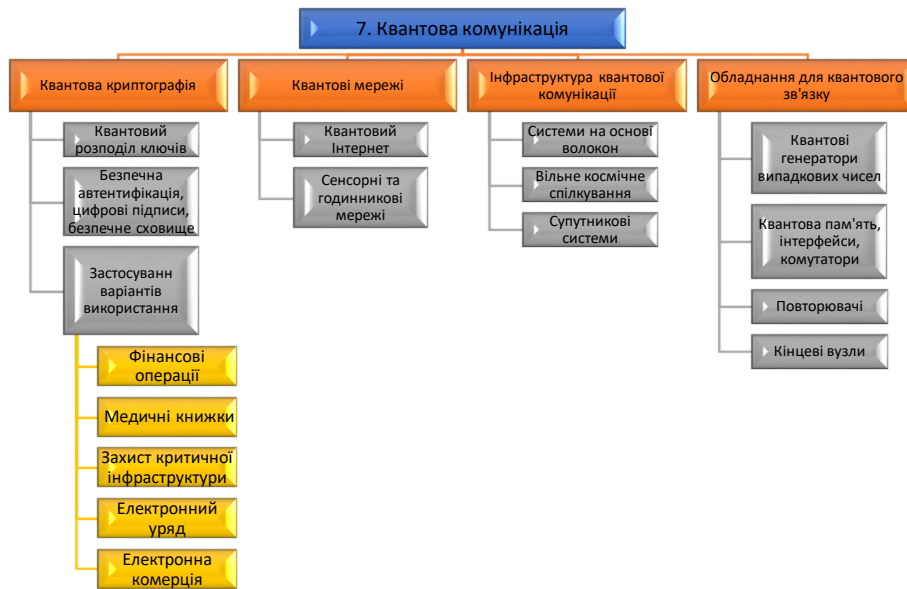


Рис. 8. Квантова комунікація.



Рис. 9. Практичні навички й компетенції.

Понятійний апарат змістової лінії “Фізичні та математичні основи квантової інформатики” – квантова фізика, квант, фотон, принцип суперпозиції, квантова сплутаність, тунелювання, принцип невизначеності, квантова телепортація, хвильова функція, інтерференція, дифракція когерентність, декогерентність, квантовий комп’ютер, кубіт (квантовий біт), бра кет нотація, комплексні числа, сфера Блоха.

Наведемо типові тлумачення перелічених понять, що мають бути засвоєні учнями на уроках з основ квантової інформатики.

Квантова фізика (квантова механіка) – наука, що вивчає закони мікросвіту та описує явища на рівні мікрочастинок (молекул, атомів, електронів, фотонів тощо).

Квант – неподільна мікрочастинка, порція будь-якої величини (енергії, світла й т.ін.).

Фотон (квант світла) – елементарна частинка, з яких складається світло.

Принцип суперпозиції полягає у можливості одночасного перебування мікрочастинки в різних станах певного характерного набору.

Квантова сплутаність (зв’язність, заплутаність) – явище мікросвіту, що означає залежність мікрочастинок одна від одної незалежно від відстані між ними.

Тунелювання – властивість мікрочастинок проходити крізь бар’єр. Мікрочастинка може подолати бар’єр, “перестрибнувши” його, або пройти крізь нього.

Принцип невизначеності, сформульований В. Гейзенбергом, полягає у неможливості одночасного вимірювання з певною точністю координат й імпульсу мікрочастинки.

Квантова телепортація – це надшвидке (миттєве) передавання станів від однієї мікрочастинки до другої. Квантова телепортація не є транспортуванням або будь-яким іншим фізичним переміщенням мікрочастинки з одного місця на інше.

Хвильова функція (вектор стану) – величина, що повністю описує стан мікрочастинки або квантової системи в цілому. Хвильова функція визначає не фізичні параметри, а ймовірнісний закон розподілу станів мікрочастинки.

Інтерференція хвиль – це явище, що виникає при зіткненні двох хвиль, що розповсюджуються в одному середовищі.

Дифракція – здатність хвиль оминати перешкоди.

Когерентність – узгодженість кількох коливальних або хвильових процесів у часі, що виявляється при їх додаванні.

Декогерентність – неузгодженість кількох коливальних або хвильових процесів у часі, що виявляється при їх додаванні.

Квантовий комп’ютер – обчислювальний пристрій, який використовує явища квантової суперпозиції та квантової сплутаності для передавання та опрацювання даних.

Кубіт (квантовий біт, англ. qubit, quantum bit) – найменший елемент для зберігання даних у квантових комп’ютерах. Кубіт являє собою кван-

товий об'єкт, що має два базисні стани, наприклад: спін електрона, фотон, нейтральний атом або іон. Математичною моделлю стану кубіта є одиничний двовимірний вектор.

Компетентності з основ лінійної алгебри включають у себе розуміння не лише поняття вектору, а й матриці, а також основних операцій над матрицями (додавання, множення матриці на число, звичайне множення матриць, тензорне множення матриць).

На даному етапі учні повинні розуміти, що вектор може бути представлений алгебраїчно – у вигляді лінійної (вертикальної або горизонтальної) таблиці чисел або геометрично – у вигляді напруженого відрізка. Вектор-стовпець, що представляє стан кубіта, являє собою певну таблицю чисел з одного стовця і двох рядків. Далі доцільно навести пояснення, що стовців і рядків з числами може бути декілька. Така таблиця чисел, розташованих у рядки і стовці, є матрицею. Кількість рядків і стовців визначають розмірність матриці. Вектор-стовпець або вектор-рядок є окремими (частинними) видами матриць.

Наступним кроком буде ознайомлення учнів з діями над матрицями. Звертаємо увагу учнів, що множення матриці на число (скаляр) здійснюється множенням кожного елемента матриці на необхідне число (скаляр). Демонструємо приклад множення вектора на число та множення матриці на число.

Пояснення операції звичайного множення матриці на матрицю починаємо з множення матриці на вектор, акцентуючи увагу, що множення можна застосовувати лише до матриць, у яких кількість стовців першої матриці та рядків другої матриці співпадають. Результатом множення буде матриця розмірності, що дорівнює кількості рядків першої матриці та кількості стовців другої матриці. Елементи результуючої матриці знаходяться як сума попарних добутків елементів рядка першої матриці на елементи відповідного стовця другої матриці. За потреби можна навести уточнення – щоб помножити матрицю на вектор, слід кожний рядок матриці поелементно помножити на значення вектору. У випадку матриці з трьох (або більше) рядків і стовців техніка множення аналогічна.

Доцільно учням запропонувати для самостійного множення приклади з квадратними матрицями й векторами, елементами яких є виключно нулі й одиниці, як для ручного (письмового) виконання, так і з використанням можливостей табличного процесора (та/або універсальної системи комп'ютерної математики чи мови програмування).

Далі слід учням пояснити, що в теорії квантових обчислень використовується тензорне множення векторів (матриць), що використовується для множення векторів (матриць) довільної розмірності. Учні мають засвоїти, що для виконання тензорного множення необхідно виконати два кроки:

- 1) скалярне множення кожного елемента першої матриці на другу матрицю;
- 2) об'єднати отримані матриці відповідно до вихідного положення цих елементів.

Спочатку доцільно учням навести приклади тензорного множення векторів.

У якості практичного завдання учням може бути запропоноване завдання реалізації тензорного множення за допомогою табличного процесора (та/або універсальної системи комп'ютерної математики чи мови програмування) для двох і трьох векторів.

Наступним наводиться приклад тензорного множення матриць.

Формування компетентності з математичних основ квантової інформатики поміж іншим базується на знанні статистичної природи квантових вимірювань. Стани мікрочастинки, що описуються хвильовою функцією, мають статистичний, тобто ймовірнісний, характер: квадрат абсолютного значення (модуля) хвильової функції вказує на значення ймовірності тих величин, від яких залежить хвильова функція.

Перед початком знайомства з квантовими вентилями (діями, що можуть виконуватися над кубітами) слід розглянути поняття унітарна матриця (особлива числова квадратна матриця, елементами якої є дійсні або комплексні числа, а результат її множення на ермітово спряжену матрицю дорівнює одиничній матриці E), пояснивши терміни, що вжиті у формулюванні. А саме, квадратна матриця (матриця, у якій кількість рядків дорівнює кількості стовпців), ермітово спряжена матриця (матриця A^+ , отримана з матриці A транспонуванням і заміною кожного елемента на комплексно-спряжений), одинична матриця (діагональна матриця, діагональні елементи якої дорівнюють одиниці), діагональна матриця (квадратна матриця, позадіагональні елементи якої дорівнюють нулю). Поняття унітарної матриці доцільно показати щонайменше на двох прикладах – у першому прикладі використати матрицю з дійсночисельними елементами, а у другому – матрицю з комплексними числовими елементами.

Методика навчання змістової лінії “Фізичні та математичні основи квантової інформатики” може бути скорегована, розширена додатковими поясненнями, або скорочена, з урахуванням підготовки учнів з математики і фізики.

У межах змістової лінії “Квантові обчислення, алгоритмізація та програмування” формуються та/або розвиваються компетентності з апаратного забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків, квантової метрології, компетентності із квантових обчислень та моделювання, перш за все, формування знань й умінь розрізняти та застосовувати квантові одно- і багатокубітні вентиля для запису квантових алгоритмів, послуговуватися платформами для реалізації квантових алгоритмів у вигляді схем та програм на квантових симуляторах і реальному квантовому обладнанні.

Розпочати вивчення цієї змістової лінії доцільно з огляду будови квантового комп'ютера, потім перейти до питання забезпечення спеціальних умов їх функціонування:

- дотримання температурного режиму (наближення до абсолютного нуля);
- ізоляція від магнітних, електричних та теплових коливань, вібрації;

– розрідження повітря нижче атмосферного тиску у мільярди разів.

Далі доцільно ознайомити учнів з апаратними платформами для квантових обчислень, способів їх інтеграції з класичним обладнанням на прикладі квантових симуляторів і комп'ютерів однієї з компаній IBM, Microsoft, Google, Intel, QuTech та ін.

Формування компетентності із налаштування віддаленого доступу до квантових комп'ютерів пропонуємо проводити на прикладі платформи IBM Quantum, слід звернути на особливості вибору симулятора або квантового комп'ютера у графічному (IBM Quantum Composer) і програмному режимах (IBM Quantum Lab).

Уміння виконувати квантові програми на квантових комп'ютерах слід формувати, починаючи з простих задач на використання квантових вентилів для зміни стану квантової системи. А потім переходити до реалізації квантових алгоритмів (Бернштейна-Вазірані, Дойча-Йожи, Гровера, Шора).

При введенні поняття “квантові вентиля” (базові логічні елементи/операції для квантового комп'ютера), важливо звернути увагу учнів, що розуміння квантових вентилів аналогічне до розуміння вентилів (логічних елементів, операцій) класичного комп'ютера, а значить знадобиться застосування попередніх знань про логічні операції.

Учні повинні усвідомити, що над кубітами, для зміни їх стану, виконують подібні логічні операції, що і над класичними бітами. Необхідно паралельно розглядати і математичне представлення кожного вентиля (у вигляді унітарної матриці), і їх графічне представлення та результат застосування на квантовій схемі.

В обов'язковому порядку слід розглянути інтерфейс хмаро орієнтованого сервісу IBM Quantum Composer, акцентувавши увагу на інструментальну панель квантових операцій, особливостях кольорового позначення вентилів за типами, додавання, налаштування та вилучення квантових вентилів в області редактора квантової схеми, перегляд зміни стану кубітів.

Починати розгляд слід з однокубітних квантових вентилів як найпростіших, а далі переходити до дво- та трикубітних вентилів.

На цьому етапі в обов'язковому порядку акцентується увага учнів на результаті, що відображається у вигляді вектора стану. Треба пояснити, що отриманий запис стану кубітів у двійковому коді читають справа наліво. У нашому прикладі отриманий результат 01: нульовий кубіт зі значенням 1, а перший – 0. За наявності часу можна запропонувати учням послідовно застосувати ще декілька кубітів на схемі, щоб прослідкувати відображення результатів.

Після ознайомлення із основними операціями над кубітами можна переходити до знайомства учнів з квантовими алгоритмами, починаючи з алгоритму квантової телепортації. Спочатку учням пропонується словесний опис алгоритму, потім – графічна квантова схема, а після неї – програмна реалізація алгоритму.

Наведемо словесний опис алгоритму квантової телепортації, графічний опис якого здійснений за допомогою сервісу IBM Quantum Composer, що представлений на рис. 10:

- 1) за допомогою операції NOT переведемо нульовий кубіт у стан 1, а перший і другий кубіти залишимо у первинному нульовому стані. Слід зауважити, що дана операція є обов'язковою для розглядуваного прикладу, виключно для того, щоб уникнути передавання нульового значення кубіту. Насправді, нульовий кубіт буде містити те значення, що необхідно телепортувати;
- 2) переведемо перший кубіт у суперпозицію вентилем H;
- 3) заплутаємо перший і другий кубіти вентилем CNOT (де перший – контрольний, а другий – цільовий. Якщо контрольний (перший) кубіт у стані 1, то цільовий (другий) інвертується вентилем CNOT);
- 4) аналогічно заплутаємо нульовий і перший кубіти;
- 5) переведемо нульовий кубіт у суперпозицію (за допомогою вентиля H);
- 6) виміряємо стани нульового та першого кубітів (операція Measurement). Результати вимірювання збережемо у два класичні біти, що передаються звичайним (класичним, неквантовим) способом комунікації (каналом, протоколом);
- 7) на стороні, куди передається стан нульового кубіту, є другий кубіт, до якого застосовуємо вентиля CX та CZ (у послідовності виконання CX або CZ не має значення, що буде першим), в результаті отримаємо у другому кубіті значення нульового кубіту;
- 8) виміряємо значення другого кубіту.

Після створення алгоритму квантової телепортації в IBM Quantum Composer перед учнями повинне бути поставлене завдання запустити цю схему, свідомо обравши симулятор або квантовий комп'ютер, та проаналізувати результат. Наразі доцільно пропонувати учням звернути увагу на автоматично згенерований код мовою програмування (наприклад, Python). Учні повинні зробити висновок, що отриманий код повністю відповідає структурі програми обраної мови. Буде корисним провести аналогію між графічним позначенням вентилів та їх еквівалентом – відповідною командою (методом) у мові програмування та відкрити цю схему з автоматично згенерованим кодом у IBM Quantum Lab.

Отримавши знання про основні квантові вентиля, створивши квантову схему телепортації, учні готові перейти до наступного етапу навчання основ квантової інформатики – реалізовувати квантові алгоритми мовою програмування, в межах якого відбуватиметься формування знань й умінь розрізняти та застосовувати квантові одно-, дво- та трикубітні вентиля для реалізації квантових алгоритмів мовою програмування (Python), послуговуватися онлайн-сервісами з програмування, що підтримують роботу Python з модулем Qiskit, для реалізації квантових алгоритмів на квантових симуляторах і реальному квантовому обладнанні.

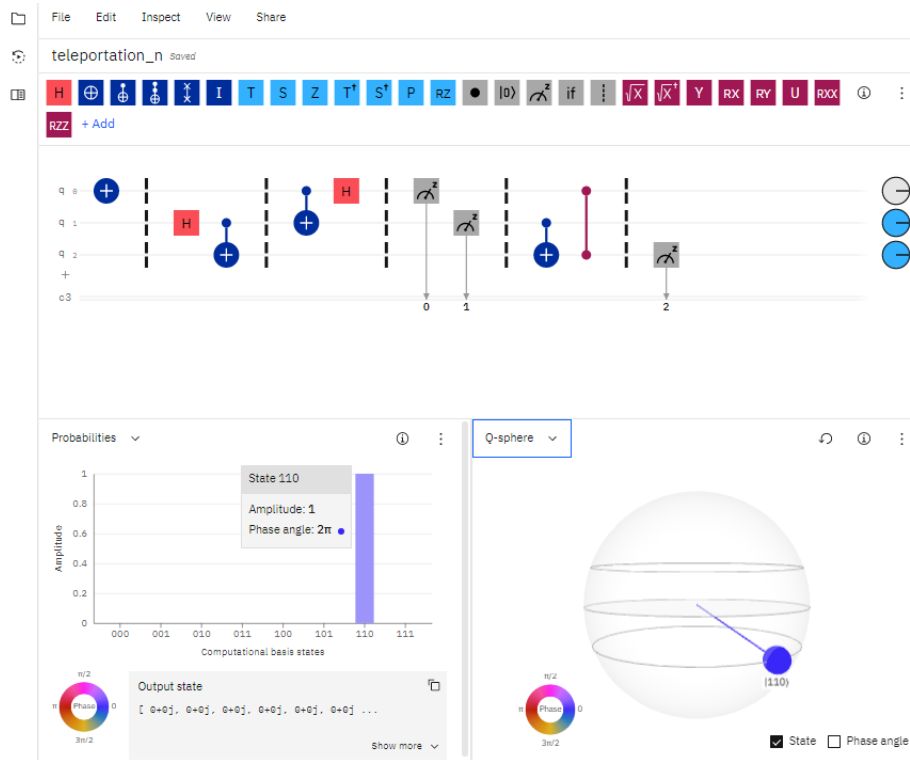


Рис. 10. Алгоритм квантової телепортації в IBM Quantum Composer.

Опорним фундаментом методики навчання даного розділу є знання основ класичного (неквантового) програмування та уміння реалізовувати базові класичні алгоритми мовою програмування.

Обрана хмаро орієнтована платформа для роботи з квантовими алгоритмами (IBM Quantum) забезпечує їх реалізацію мовою Python. Тому методично доцільним буде повторення основ структурного програмування мовою Python.

Зважаючи на відсутність досвіду учнів щодо реалізації Python-програм за допомогою Jupyter Notebook, очевидно, що перед початком реалізації квантових алгоритмів засобами сервісу IBM Quantum Lab необхідно ознайомити учнів з особливостями їх написання та запуску, наприклад, використовуючи онлайн-сервіс Google Colab (<https://colab.research.google.com/>).

Після реалізації й запуску учнями програм-прикладів засобами онлайн-сервісу Google Colab учням доцільно пропонувати відкрити автоматично згенерований код реалізації алгоритму квантової телепортації в IBM Quantum Lab. Необхідно учням поставити питання: “Що спільного в інтерфейсі онлайн-сервісів Google Colab і IBM Quantum Lab?”. Робимо спільний висновок про однотипність використання цих середовищ і переходимо до розгляду особли-

ностей під'єднання до квантових симуляторів і комп'ютерів у IBM Quantum Lab на запропонованих фрагментах коду.

Слід відмітити, що після завершення опанування питань змістової лінії “Квантові обчислення, алгоритмізація та програмування” учні зможуть не тільки дізнатися про найвідоміші алгоритми квантового програмування та спробувати долучитися до їх виконання на реальному квантовому обладнанні, а й вдосконалити компетентності із основ програмування мовою Python.

У межах змістової лінії “Квантові телекомунікаційні технології” передбачається формування компетентностей з забезпечувальних технологій (оптичні технології, лабораторні технології й технології експериментального управління, джерела фотонів) та квантової комунікації (квантова криптографія, квантові мережі, інфраструктура та обладнання квантового зв'язку).

Формування компетентностей із забезпечувальних технологій може проводитися у якості коротких самостійно підготовлених учнівських доповідей на теми, запропоновані вчителем, або ж у вигляді перегляду коротких науково-популярних сюжетів, що відображають актуальний стан розвитку галузі.

Важливим для учнів буде знати про обмеження квантових комунікацій. Учитель зауважує, що головними обмеженнями квантової криптографії є швидкість розподілу ключів і відстань між передавачем та приймачем. Цю проблему намагаються вирішити сучасні фізики, які запропонували нові протоколи, нові оптичні схеми, нові методи виконання вимірювань квантових станів.

Також необхідно говорити учням, що важливою задачею якості квантового каналу зв'язку є зменшення кількості помилок (критичний рівень помилок – 11%). Учні повинні усвідомити, що чим більша відстань, на яку передається квантовий ключ, тим сильніше затухає сигнал у волоконно-оптичних лініях, а шум залишається. Через це в реальних волоконно-оптичних лініях неможливо передавати інформацію на сотні кілометрів.

Доцільним буде згадати розглянуте раніше явище декогеренції (руйнування квантового стану за рахунок взаємодії квантової системи з навколишнім світом). Учитель може описати, що фотони після передачі через багато кілометрів реальних волоконно-оптичних ліній у більшості випадків перестають бути квантово заплутаними (зв'язаними) і перетворюються у звичайні, не пов'язані між собою, кванти світла.

Тому треба наголосити, щоб побудувати ефективну волоконно-оптичну лінію потрібно забезпечити збереження квантової заплутаності при ослабленні сигналу й при проходженні його через підсилювач. Волоконно-оптичні кабелі, прокладені на дні океанів, містять в собі безліч спеціальних підсилювачів на основі оптичного скла з домішками рідкоземельних елементів, і саме ці підсилювачі роблять можливим якісне передавання інформації.

Корисно навести переконливі (мотивуючі до подальшого вивчення) приклади щодо сфер використання квантової криптографії. Доцільно буде навести приклад, що сьогодні у світових банківських data-центрах існують шифратори, що використовують симетричні ключі. До них додатково вста-

новлюються системи квантового розподілу ключів, що змінюються не щомісячно (за класичного підходу), а щосекундно. З одного боку, цей механізм поступається одноразовому блокноту, а з іншого – надає колосальну перевагу.

Можна запропонувати учням засобами будь-якої пошукової системи знайти інформацію про використання квантових технологій у сфері фінансів, наприклад, за останні шість місяців. Якщо працює достатня кількість учнів, то завдання може бути уточнене за географічним розташуванням (на певних континентах, у певних країнах тощо).

Цікаво учням буде дізнатися про те, що квантову криптографію також можна використовувати для розподіленого зберігання даних. Можна розподілити інформацію у кількох data-центрах і постійно переміщувати за допомогою квантово захищених каналів. Таким чином, навіть якщо хтось отримає доступ до частини цих data-центрів, він не отримає всієї необхідної інформації. Це буде працювати й в тому випадку, якщо частина data-центрів буде зруйнована: легітимний користувач зможе, звертаючись аутентифікуватися до решти data-центрів, відновити всю корисну інформацію.

Також повідомляємо учням, що квантові ключі будуть корисні для захисту завдань аутентифікації, яка, по суті, являє собою перевірку “свій – чужий”. У даному випадку суміщення технологій хеш-функцій і одноразового блокнота дозволяють перевіряти, наприклад, прийшли дані для системи інтернету речей від керуючого центру або від когось іншого. Це дуже важливо, так як через п’ять-сім років робота квантового комп’ютера – реальність. У цей же самий час на вулицях з’явиться величезна кількість безпілотних автомобілів, яких поки одиниці, а будуть мільйони. І всім їм потрібно буде отримувати сигнали управління і довіреною чином оновлювати прошивку, місяцями не взаємодіючи з людиною. Це означає, що їм потрібно буде отримувати квантові ключі і використовувати їх потім в процесі руху.

Про перспективи квантової криптографії можна розповісти на прикладі Китаю, де вже побудована національна квантова мережа, яка з’єднує Пекін, Шанхай, Хефей і Цзінань.

Головні технологічні питання зараз – чи вдасться людству в найближче десятиліття виготовити якісний квантовий повторювач? На це питання можна запропонувати учням дискусію, поділившись на прибічників і противників даного твердження.

4 Експериментальна перевірка методики навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв

В експерименті взяли участь 45 учнів трьох шкіл міста Кривий Ріг (Україна).

Матриці компетентностей [17, додаток К] надають можливість повною мірою оцінити рівень сформованості компетентностей з основ квантової інформатики, однак є громіздким і не надто зручним для використання інструментом. Також до недоліків використання матриць компетентностей

слід віднести їх суб'єктивний характер (оцінка формується на основі вражень вчителя від спостереження за діяльністю учнів), недостатню мобільність (оцінювання може виконати лише людина, яка впродовж значного проміжку часу здійснювала спостереження за навчальною діяльністю учнів – учитель інформатики) та неможливість здійснення швидкого оцінювання. Усі ці недоліки суттєво утруднюють використання матриць компетентностей для здійснення вхідного оцінювання рівня сформованості компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв.

Тому для оцінювання рівня сформованості компетентностей з основ квантової інформатики були розроблені та проведені вхідне тестування-опитування [17, додаток М] та підсумкове тестування.

По кожній групі компетентностей відмічена позитивна динаміка зміни рівнів сформованості, проте її величини різняться, що залежить, по-перше, від різного обсягу навчального часу, виділеного на формування/розвиток окремих складових компетентностей (від кількох хвилин на уроці до кількох уроків), а, по-друге, від рівня складності вже адаптованого навчального матеріалу.

Таким чином, можна стверджувати, що гіпотезу дослідження підтверджено, а саме – формування в учнів ліцеїв компетентностей із основ квантової інформатики на високому рівні можливо за умови зміни окремих компонентів методичної системи навчання інформатики: змісту та засобів навчання.

За результатами експерименту були визначені шляхи впровадження основ квантової інформатики в освітній процес ліцеїв:

- 1) вибіркового модуля “Основи квантової інформатики” (17 годин);
- 2) наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики (17 годин);
- 3) інтегрований курс “Основи квантової інформатики” (35 годин).

Наскрізне вивчення основ квантової інформатики у курсах фізики, математики та інформатики пропонується за рахунок включення до програм, перш за все профільного рівня, перелічених предметів наскрізного (загального, спільного) навчального розділу (обсягом по 5-6 навчальних годин) із орієнтовною назвою “Фізико-математичні основи програмування на квантових комп'ютерах”.

На уроках *фізики* (за програмою рівня стандарту) в межах даного розділу пропонується зосередити увагу учнів на таких питаннях:

- основні поняття квантової фізики (рис. 3);
- оптичні технології (рис. 4);
- обладнання для квантових комп'ютерів та датчиків (рис. 5);
- інфраструктура квантової комунікації (рис. 8).

На уроках *математики* – алгебри – (за програмою рівня стандарту) пропонується зосередити увагу учнів на таких питаннях:

- основи лінійної алгебри – вектори та матриці, операції над векторами, операції над матрицями (зокрема, тензорне множення, унітарні матриці);
- основні положення теорії комплексних чисел;
- математичний опис обертання кубітів;
- статистика у квантових обчисленнях (рис. 3).

На уроках *інформатики* в залишиться зосередити увагу учнів на таких питаннях:

- використання апаратних платформ для квантових обчислень (рис. 5);
- квантові обчислення та моделювання (рис. 6);
- сфери застосування квантових датчиків (рис. 7);
- класична криптографія та квантова комунікація (рис. 8, 9).

Обов'язкове навчання для класів інформаційно-технологічного профілю та вибіркоче – для класів фізико-математичного спрямування – пропонується організувати із залученням вчителів трьох класичних (академічних) предметів – фізики, математики та інформатики, або ж організувати курси підвищення кваліфікації вчителів фізико-математичних спеціальностей за програмою відповідного інтегрованого курсу.

Незалежно від вибору експериментальної моделі пропедевтичного вивчення квантової інформатики, головною метою її упровадження має стати розвиток складових комп'ютерної грамотності та інформаційної культури через набуття базових теоретичних знань та практичних умінь здійснювати управління квантовими комп'ютерами як комп'ютерами нового покоління.

5 Висновки

Квантовій трансформації шкільного курсу інформатики бути, зважаючи на перспективність квантових технологій та попит на квантово грамотних фахівців.

Компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв – це динамічні комбінації знань, умінь, навичок, способів мислення, поглядів, інших особистих якостей у сфері квантових технологій, що визначають здатність особи успішно провадити подальшу професійну та/або навчальну діяльність із використанням таких технологій. Складовими компетентностей з основ квантової інформатики учнів ліцеїв є фізичні та математичні основи квантових технологій, забезпечувальні технології, апаратне забезпечення квантових комп'ютерів та датчиків, квантові обчислення та моделювання, квантові датчики та метрологія, квантова комунікація, практичні навички та загальні компетенції.

Проект кваліфікаційних профілів для квантових технологій [13] вже сьогодні надає можливість достатньо чітко визначити, як саме компетентності з основ квантової інформатики учнів ліцеїв – природна інтеграція окремих міжпредметних фізичних та математичних компетентностей та нових

предметних інформатичних компетентностей – відображаються у професіях майбутнього. Так, фахівець із квантової інженерії програмного забезпечення повинен мати досвід у класичному та квантовому програмуванні на рівні B2 (усі рівні – відповідно до DigCompEdu [29]), знати основні концепції квантової фізики та застосувати квантові технології на рівні A2, а також бути компетентним в усьому іншому на рівні A1.

Нормативною методикою навчання основ квантової інформатики учнів ліцеїв є структурно-функціональна модель формування відповідних компетентностей. Реалізацію моделі здійснено в межах факультативного курсу “Основи квантової інформатики”, орієнтованого на учнів 10 (11) класів. Ураховавши критерії добору інструментальних засобів навчання окремих розділів інформатики, основним засобом навчання основ квантової інформатики учнів ліцею обрано платформу IBM Quantum.

Експериментальна перевірка розробленої методики у формі послідовного педагогічного експерименту та статистика отриманих даних підтвердили гіпотезу дослідження про те, що формування в учнів ліцеїв компетентностей із основ квантової інформатики на високому рівні можливо за умови зміни окремих компонентів методичної системи навчання інформатики: змісту та засобів навчання.

Виконане дослідження не вичерпує всіх аспектів проблеми квантової трансформації інформатичної освіти. Подальші наукові пошуки її розв’язання доцільні за такими напрямками: 1) проектування частинних методик формування компетентностей у галузі квантових технологій відповідно до Європейської рамки; 2) інтегроване навчання квантової фізики та інформатики учнів наукових ліцеїв; 3) застосування засобів імерсивного середовища для розробки віртуальних маніпулятивів квантових технологій; 4) розробка методики навчання основ квантових технологій учнів професійних ліцеїв.

References

- [1] Guówùyuàn guānyú yìnfā “shísānwú” guójiā kējì chuàngxīn guīhuà de tōngzhī guó fā (2016) 43 hào [Circular of the state council on printing and distributing the national science and technology innovation plan for the “13th five-year plan” guo fa [2016] no. 43] (2016), URL http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm
- [2] National Quantum Initiative Act (2018), URL <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>
- [3] Key Concepts for Future QIS Learners (May 2020), URL <https://files.webservices.illinois.edu/9156/keyconceptsforfutureqislearners5-20.pdf>
- [4] WG1: QT educational initiatives in primary and secondary schools and public outreach (Mar 2021), URL https://drive.google.com/file/d/14mt_X2xA5smT3_kYZSiXqdWpevRILY6W/view
- [5] Educators program - IBM Quantum (2023), URL <https://quantum-computing.ibm.com/programs/educators>
- [6] Postdoc Positions at Alibaba Quantum Laboratory (Jun 2023), URL <https://damo.alibaba.com/events/137>

- [7] Bykov, V.Y.: Modeli orhanizatsiinykh system vidkrytoi osvity [Models of the open education organizational systems]. Atika, Kyiv (2008), URL <https://lib.iitta.gov.ua/845/>
- [8] Chen, S.: China building world's biggest quantum research facility. South China Morning Post (Sep 2017), URL <https://tinyurl.com/fffa49a>
- [9] Digibyte: Austria, Bulgaria, Denmark and Romania join initiative to explore quantum communication for Europe (Mar 2021), URL <https://tinyurl.com/3xb2s3rc>
- [10] European Commission, Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, Müller, R., Greinert, F.: Competence Framework for Quantum Technologies: Methodology and Version History. Publications Office of the European Union (2021), <https://doi.org/10.2759/130432>
- [11] Google: Educational resources (2023), URL <https://quantumai.google/education>
- [12] Greenemeier, L.: How Close Are We—Really—to Building a Quantum Computer? Scientific American (May 2018), URL <https://www.scientificamerican.com/article/how-close-are-we-really-to-building-a-quantum-computer/>
- [13] Greinert, F., Müller, R.: Qualification Profiles for Quantum Technologies (2022), URL https://qt.eu/media/pdf/QualificationProfilesQuantumTechnology_Beta_Jan2022.pdf
- [14] Hilton, J.: Building The Quantum Workforce Of The Future. Forbes (Jun 2019), URL <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2019/06/19/building-the-quantum-workforce-of-the-future>
- [15] Hnatenko, K.P., Tkachuk, V.M., Chornodolskyi, Y.M., Samar, M.I.: Osvitno-profesiina prohrama bakalavra “Kvantovi kompiutery ta kvantove prohramuvannia” [Quantum computers and quantum programming. Educational and professional program] (2020), URL https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_bak_kvant_komp_2020.pdf
- [16] Korshunova, O., Zavadsky, I.: Informatyka [Informatics]. Osvita, Kyiv (2018)
- [17] Lehka, L.V.: Metodyka navchannia osnov kvantovoi informatyky uchniv li-tseiv [Methods of teaching the basics of quantum informatics to lyceums students]. The dissertation submitted for scientific degree of Doctor of Philosophy on specialty 014 Secondary education (Informatics), Kryvyi Rih State Pedagogical University (2022), <https://doi.org/10.31812/123456789/7042>
- [18] Lehka, L.V., Bielinskyi, A.O., Shokaliuk, S.V., Soloviev, V.N., Merzlykin, P.V., Bohunenko, Y.Y.: Prospects of Quantum Informatics and the Study of Its Basics in the School Course. In: Semerikov, S., Osadchyi, V., Kuzminska, O. (eds.) Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology - Volume 1: AET, pp. 233–240, INSTICC, SciTePress (2022), ISBN 978-989-758-558-6, <https://doi.org/10.5220/0010922900003364>
- [19] Lehka, L.V., Shokaliuk, S.V.: Quantum programming is a promising direction of IT development. CEUR Workshop Proceedings **2292**, 76–82 (2018), ISSN 16130073, URL <http://ceur-ws.org/Vol-2292/paper07.pdf>

- [20] Lehka, L.V., Shokaliuk, S.V.: Hardware and software tools for teaching the basics of quantum informatics to lyceums students. *Educational Dimension* **4**, 102–121 (Jun 2021), <https://doi.org/10.31812/educdim.v56i4.4440>
- [21] Lehka, L.V., Shokaliuk, S.V., Osadchyi, V.V.: Hardware and software tools for teaching the basics of quantum informatics to students of specialized (high) schools. *CTE Workshop Proceedings* **9**, 228–244 (Mar 2022), <https://doi.org/10.55056/cte.117>
- [22] Microsoft: Azure Quantum cloud service (2023), URL <https://azure.microsoft.com/en-us/products/quantum/>
- [23] National Q-12 Education Partnership: About (2023), <https://q12education.org/about>
- [24] Nita, L., Smith, L.M., Chancellor, N., Cramman, H.: The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving. *Research in Science & Technological Education* **41**(2), 564–580 (2023), <https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1920905>
- [25] Panetta, K.: 5 Trends Drive the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2020 (Mar 2021), URL <https://tinyurl.com/abp7akt>
- [26] Pinkevych, I.P., Dmytruk, I.M., Yeshchenko, O.A., Kravchenko, V.M.: Osvitno-naukova prohrama “Kvantovi kompiutery, obchyslennia ta informatsiia” na zdobuttia osvitnoho stupeniu: mahistr za spetsialnistiu 104 “Fizyka ta astronomiia” [Quantum computers, calculations, information. Educational and scientific program for obtaining a master’s degree, specialty 104 “Physics and Astronomy”] (2018), URL <https://tinyurl.com/5aczdc4t>
- [27] QTEdu: Programs, Courses and Trainings: Higher Education (2023), URL <https://qtedu.eu/programs-courses-and-trainings/higher-education>
- [28] Quantum Flagship: The future is Quantum (2023), URL <https://qt.eu/>
- [29] Redecker, C., Punie, Y.: European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu. Scientific analysis or review, Policy assessment, Technical guidance KJ-NA-28775-EN-N, Luxembourg (2017), <https://doi.org/10.2760/178382>
- [30] Rishelievskiyi dystantsiinyi: Kvantova mekhanika [Quantum mechanics] (2021), URL https://youtube.com/playlist?list=PLuKEIL5ZUv-WlkkZQb0DPPTmmgQLl6_By
- [31] Rishelievskiyi dystantsiinyi: Nanoelektronika: nauka i sovremennost [Nanoelectronics: science and modernity] (2021), URL <https://youtube.com/playlist?list=PLuKEIL5ZUv-Wt4DutmgVmddaHQPSpj6uX>
- [32] Shipilov, A., Furr, N.: Making Quantum Computing a Reality. *Harvard Business Review* (Apr 2022), URL <https://hbr.org/2022/04/making-quantum-computing-a-reality>
- [33] Tkachuk, V.M., Hnatenko, K.P., Chornodolskyi, Y.M., Samar, M.I.: Osvitno-profesiina prohrama mahistra “kvantovi kompiutery ta kvantove prohramuvannia” [Quantum computers and quantum programming. Educational and professional program] (2021), URL https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/OP_mag_kvant_comp_1.9_2021.pdf
- [34] WorldSkills: Future Skills for the 2020s (2020), URL <https://api.worldskills.org/resources/download/12832/14248/15165?l=en>